

75038

**TROMBE DUVARLI BİR PASİF GÜNEŞ SİSTEMİNDE
TÜRBÜLANSLI DOĞAL TAŞINIMIN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak.Y.Müh. Hüseyin ONBAŞIOĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Eylül 1998
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Aralık 1998

75038

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Nilüfer EĞRİCAN *a. n. Eğriçan*
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Aksel ÖZTÜRK (İ.T.Ü.) *Aksel Öztürk*
Prof.Dr. Abdurrahman KILIÇ (İ.T.Ü.) *Abdurrahman Kılıç*
Prof.Dr. İsmail TEKE (Y.T.Ü.) *İsmail Teke*
Prof.Dr. Arif İLERİ (O.D.T.Ü.) *Arif İleri*

ARALIK 1998

ÖNSÖZ

Son birkaç yılda, dünyamızın, çevre kirliliği nedeniyle, iklimsel dengelerinin bozulması ve bundan dolayı oluşan doğal felaketlerle, bu konuda, artık alarm vermesi; çevre kirliliğini azaltıcı tedbirlerin biran önce alınmasını zorunlu kılmaktadır. Çevre kirliliğinin en önemli nedenlerinden biri de fosil yakıtların konutlarda ısıtma amacıyla tüketilmesi olduğundan, konutlarda temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilmesi amacıyla yürütülen bilimsel çalışmaların, insanlığın geleceği açısından önemi büyüktür.

Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen güneş enerjisinin önemini yıllar önce farkedip, geniş bilimsel araştırma yelpazesine bu konuyu da dahil eden sayın hocam Prof. Dr. Nilüfer Eğrican, bu konudaki çalışmalarının bir halkası olarak, bana bu doktora çalışmasını önermiştir. Böylesine önemli bir konuda çalışmama olanak sağladığı için ve ayrıca, çalışmamın, deneysel olması nedeniyle getirdiği birtakım zorlukları aşmamda, bana, verdiği bilimsel ve manevi destekten dolayı sayın hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Sadece bu çalışma esnasında değil, hayatımın her alanında, bana, hep destek olan ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, sevgili eşim Y.Doç. Dr. Seyhan Onbaşıoğlu 'na ayrıca teşekkür ederim.

Eylül 1998
İstanbul

Hüseyin Onbaşıoğlu

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	xvi
ÖZET	xvii
SUMMARY	xviii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. TÜRBÜLANSLI DOĞAL TAŞINIM	11
2.1 Türbülans	12
2.2 Türbülanslı Doğal Taşınım	16
BÖLÜM 3. SICAKLIK, AKIŞ VE İŞİNİM ÖLÇÜMÜ	18
3.1. Sıcaklık Ölçümü	19
3.2 Akış Ölçümü	20
3.3. Güneş Işınımı Ölçümü	26
BÖLÜM 4. DENEYSEL ANALİZ	27
4.1 Dizayn Parametreleri ve Gölge Hesabı	27
4.2. Trombe Duvarının Isıl Davranışı	34
4.3 Odanın Isıl Davranışı	40
4.4 Ventilasyon Deliklerinde Hava Hareketi	52
4.5 Oda İçerisinde Hava Hareketi	78
BÖLÜM 5. MODELLEME ve SAYISAL ÇÖZÜM	92
5.1 Modelleme	93
5.2 Sayısal Çözüm	96
5.3 Sayısal Sonuçlar	99
BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER	115
KAYNAKLAR	119
EK A. Termoelemanların Kalibrasyonu ve Belirsizlik Analizi	122
EK B. Sıcak Tel Anemometresinin Kalibrasyonu ve Belirsizlik Analizi	127
EK C. Düşey Düzleme Gelen Güneş Işınımı	133
ÖZGEÇMİŞ	135

SEMBOL LİSTESİ

A	: Alan (m^2)
A_v	: Ventilasyon delikleri kesiti toplam alanı (m^2)
B	: Sistematik (Bias) hata
c	: Yatay gölgeleme elemanının genişliği (m)
c_{e1}, c_{e2}, c_{e3}, c_μ	: Türbülans modeli sabitleri
c_p	: Özgül ısı kapasite (kJ/kg K)
d	: Trombe duvarı kalınlığı (m)
E	: Elektriksel gerilim sinyali (V)
e	: Gölge uzunluğu (m) : Elektriksel gerilim (V)
F	: Akışkan zerreciğine birim hacim başına etkiyen dış kuvvet (N/m^3)
f	: Frekans (Hz)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
G_k	: Buoyant etki terimi
G_{sc}	: (=1367) Güneş sabiti (W/m^2)
h	: Güneş yükseklik açısı (drc): Ventilasyon deliği yüksekliği (m) : Isı taşınım katsayısı ($W/m^2 K$)
H	: Oda yüksekliği (m)
H1	: Üst ventilasyon deliğinin tabandan yüksekliği (m)
h1	: Ventilasyon deliği ile tavan/tabana arasındaki mesafe (m)
I	: Yerde, yatay birim yüzeye düşen saatlik tüm güneş ışıınımı (MJ/m^2)
I_o	: Atmosfer dışında, yatay birim yüzeye düşen saatlik tüm güneş ışıınımı (MJ/m^2)

i	: Elektriksel akım (A)
k	: Isı iletim katsayısı (W/mK): Türbülanslı kinetik enerji (m^2/s^2)
K	: Kurtosis
k_T	: Berraklık indeksi
l	: Karakteristik uzunluk (m)
L	: Odanın genişliği (m)
n	: Gün sayısı (1 Ocak : n=1)
N	: Toplanan veri adedi
Nu	: ($=hl/k$), Nusselt sayısı
P	: Basınç (kPa)
Q	: Isıl güç (W)
R	: Bağımlı değişken
R	: Elektriksel direnç (Ω)
Ra	: Rayleigh sayısı
R_d	: Işınım oranı
Re	: ($=Ul/\nu$), Reynolds sayısı
s	: Kanal genişliği (m)
S	: Rastgele (Random) hata : Skewness
S''	: Birim hacim başına ısı üretimi (W/m^3)
t	: Bağımsız zaman değişkeni (s) : <i>Student's-t</i> dağılımı
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_1	: İntegral zaman ölçeği (s)
u	: ($=U+u$) Türbülanslı akışta toplam hız (m/s)
u	: Türbülanslı akışta salınım hız değeri (m/s)
u,v,w	: Hız bileşenleri (m/s)

U,V,W	: Ortalama hız bileşenleri (m/s)
W	: Hesaplanmış hata
w	: Saat açısı (drc)
X	: Herhangibir değişken (...)
x,y,z	: Kartezyen koordinatlar bağımsız uzay bileşenleri (m)

GreK Harfleri

α	: ($= k/\rho \cdot c_p$), Isıl yayılım katsayısı (m^2/s)
π	: ($=3.14159$) Pi sayısı
Γ	: Difüzyon katsayısı
μ	: Dinamik viskozite ($kg/m \cdot s$) : Gerçek ortalama değer (...)
ε	: Disipasyon (m^2/s^3)
ϕ	: Enlem derecesi (drc) : Bağımlı skaler değişken.
β	: Isıl genleşme katsayısı ($1/^\circ C$) : Eğim açısı (drc)
ν	: Kinematik viskozite (m^2/s)
σ	: Standart sapma
δ	: Deklinasyon açısı (drc)
ρ	: Yoğunluk (m^3/kg)
γ	: Yüzey azimut açısı (drc)
τ	: Zaman değişkeni (s)
ρ_g	: Çevrenin yansıma oranı
$\sigma_k, \sigma_\theta, \sigma_\varepsilon$	: k, T, ε , için Türbülanslı Prandtl sayısı.
γ_s	: Güneş azimut açısı (drc)
z	: Güvenirlilik katsayısı

Alt İndisler

<i>a</i>	: Çevre veya akışkan sıcaklığı (°C)
<i>c</i>	: Cam
<i>d</i>	: Direkt (güneş ışıınımı)
<i>d</i>	: Duvar
<i>E</i>	: Dışsal
<i>G</i>	: Kazanç (Gain), voltajı yükseltilmiş.
<i>I</i>	: İçsel
<i>in</i>	: Giriş
<i>m</i>	: Ortalama
<i>o</i>	: Referans ortamı
<i>r.m.s</i>	: Karelerinin Ortalamasının Karekökü (RootMeanSquare)
<i>u</i>	: Hızın x-bileşenine ait.
<i>w</i>	: Anemometre teline ait
<i>x,y,z</i>	: Kartezyen koordinatların belirttiğı bileşen
<i>y</i>	: Yayılı (güneş ışıınımı)

Üst İndisler

<i>'</i>	: Salınım değeri
<i>—</i>	: Ortalama değeri
<i>m</i>	: Kuvvet

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	North Carolina State University 'de bulunan Güneş Evi	8
Şekil 1.2	Ticari bir uygulama; Enertia® Building System	8
Şekil 1.3	Enertia® Building System, (a) Kış çalışması, (b) Yaz çalışması	9
Şekil 2.1	Türbülanslı akışın üç farklı şekli; (a) Silindır türbülansı, (b) Grid türbülansı, (c) Jet türbülansı	13
Şekil 2.2	Türbülanslı akışta ortalama ve salınım hızları	14
Şekil 2.3	Otokorelasyon Katsayısı Fonksiyonu' nda, $\rho_x(\tau)$, Integral Zaman Ölçeğinin, T_1 , gösterilişi.	15
Şekil 3.1	Bilgisayar destekli veri toplama sisteminin şematik görünüşü	18
Şekil 3.2	Termoelemanların yerleştirilişi	20
Şekil 3.3	DANTEC® Düşük Hız Akış Analizörü (Low Velocity Flow Analyzer)	21
Şekil 3.4	DANTEC® 55P11 <i>sub-miniature</i> probu	22
Şekil 3.5	Sabit Sıcaklık (CT) Anemometresi prensip şeması	23
Şekil 3.6	Sıcak Tel Anemometresi ölçme sisteminin aşamaları	24
Şekil 3.7	DANTEC® StreamLine™ Sıcak Tel Anemometresi Sistemi	24
Şekil 3.8	KIPP&ZONEN CM21 piranometre	26
Şekil 4.1	Trombe Duvarlı Pasif Sistemin önden görünüşü	27
Şekil 4.2	Kontrol odası	28
Şekil 4.3	Test Odası 'nın şematik görünüşü; a) önden görünüş b) yandan görünüş	29
Şekil 4.4	Ventilasyon deliklerinin yerleştirilişi; a) Üst , b) Alt	30

Şekil 4.5	Trombe duvarının gölgelenmesi	31
Şekil 4.6	Gölgelenen yüzeyin toplam yüzeye oranının gün boyunca değişimi	32
Şekil 4.7	Bir yıl boyunca gölgelenme oranının değişimi	32
Şekil 4.8	Gölge uzunluğunun, e (m) , Nisan ve Mayıs aylarındaki durumu	33
Şekil 4.9	Gölgelenen alanın , Nisan ve Mayıs aylarındaki durumu	33
Şekil 4.10	Trombe duvarı yüzeyine termoelemanların yerleştirilişi (19 Nisan 1997)	34
Şekil 4.11	Düşey doğrultuda, 1, 4 ve 7 noktalarındaki sıcaklıkların zamana göre değişimleri (19 Nisan 1997)	35
Şekil 4.12	Belirli zaman aralıklarında düşey doğrultudaki sıcaklık profilleri (19 Nisan 1997)	36
Şekil 4.13	Yatay doğrultuda, 1, 3 ve 7 noktalarındaki sıcaklıkların zamana göre değişimleri (19 Nisan 1997)	36
Şekil 4.14	Yatay düzlemde birim yüzeye gelen anlık tüm güneş ışıınımı (19 Nisan 1997)	37
Şekil 4.15	Trombe duvarı yüzeyine termoelemanların yerleştirilişi (21 Nisan 1997)	37
Şekil 4.16	Trombe duvarı yüzeyindeki sıcaklık dağılımının gün içindeki seyri (21 Nisan 1997)	38
Şekil 4.17	Şekil 4.16 için geçerli olan renk skalası	39
Şekil 4.18	Yatay düzlemde birim yüzeye gelen anlık tüm güneş ışıınımı (21 Nisan 1997)	40
Şekil 4.19	Trombe duvarı cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının zamana göre değişimi (23 Nisan 1997)	41
Şekil 4.20	Dış ortam sıcaklığı ile güneş ışıınımının zamana göre değişimi (23 Nisan 1997)	41
Şekil 4.21	Oda ve kanal içerisinde sıcaklık ölçümü yapılan noktalar (23 Nisan 1997)	42
Şekil 4.22	Ventilasyon delikleri ve kanal içerisinde sıcaklıkların zamana göre değişimi (23 Nisan 1997)	42

Şekil 4.23	Odanın üst kısmında sıcaklıkların zamana göre değişimi (23 Nisan 1997)	43
Şekil 4.24	Dış ortam sıcaklığı ile güneş ışıınının zamana göre değişimi (26 Nisan 1997)	44
Şekil 4.25	Trombe duvarı cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının zamana göre değişimi (26 Nisan 1997)	44
Şekil 4.26	Ventilasyon delikleri ve kanal içerisinde sıcaklıkların zamana göre değişimi (26 Nisan 1997)	45
Şekil 4.27	Odanın orta kısmında sıcaklıkların zamana göre değişimi (26 Nisan 1997)	45
Şekil 4.28	Trombe duvarının iki yüzeyi, cam ve soğuk duvardaki sıcaklıkların 24 saat boyunca değişimleri (18 Mayıs 1997)	46
Şekil 4.29	Üst ve alt ventilasyon delikleri, iç ortam (odanın ortası) ve dış ortamdaki sıcaklıkların 24 saat boyunca değişimleri (18 Mayıs 1997)	47
Şekil 4.30	Yatay ve düşey düzleme gelen saatlik güneş ışıınının, odanın saatlik ısı kazancının ve saatlik ortalama verimin gün boyunca değişimi (18 Mayıs 1997)	48
Şekil 4.31	İçsel Rayleigh - Ra_i , Dışsal Rayleigh- Ra_E , Reynolds-Re ve Nusselt-Nu sayılarının saatlik bazda, 24 saatlik seyirleri (18 Mayıs 1997)	48
Şekil 4.32	Odanın ısı kazancının İçsel Rayleigh sayısına göre değişimi (18 Mayıs 1997)	51
Şekil 4.33	Odaya transfer edilen ısı miktarının Dışsal Rayleigh sayısına göre değişimi (18 Mayıs 1997)	51
Şekil 4.34	İçsel Rayleigh/Dışsal Rayleigh oranı ile Nusselt arasındaki ilişki (18 Mayıs 1997)	52
Şekil 4.35	Ventilasyon deliklerinin kesit alanlarının daraltılması	53
Şekil 4.36	Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının ve yatay düzleme gelen anlık güneş ışıınının gün içindeki seyri (9 Nisan 1998)	53
Şekil 4.37	Üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortamdaki sıcaklıkların ve güneş ışıınının gün boyunca değişimi (9 Nisan 1998)	54

Şekil 4.38	İçsel Rayleigh-Ra _I , Dışsal Rayleigh-Ra _E ve Nusselt boyutsuz sayılarının beşer dakikalık ortalama değerlerinin gün içindeki değişimleri (9 Nisan 1998)	54
Şekil 4.39	Üst ventilasyon deliklerindeki hız profilleri - <i>sabah, öğle, akşam</i> (9 Nisan 1998)	55
Şekil 4.40	Üst ventilasyon deliklerindeki türbülans yoğunluğu- <i>sabah, öğle, akşam</i> (9 Nisan 1998)	56
Şekil 4.41	Üst ventilasyon deliklerindeki; a)ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans; b) skewness ve kurtosis- <i>öğle</i> (9 Nisan 1998)	58
Şekil 4.42	Üst ventilasyon deliklerinde bazı noktalardaki hızların zaman serileri- <i>öğle</i> ; a) 2 noktası , b) 3 noktası, c) 5 noktası, d) 9 noktası (9 Nisan 1998)	60
Şekil 4.43	Üst ventilasyon deliklerinde Güç Spektrumu- <i>öğle</i> ; a) 3 noktası, b) 9 noktası (9 Nisan 1998)	61
Şekil 4.44	Üst ventilasyon deliklerinde Otokorelasyon Fonksiyonu Katsayısı- <i>öğle</i> ; a) 3 noktası, b) 9 noktası (9 Nisan 1998)	62
Şekil 4.45	Üst ventilasyon deliklerinde Skewness ve Kurtosis profilleri- <i>sabah</i> ; (9 Nisan 1998)	63
Şekil 4.46	Üst ventilasyon deliklerinde Skewness ve Kurtosis profilleri- <i>akşam</i> (9 Nisan 1998)	63
Şekil 4.47	Alt ventilasyon deliklerindeki hız profilleri- <i>sabah, öğle, akşam</i> (9 Nisan 1998)	64
Şekil 4.48	Alt ventilasyon deliklerinde 6 noktasındaki hızın zaman serisi- <i>öğle</i> (9 Nisan 1998)	64
Şekil 4.49	Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının ve yatay düzleme gelen anlık güneş ışıınının gün içindeki seyri (29 Nisan 1998)	65
Şekil 4.50	Üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortamdaki sıcaklıkların gün boyunca değişimi (29 Nisan 1998)	65
Şekil 4.51	Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (29 Nisan 1998)	66
Şekil 4.52	Üst ventilasyon deliklerindeki, Skewness ve Kurtosis (29 Nisan 1998)	67

Şekil 4.53	Üst ventilasyon deliklerinde 2 noktasındaki hızın zaman serisi (29 Nisan 1998)	67
Şekil 4.54	Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının ve yatay düzleme gelen anlık güneş ışınlamının gün içindeki seyri (20 Nisan 1998)	68
Şekil 4.55	Üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortamdaki sıcaklıkların gün boyunca değişimi (20 Nisan 1998)	68
Şekil 4.56	Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (20 Nisan 1998)	69
Şekil 4.57	Üst ventilasyon deliklerindeki, Skewness ve Kurtosis (20 Nisan 1998)	70
Şekil 4.58	Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının ve yatay düzleme gelen anlık güneş ışınlamının gün içindeki seyri (18 Nisan 1998)	71
Şekil 4.59	Üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortamdaki sıcaklıkların gün boyunca değişimi (18 Nisan 1998)	71
Şekil 4.60	Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (18 Nisan 1998)	72
Şekil 4.61	Üst ventilasyon deliklerindeki, Skewness ve Kurtosis (18 Nisan 1998)	73
Şekil 4.62	Ventilasyon deliğinin profil malzemeye kapatılması	74
Şekil 4.63	Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (Normal kapalı - %45)	74
Şekil 4.64	Üst ventilasyon deliklerindeki, Skewness ve Kurtosis (Normal Kapalı-%45)	75
Şekil 4.65	Üst ventilasyon deliklerinde 2 noktasındaki hızın zaman serisi (Normal Kapalı -%45)	75
Şekil 4.66	Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (Profil kapalı - %45)	76
Şekil 4.67	Üst ventilasyon deliklerindeki, Skewness ve Kurtosis (Profil Kapalı-%45)	77
Şekil 4.68	Üst ventilasyon deliklerinde 2 noktasındaki hızın zaman serisi (Profil Kapalı -%45)	77

Şekil 4.69	Tavana yakın bölgede ölçüm yapılan aralıklar	78
Şekil 4.70	Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki hız profilleri	79
Şekil 4.71	Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki türbülans yoğunluğu değerleri	80
Şekil 4.72	Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki varyans değerleri	80
Şekil 4.73	Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki Skewness değerleri	81
Şekil 4.74	Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki Kurtosis değerleri	81
Şekil 4.75	Odanın alt bölümünde, alt ventilasyon delikleri seviyesinde, ventilasyon deliğinde, odanın ortasında ve soğuk duvar yakınındaki ortalama hızlar ve türbülans yoğunlukları	82
Şekil 4.76	Odanın alt bölümünde, alt ventilasyon delikleri seviyesindeki hızların zaman serileri; a) ventilasyon deliği, b) odanın ortası, c) soğuk duvar yanı	83
Şekil 4.77	Odada ölçüm yapılan aralıklar	84
Şekil 4.78	Trombe duvarından, 30cm, 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki hız profilleri	85
Şekil 4.79	Trombe duvarından, 30cm, 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki türbülans yoğunlukları	85
Şekil 4.80	Trombe duvarından, 30cm, 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki Skewness değerleri	86
Şekil 4.81	Trombe duvarından, 30cm, 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki Kurtosis değerleri	87
Şekil 4.82	Trombe duvarından, 30cm, 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki varyans değerleri	87
Şekil 4.83	1- konumunda; a) 3 ve b) 8 noktalarındaki hızların zaman serileri	89
Şekil 4.84	1- konumunda; a) Otokorelasyon eğrileri ve b) Güç Spektrumları	89

Şekil 4.85	2- konumunda; a) 3 ve b) 7 noktalarındaki hızların zaman serileri	90
Şekil 4.86	2- konumunda; a) Otokorelasyon eğrileri ve b) Güç Spektrumları	90
Şekil 4.87	3- konumunda; a) 3 ve b) 8 noktalarındaki hızların zaman serileri	91
Şekil 4.88	3- konumunda; a) Otokorelasyon eğrileri ve b) Güç Spektrumları	91
Şekil 5.1	Problemin çözüm alanı ve ağ düzeni	98
Şekil 5.2	Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi	103
Şekil 5.3	Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda, üst ventilasyon deliğinde, CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi	103
Şekil 5.4	Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda CFD çözümü sonucunda elde edilen eş sıcaklık eğrileri	104
Şekil 5.5	Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda yapılan deneyde (9 Nisan 1998 - öğle ölçümü - Şekil 4.39), üst ventilasyon deliğinde elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)	105
Şekil 5.6	Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda yapılan deneyde (9 Nisan 1998 - öğle ölçümü - Şekil 4.39), üst ventilasyon deliğinde elde edilen Türbülans Kinetik Enerjisi profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD çözümü.)	105
Şekil 5.7	Ventilasyon deliklerinin %60 kapalı konumunda CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi	106
Şekil 5.8	Ventilasyon deliklerinin %60 kapalı konumunda, üst ventilasyon deliğinde, CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi.	107
Şekil 5.9	Ventilasyon deliklerinin %60 kapalı konumunda CFD çözümü sonucunda elde edilen eş sıcaklık eğrileri	108

Şekil 5.10	Ventilasyon deliklerinin %60 kapalı konumunda yapılan deneyde (18 Nisan 1998 - öğle ölçümü - Şekil 4.60), üst ventilasyon deliğinde elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)	108
Şekil 5.11	CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi	109
Şekil 5.12	CFD çözümü sonucunda elde edilen eş sıcaklık eğrileri	110
Şekil 5.13	Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 30cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998 - Şekil 4.78), elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)	111
Şekil 5.14	Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 30cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998, Şekil 4.82), elde edilen Türbülans Kinetik Enerjisi profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)	112
Şekil 5.15	Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 82cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998 - Şekil 4.78), elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)	112
Şekil 5.16	Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 82cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998, Şekil 4.82), elde edilen Türbülans Kinetik Enerjisi profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)	113
Şekil 5.17	Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 165 cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998 - Şekil 4.78), elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)	113
Şekil 5.18	Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 165 cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998 - Şekil 4.82), elde edilen Türbülans Kinetik Enerjisi profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)	114

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1	Modellemede kullanılan sabitler ve katsayılar	96
Tablo 5.2	Yönetici denklemlerin yapısı	99



TROMBE DUVARLI BİR PASİF GÜNEŞ SİSTEMİNDE TÜRBÜLANSLI DOĞAL TAŞINIMIN DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Geçmiş yıllarda oluşan, fosil enerji kaynaklarının birgün gelip tükeneyeceği düşüncesinin, son yıllarda gelişen çevre bilinci ile birleşmesi sonucu yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önem daha da artmıştır. Bu kaynaklar arasında, güneş enerjisi ön sıralarda yer almaktadır.

Bu çalışmada, güneş enerjisiyle ısıtılan Trombe duvarlı bir pasif güneş sistemindeki türbülanslı doğal taşınım deneysel olarak incelenmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi Kampüsü 'nde bulunan ve tek hücreli bir test odasıyla, buna bitişik bir kontrol odasından oluşan bu sistemde, ilk olarak, güneş ışıınının toplandığı yüzey olan Trombe duvarı siyah yüzeyindeki sıcaklık dağılımının gün içindeki seyri termoelemanlar yardımıyla, elde edilmiştir. Buna göre, gölgelenen bölgeler haricinde, duvarın orta kısmı en yüksek sıcaklıklara sahip olmaktadır. Diğer, günlerde yapılan deneylerde, Trombe duvarı yüzeyindeki sıcaklık dağılımı yanısıra, cam ve soğuk duvar yüzeyi ile kanal bölgesi, ventilasyon delikleri, iç ortam ve dış ortam sıcaklıkları da gün boyunca termoelemanlar yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklıklarla aynı anda, yatay düzleme gelen anlık tüm güneş ışıını da bir piranometre yardımıyla, ölçülmüştür. Sıcaklık ve güneş ışıını ölçümleri sonucunda, oda içerisinde bir sıcaklık katmanlaşması, yanında kanal ve oda arasında termosirkülasyon olayının gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, soğuk duvar sıcaklığının, gün içinde birkaç derece arttığı görülmüştür. Diğer yandan, kanal içindeki akışı karakterize eden, İçsel Rayleigh sayısı, Ra_i , ile kanal ve oda arasındaki akışı karakterize eden, Dışsal Rayleigh sayısı, Ra_E , tanımlanmış ve hesaplanmıştır. Bunlara ilaveten taşınım, ısı transferini belirleyebilmek amacıyla Nu, sayısı da hesaplanmıştır. Sonuç olarak, Trombe duvarı sisteminin, düşey düzleme gelen toplam güneş enerjisinin %10-15 'ini odaya taşınım yoluyla aktarabildiği, odanın ısı kazancının, Ra_E sayısı ile doğru orantılı, Ra_i sayısı ile ise ters orantılı olduğu, Nu'nin ise Ra_i ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür.

Odaya sıcak hava akışını dolayısıyla ısı taşınımını sağlayan üst ventilasyon delikleri ve sıcak havanın, ventilasyon deliklerinden geçtikten sonra akışa devam ettiği odadan tavana yakın bölgesindeki akış karakteristikleri Sıcak Tel Anemometresiyle yapılan ölçümlerden sonra elde edilen veriler yardımıyla tespit edilmiştir. Buna göre, üst ventilasyon deliklerindeki akış, öğle saatlerinde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Üst ventilasyon deliklerindeki akış tamamen türbülanslı olmasına karşın, alt ventilasyon deliklerinde tamamen laminar bir akış söz konusudur. Üst ventilasyon deliklerinde elde edilen hız profilleri ve türbülans değerlerinden çıkan sonuca göre, akışın ventilasyon deliğine girişte 90° 'lik dönüşten dolayı yüzeyden ayrılması nedeniyle deliğin alt yarısında bir döngü oluşmaktadır. Ventilasyon deliklerinin kesitlerinin daraltılmasıyla bu döngünün boyutları küçülmekte ve daha düzgün bir hız profili elde edilmektedir. Diğer taraftan, odanın üst kısmındaki akışa göre ventilasyon deliğinden odaya giren sıcak havanın tavana yapışık bir şekilde soğuk duvara kadar devam ettiği ve bu akış nedeniyle odanın üst kısmında büyük ölçekli bir döngü oluştuğu görülmüştür. Bu döngü tavana yakın bölgede dengesiz sıcaklık katmanlaşmasına neden olmaktadır. Yapılan modelleme ve sayısal çözüm sonucunda elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyum içinde olduğu görülmüştür.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TURBULENT NATURAL CONVECTION IN A TROMBE-WALL PASSIVE SOLAR SYSTEM

SUMMARY

In the recent years, the growing concern for the energy conservation and reducing the emission of pollutants as a consequence of utilizing fossil fuel for industrial and space heating purposes, has lead to a great interest in use of solar energy for the purpose of heating dwellings.

The designs for utilizing solar energy for space heating purposes can be divided into two main classes; *active* and *passive* designs. The former, utilizes sophisticated equipments in order to absorb, transfer, release and store energy in the required manner. These of course, tend to be relatively expensive to install and work. On the other hand, *passive* designs tend to be as simple as possible. They do this by incorporating the solar collection, and storage into the building structure and distributing the heat by natural means. A type of passive solar home heating system was first, developed by Trombe and Michel at the C.N.R.S. laboratories in France in the 1960s. Today the system is commonly called the *Trombe Wall System*.

The Trombe Wall System incorporates the use of a South facing vertical wall with a transparent (mostly glass) cover. The wall also forms part of the structural support for the building. Solar energy passes through the glass cover and is absorbed on the dark painted wall (Trombe wall) surface. The energy is trapped in a way similar to a greenhouse, as the glass serves as insulation to heat loss from the gap. The wall, which is usually of brick or concrete construction stores that heat and conducts a portion of it to the room. The vents, located at the top and the bottom of the wall are the main heat suppliers to the room by means of natural convection. Cooler room air is drawn through the bottom vents and is heated as it passes up in the duct and then delivered to the room through the top vents. This convective heat transfer process is called *Thermocirculation*, which provides a direct heat path to the room. In contrast to the upward motion between the surfaces of south facing wall and the glass cover, there is a downward motion near the surface of North wall (so called cold wall) as a result of the cooling effect. This is a complementary motion for the Thermocirculation event.

In this study, the main objective is to provide a better understanding of the Thermocirculation event by focusing on the heat transfer in the gap region and the fluid flow at the vents which are responsible for the heat supply to the room and in the upper region of the room where the hot air jet from the vents first mixes with the room air.

For this purpose, a Trombe Wall Passive System has been built at Istanbul Technical University Mechanical Engineering Department Campus. The system consists of a test cell, a controll room on the east side and a empty room on the west side. The test cell is a $3 \times 3 \text{ m}^2$ room of which the south wall is designed as Trombe wall with a glass cover. The test room has an aspect ratio of 0.9. The controll room on the east side is where all the instrumentation for the measurement system is found. The room in the west is constructed to provide symmetrical conditions, as both of the east and west walls of the test cell are inner partition walls. The ceiling, the floor and the side walls are well insulated in order to provide two dimensional flow in the room as much as possible. Otherwise, a multidimensional convection heat transfer will possibly lead to a complicated flow in the room.

Previously calibrated Cromel-Alumel type (K-type) thermocouples were provided for temperature measurement . They have been used for temperature measurements both on surface and in the ambient. All the temperature data were collected by a computer controlled data acquisition system to which all the couples are connected. Turbulent flow measurements have been performed with a Hot Wire Anemometry System. HWA system consists of a hot wire probe, a temperature probe, signal conditioning unit, main frame, calibration utility, and a data acquisition system where analog to digital conversion of the anemometry signal is being performed enabling the computer to read and store the data. The main function of the temperature probe is to compensate the changes in the velocity data due to the slight changes in the fluid temperature during the measurement process or the difference between the ambient temperatures during calibration and measurement. The signal conditioning unit is responsible for bringing the anemometer signal to a level falling between the voltage range of the data acquisition system. On the other hand, main frame serves as a communicator between the computer and the system. The calibration utility is a fully automated system which consists of a electronic unit and a flow unit. The calibration process is performed with the aid of a velocity controlled air jet supplied by the flow unit. Solar radiation measurements have also been made along with the temperature and the flow measurements. Solar radiation has been measured in units of W/m^2 by using a commercial Pyranometer.

A metallic case of 30cm wide mounted just above the glass cover, causes the upper region of the Trombe wall to be shaded throughout the day. Then, previous to the measurements, the ratio of the shaded area to the total area of the Trombe wall had been calculated for the days of proposed measurements. Thus it is possible to calculate the total solar radiation falling on the Trombe wall. As a result of the calculations, the ratio of the shaded area is within the range of %30-%70 between April, 1 and May,31. The effect of shading, can also be seen in the results of the experiment which had been performed to see the thermal response of the Trombe wall surface collecting solar energy throughout the day. Another result deduced from the experiment concerning the temperature distribution on the Trombe wall surface, is that some parts of the Trombe wall is being shaded due to the effect of frames which are the constructional support for glass cover. It has been seen that, the shaded regions are at very low temperatures in comparison with the regions receiving direct sunlight.

In order to see the temperature variations in the room, in the gap and at the vents with respect to the change in solar radiation from the sunrise to the sun set, temperature data from the measurements have been recorded and analyzed. Results obtained from the analysis of temperature data have showed that, Trombe wall , glass and the gap region responds very fast to any sudden change in the solar radiation by presenting abrupt changes in the temperature values. But, the temperature at the upper vent responds a little bit slower than that of the gap region. In contrast, the lower vent and the cold wall temperatures do not show any respond to the rapid changes in the solar radiation, but they only present a slight increase in the their temperatures throughout the day due to the solar energy collected during daylight. It has also been seen that a thermal stratification occurs in vertical direction within the room. However, no temperature gradient has been observed in the horizontal direction between the south and the north walls at any elevation.

The amount of the solar energy delivered to the room which is collected by the Trombe wall system is mostly related to the heat transfer characteristics in the gap region and of course to the optical character of the glass cover. Since the optical characteristics of the glazing is beyond the scope of this thesis and there is nothing more to do except making a selection among the available alternatives, we are focused on the heat transfer issue in the gap region. As it is mentioned before, all the fluid flow and heat transfer processes occurs completely by natural means. The solar radiation passing through the glazing and falling on the dark painted surface of the Trombe wall heats up both the wall and the glazing resulting in a considerable increase in the temperature on these surfaces. So, a temperature difference between the surfaces and the fluid filling the gap region, will in turn, lead to the buoyancy forces. These are the forces which are responsible for the fluid motion within the system. Rayleigh number is a measure of these forces which is defined as the ratio of the buoyancy forces to the viscous friction forces. In a Trombe wall system there are two distinct fluid motion. One is the Thermocirculation , which occurs between the gap and the room through the vents, and the other is a circulation motion within the gap region. The former is a result of the difference between the average temperature of the gap region and the temperature of the fluid at the lower vent; and the latter which occurs within the gap region is driven by the buoyancy forces as a consequence of the temperature difference between the glazing and the Trombe wall surfaces. The corresponding Rayleigh numbers for each type of motion are expressed as Internal and External Rayleigh Numbers. Internal Rayleigh Number, Ra_I , is responsible for the circulation within the gap region and defined as the following;

$$Ra_I = \frac{g\beta(T_d - T_c)s^3}{\nu\alpha} \quad (1)$$

Here, s , represents the width of the gap (the distance between the wall and the glazing) in meters and T is the temperature where the subscript, d , represents the wall and , c , represents the glazing.

External Rayleigh Number, Ra_E , on the other hand, is responsible for the Thermocirculation motion between the gap and the room and is defined as the following;

$$Ra_E = \frac{g\beta(T_{(d+c)/2} - T_{in})s^4}{\nu\alpha H} \quad (2)$$

where, $T_{(d+c)/2}$ representing the average temperature in the gap, and T_{in} , is for the temperature of the fluid entering the gap region at the lower vent. Here, H , stands for the height of the room. From the definition of the Internal Rayleigh number, it can be deduced that, it has a negative value whenever the temperature of the glazing is higher than that of the wall. This means that the fluid makes a clockwise circulation in conjunction with the upward motion. The vice-versa is valid for a positive value of the Internal Rayleigh number. A negative value is also possible for the External Rayleigh number. In the case, the thermocirculation motion turns to flow in the reverse direction (anti-clockwise). Besides, Ra_i and Ra_E , the Nusselt number which characterises the convection heat transfer in the gap is defined in the following form:

$$Nu = \frac{Q \cdot s}{(T_d - T_c - 2T_{in}) \cdot A \cdot k} \quad (3)$$

In this definition, Q (W), is the rate of heat delivered to the room by Thermocirculation. A (m^2) and k (W/mK) stands for the surface area of the Trombe wall and the conduction heat transfer coefficient for air respectively.

The calculated hourly average Rayleigh numbers and the Nusselt number from the measured temperature data have been plot with respect to time. It has been seen that, as the External Rayleigh number comes to a value of zero, the Nusselt number asymptotically changes to have a negative number. This represents the moment, just when the Thermocirculation motion stops and starts to flow in the reverse direction. The reverse flow brings the hotter air in the room to the gap region through the upper vents. It cools down in the gap while losing heat to the environment and passes to the room back through the lower vents. At this moment the sign of the Nusselt number is negative indicating that the direction of heat transfer is from the room to the environment. Other plots have showed that, the rate of heat delivered to the room is directly proportional to the External Rayleigh number as expected, but inversely proportional to Internal Rayleigh number. As a conclusion, it can be said that, the Nusselt number increases with the increasing circulation in clockwise direction, within the gap region which is represented by Internal Rayleigh number.

Several experiments have been performed to determine the type and the characteristics of the flow at the vents and in the upper region of the room where the hot air from the gap region flows through and mixes with the room air. In addition, the effect of variations in the cross sectional area of the vents on the flow has been investigated.

Firstly, the flow measurements have been performed both at the upper and the lower vents, three times in a day, in the morning, at the noon and in the afternoon. A Hot Wire Anemometry system has been used for the measurement. After analysing the raw data from the Hot Wire Anemometer, the average velocity profiles and Turbulent characteristics have been drawn along the height of the vents. It can easily be understood from the velocity profiles that the flow rate at the upper vents is the highest in the middle of the day. However, a high velocity gradient can be seen at the lower part of the vent cross section, which is supposed to exist due to the separation of the flow while entering the upper vent. The separation probably causes a secondary flow near the lower edge of the vent. This is somehow, confirmed by the Turbulent Intensity curves drawn in conjunction with the velocity profiles. Turbulent intensity curves drawn for the morning, noon and the afternoon measurements, peaks at the point where the velocity profile has the lowest values. Another indicator of a possible secondary flow is the time series graph of the velocity at the point where the Turbulent intensity reaches its maximum value. The situation for the lower vents is quite different, where the velocity profiles are almost the same for the three separate measurements in three different times. It is obvious from the time series graph of the velocity at the middle of the lower vent that the flow, here at the lower vent is completely laminar.

As a result from the flow measurements at the upper vents for various vent cross sectional area, it has been seen that the velocity profiles did not undergo any significant change, but the effect of the separation at the lower part of the vent almost disappears for the vent size of 40% of the real size. This can also be concluded from the Turbulent intensity curves drawn for the same experimental cases. Another try regarding the effect of any variation in the vent size, has been made for the case of vent size being 55% of the real size. In this case, measurement was made with a normal rectangular plate inserts at the vents, and another one made with an aerodynamic insert which was felt to have a more uniform flow. The result is quite satisfactory, where the flow is said to be more uniform when compared to the situation of a vent with a normal insert.

The measurements to determine the flow pattern in the upper region of the room, have given an impression that the hot air jet travels along the room following the path just beneath the ceiling. The boundary of the jet had been determined with the aid of turbulent analysis. The flow within the jet is a turbulent one. As a conclusion from the turbulent analysis, it has been felt that a recirculation flow is being formed in the middle of the room due to the effect of hot air jet flowing along the ceiling.

Finally, a numerical model has been developed and the CFD solution was made to give numerical results which should be compared to those obtained from the experimental work. As a result, it has been seen that the velocity profiles obtained from the CFD solution are in good agreement with the experimental results. But, the comparison of the turbulent quantities did not give any satisfactory result. But the secondary flow near the lower edge of the upper vent, several small recirculations at the exit of the upper vent and a great recirculation in the middle of the room could be observed from the vectorial representation of the flow in the entire system.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan bu yana barınabileceği mekanlara ihtiyaç duymuştur. İlk zamanlar, olumsuz iklim koşullarından veya doğadaki çeşitli tehlikelerden korunmak gibi doğal nedenlere dayanan bu ihtiyaç, yine doğal olarak oluşmuş bulunan mağaralar tarafından karşılanıyordu. Zaman içinde, uygarlığın gelişimiyle modern toplumsal yaşantının ihtiyaçlarına cevap verebilecek, insan yapısı mekanlar ortaya çıkmıştır.

Değişen barınak kavramı, artık, ev, işyeri, eğlence ve alışveriş merkezleri v.b. sözcükleri de içermektedir. Fakat bu mekanlarda bulunan insanların, fizyolojik açıdan kendilerini rahat hissedebilmelerinin, vücutlarının hayati fonksiyonlarının sağlıklı olarak sürdürebilmelerinin ve işyerindeki çalışma verimlerinin düşmemesinin belirli çevre şartlarının sağlanmasına bağlı olduğu görülmüştür. Bu şartlar genel olarak *konfor şartları* olarak bilinmektedir. Konfor şartlarının en önemli iki parametresi *sıcaklık* ve *nem* 'dir. Bu parametrelerin konfor şartları düzeyinde tutulabilmesi için, genellikle, yazın soğutma ve nem alma; kışın ise ısıtma ve nemlendirme işlemleri yapılmaktadır. Bu işlemleri gerçekleştirebilmek ise doğal olarak enerji tüketimiyle mümkün olmaktadır. Isıtma amacıyla, birincil enerji kaynakları (fosil yakıtlar) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu kaynakların, dünya nüfusunun artışına bağlı olarak, hızla tükendiğinin ve yanma ürünlerinin çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin farkına varan birçok ülke, kaynakları daha verimli kullanmak ve alternatif enerji kaynaklarını araştırmak yönündeki çalışmalara fon ayırmaktadır. Bu araştırmalar arasında, konfor ısıtmasında güneş enerjisinden faydalanma önemli bir yere sahiptir. Bu tür çalışmalara, güneş

enerjisi potansiyeli bakımından pek zengin olmayan bazı Avrupa ülkelerinin de önem vermeleri dikkat çekicidir.

Güneş enerjisinden faydalanma *aktif* ve *pasif* olarak iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Aktif sistemlerde, vana, pompa, v.b. tesisat ekipmanları kullanılmasına karşın, pasif sistemlerde hareketli herhangi bir eleman bulunmamakta ve enerji transferi tamamen doğal yollarla gerçekleşmektedir. Binalarda, güneş enerjisinden faydalanma ise daha çok , mimari dizayn değişiklikleriyle mümkündür. Bu değişikliklerden en yaygın olanı, binanın güney cephesinin güneş ışımasını toplayabilecek şekilde dizayn edilmesidir.

Binaların pasif sistem olarak dizayn edilmesi, konfor ısıtması amacıyla kullanılan fosil yakıt tüketiminde yüksek oranlarda tasarruf sağlayabilmektedir. Bu yüzden, bu sistemler üzerinde yapılmış ve yapılacak olan çalışmalar, fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmasına, ısınma maliyetlerinin düşmesine ve bu tür sistemlerdeki konfor şartlarının iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Bu sistemler, güneş ışımasını toplama mekanizmalarına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedirler. Bunlardan bazıları aşağıdaki şekilde sıralanabilir [1]:

- (i) Direk Kazanımlı
- (ii) Sera Isıtmalı
- (iii) Trombe/Su Duvarları

Bunlar arasında en çok bilinen sistem, 1967 'de Fransa Odeillo' da prototipini inşa eden Felix Trombe ve Jacques Michel ' in adlarına ithafen *Michel - Trombe Duvarlı Pasif Sistem* ' dir [2]. Daha çok *Trombe Duvarlı Pasif Sistem* olarak anılan bu dizayn, binanın güneyindeki siyah boyalı duvarın dış cephesinin, aralarında 15-30 cm 'lik bir boşluk (*kanal*) kalacak şekilde saydam bir malzemeyle örtülmesi ile oluşmaktadır. Buradaki saydam malzeme genellikle *cam* 'dır. Duvar yüzeyine düşen güneş ışımasını, duvar bünyesinde ısı enerji olarak depolanmakta ve güneş ışınlarına geçirgen fakat ısı transferine yalıtkan olan cam sayesinde toplanan enerjinin dışarıya kaybı büyük

ölçüde önlenmektedir. Bu enerjinin bir kısmı, iletim yoluyla duvarın iç ortama bakan yüzeyine, oradan da taşınım ile iç ortama ulaşmakta, bir kısmı ise camdan dış ortama kaçmaktadır. Geriye kalan önemli bir kısmı ise Trombe Duvarı'nın tavan ve tabana yakın bölgelerinde bulunan *Ventilasyon Delikleri* sayesinde, taşınım yoluyla odaya ulaşmaktadır. Odadan gelen soğuk hava alt deliklerden kanala girmekte ve burada doğal taşınım yoluyla duvardan ve camdan ısı geçişi sayesinde sıcaklığı artan hava yükselip üst ventilasyon deliklerinden odaya doğru akarak iç ortamı ısıtmaktadır. Oda içerisinde ve kuzey duvarına çarparak soğuyan hava düşmekte ve alt deliklerden tekrar kanala girmektedir. Anlaşılabileceği üzere, bu sistemde ısı transferi, *Termosirkülasyon* diye adlandırılan tamamen doğal yollarla gerçekleşmektedir. Üst ve alt ventilasyon deliklerine damperler yerleştirilerek termosirkülasyon olayı kontrol altında tutulabilir. Böylece günün bazı saatlerinde veya özellikle sonbahar aylarında meydana gelebilecek aşırı ısınma önlenir.

Bu sistemde, Trombe Duvarı masif olarak inşa edildiğinden, bünyesinde gün boyunca depolanan enerji sayesinde geceleri de ısıtma yapılabilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken husus; geceleri dış ortam sıcaklığının düşmesinden dolayı, daha yüksek bir sıcaklığa sahip olan Trombe Duvarı yüzeyinden atmosfere, ısıtım ve cam yüzeyinin soğuması nedeniyle oluşabilecek ters sirkülasyon etkisiyle de taşınım yoluyla ısı kaybı olmasıdır. Bunun önlenmesi için, camın önüne, hareketli, opak bir yalıtım paneli ilave edilebilir. Gündüzleri, güneş ısıtımına müsaade edecek şekilde açık olan bu panel, geceleri ısı kaybını önlemek amacıyla kapatılır.

Trombe ve Michel'den bu yana, gerçek boyuttaki sistemlerde yapılan deneysel çalışmalar genellikle ısı performans üzerinde yoğunlaşmıştır [2,3]. Diğer taraftan, kanal bölgesinin, paralel iki levha arasındaki akışa benzerliği nedeniyle, dolaylı olarak bu konuda bir çok çalışma bulunmaktadır [4].

Trombe duvarlı sistemler üzerindeki çalışmalar, genel olarak iki kategoride toplanabilir: Birincisi, Trombe Duvarı ile cam arasında kalan ve paralel iki levha arasındaki akış alanı şeklinde modellenen bölgedeki ısı transferi ve akışı ele alan çok sayıdaki teorik ve deneysel çalışmayı kapsar. Bu geometri ile çok karşılaşıldığından, kapsamı genişir: Örneğin; elektronik sistemler, güç üniteleri,

endüstriyel tesislerdeki bazı ekipmanlar, v.b. İkincisi ise tüm sistemi ele alan, 1:1 veya küçük ölçekli modeller kullanılarak, sistemin performansını ve oda içindeki akışı inceleyen araştırmalardır.

Bu bağlamda, Ormiston S.J. vd. [5] tarafından yapılan sayısal çalışmada, bir Trombe Duvarlı sistemdeki iki boyutlu ısı transferi ve akış incelenmiştir. Yüzeyin izotermal, akışın laminar olduğu kabul edilerek, sonlu-hacimler metodu ile yapılan simülasyonda, biri sadece kanal bölgesini esas alan, diğeri ise kanal ile odayı birlikte esas alan iki farklı Rayleigh sayısının, akışı ve dolayısıyla ısı transferini karakterize eden önemli parametreler olduğu; bu yüzden sistemin performansında önemli bir etkiye sahip oldukları belirtilmiştir. Özellikle, cam sıcaklığının duvar sıcaklığından düşük olduğu durumda akışın ve ısı taşınımının performans açısından kritik bir hal aldığı sonucuna varılmıştır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen verilere göre, kanal bölgesi ve sıcak hava jetinin olduğu üst kısım ve soğuk duvar yakınında akışın, genellikle türbülanslı olduğu görülmektedir. Trombe Duvarlı bir sistemdeki türbülanslı doğal taşınım, S. Uygur tarafından bir doktora çalışması kapsamında sayısal olarak incelenmiştir [6]. Bu çalışmada, standart türbülans modellerinden farklı olarak düşük Reynolds sayılarına uygun ve buoyant etkiyi de içeren bir türbülans modeli geliştirilmiştir. Standart modellere kıyasla, doğal taşınım için çok daha uygun olan bu model, geliştirilen bir bilgisayar kodunda kullanılarak, ventilasyon deliklerinin farklı yerleşimleri ve Trombe duvarı -Soğuk duvar sıcaklık farkının çeşitli değerleri için Trombe Duvarlı Pasif Sistem'in sıcaklık ve akış dağılımı elde edilmiştir. Buna göre, üst ventilasyon deliklerindeki sıcak hava jetinin oluşumu, duvar kenarlarında ve özellikle soğuk duvar yakınında dengesiz katmanlaşmadan dolayı türbülansın arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca oda içerisindeki sıcaklık dağılımına göre genel bir sıcaklık katmanlaşması görülmüştür.

Trombe Duvarı ile cam arasında kalan kanal bölgesindeki ısı transferi ve akış, sistemin genel performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığından, bu bölgeyi ele alan araştırmaların sayısı oldukça fazladır. Utzinger vd. [7] tarafından bu bölge için yapılan bir çalışmada, tek boyutlu bir matematiksel model oluşturulmuş ve bu model

kullanılarak kanaldaki kütleli akış debisindeki değişimin, ilave ısıtma gücü üzerinde herhangi bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Elde edilen veriler, kanaldaki debi değişimlerinin performans üzerinde belirgin bir farklılığa yol açmadığını göstermişlerdir. Bunun nedeni, kanaldaki debi artışı dolayısıyla Trombe duvarından havaya geçen ısı miktarı ile birlikte, camdan olan ısı kaybının da artmasıdır.

Akbari H. ve Borgers T.R. [8], kanal bölgesini, paralel iki levha arasındaki alan şeklinde modelleyerek ısı transferi ve akışı incelemişlerdir. Söz konusu çalışmada, değişik yüzey sıcaklıkları ve toplam akışkan debileri için akışı laminar kabul ederek sonlu farklar yöntemiyle yapılan sayısal çözümlemede levhalar arasındaki akış ve sıcaklık profilleri elde edilmiştir. Böylece, levhalar arasındaki sıcaklık farkı ile toplam debideki değişimlerin akış üzerindeki etkileri ve yapılan korelasyonlar aracılığıyla da, bazı performans karakteristikleri elde edilmiştir.

Paralel iki levha modelini ele alan diğer bir sayısal çalışma ise Fedorov. A.G. ve Viskanta R. [9] tarafından yapılmıştır. Levhaların asimetrik olarak ısıtıldığı ve kanala girişteki türbülans yoğunluğunun kontrol edilebildiği modelde, yönetici denklemlere türbülans terimleri de dahil edildiğinden, düşük Reynolds sayıları için geçerli olan modifiye k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Çözüm sonucunda elde edilen sıcaklık, hız ve türbülans karakteristiklerinin literatürdeki deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, kanal girişindeki türbülans yoğunluğunun artmasıyla kanaldaki türbülansa geçiş bölgesinin kanal girişine yaklaştığı tespit edilmiştir. Diğer yandan elde edilen verilerle ısı transferi ve akış korelasyonları kurulmuştur.

Trombe duvarlı sistemlerde oda içerisindeki akış, sıcaklık dağılımı ve sistemin genel performansının, büyük oranda, kanal bölgesinde akışkanın ısınmasıyla ortaya çıkan buoyant etkiyle oluşan termosirkülasyon mekanizmasına bağlı olduğu bilinmektedir. Bu mekanizmanın, daha iyi anlaşılabilmesi ve bu olayı etkileyen bazı dizayn parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla, Akbarzadeh A. vd. [3] tarafından, 1:1 ölçekli bir sistem üzerinde deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, olayın fiziğinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla ventilasyon delikleri ve kanal bölgesinde akış görüntülenmesi yapılmıştır. Elde edilen ısı transferi verileri sonucunda, kanal bölgesindeki ısı transferinin, paralel iki levha modeli ile karşılaştırıldığında,

ventilasyon delikleri nedeniyle daha düşük olduğu görülmüştür. Kanal genişliği ve ventilasyon deliklerinin yüksekliklerinin performans üzerindeki etkileri araştırıldığında, kanal genişliğinin 0.1 -0.35 m değerleri arasında performansta kayda değer bir değişiklik olmadığı, ayrıca ventilasyon deliği yüksekliklerinin ise 0.17 - 0.095 m değerleri için herhangi bir etkiye sahip olmadıkları sonucuna varılmıştır. Fakat, ventilasyon deliklerinin 0.045 m yüksekliği için yapılan ölçümlerde performansta önemli bir düşüş gerçekleştiği farkedilmiştir.

Trombe duvarlı pasif sistem içerisindeki doğal taşınımı inceleyen diğer bir deneysel çalışma ise, Warrington R.O. vd. [2] tarafından, küçük ölçekli bir modelde akışkan olarak silikon yağı kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, Trombe Duvarında eş olmayan sıcaklık dağılımının ve ventilasyon delikleri boyutlarının sıcaklık ve akış alanları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan ölçümler, kanaldaki ısı transferinin, oda içindeki ısı transferinden daha yüksek olduğunu ve ventilasyon deliklerinin kesit alanlarının genişlemesiyle ısı transferinin arttığını göstermiştir.

P.Calvet vd. [10] tarafından küçük ölçekli bir model üzerinde yapılan diğer bir deneysel çalışmada ise, akışın laminar ve daimi rejimde olduğu kabul edilerek, oda ve kanal bölgesindeki sıcaklık hız profilleri elde edilmiştir. Bu verilerden hareketle oda içerisindeki eş-sıcaklık eğrileri ve akım çizgileri elde edilmiş; oda içinde düşey doğrultuda bir sıcaklık katmanlaşması olduğu, sıcak hava jetinin etkisiyle, odanın üst kısımlarında bir döngü (vortex) oluştuğu ve ayrıca soğuk duvar yakınında akışın hız değerlerinin yükseldiği görülmüştür.

P. Ohanessian vd. [11] tarafından Avustralya şartlarında yapılan deneysel çalışmada ise; 1:1 ölçekli 4 odalı modüler bir Trombe Duvarlı sistem ile bu sistemle aynı yapısal ve ısı karakteristیکlere sahip, fakat Trombe duvarı bulunmayan 4 odalı normal bir bina yan yana inşa edilmişlerdir. Böylece, iki binanın ısı davranışlarını karşılaştırma imkanı bulunmuştur. Ayrıca, Trombe Duvarlı sistemin, değişik duvar kalınlıkları, saydam yüzeyin tek cam, çift cam olması halleri ve farklı cam kalınlıkları için sistemin 5 günlük ısı simülasyonu yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, çift cam kullanmanın küçük bir avantaj sağladığı, ilave ısıtma yapılması halinde optimum duvar kalınlığının 25 cm olduğu ve böyle bir binaya Trombe duvarı

ilave edilmesiyle %40'lık bir enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir. Duvar kalınlığı ile ilgili diğer bir tespit ise, ince duvarların iç sıcaklığın konfor değerlerinin üzerine çıkmasına sebep olabileceğidir.

A.La Pica vd. [12] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da, sürekli rejime ulaştıktan sonra, farklı kanal genişlikleri ve ısıtma gücü için yüzeylerde ve kanalda sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak Nusselt-Rayleigh ve Reynolds-Rayleigh korelasyonları çıkarılmıştır.

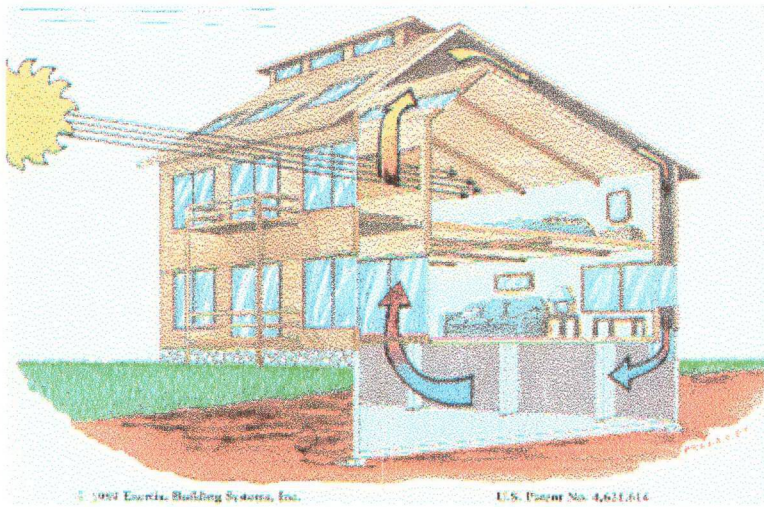
Bu çalışmaların ışığında ve özellikle son yıllarda gelişen çevre bilinci ve enerji tasarrufunun önemli gündem maddelerinden birini oluşturmasıyla birlikte, Pasif Sistem uygulamalarının yaygınlaştırılması bazı ülkelerdeki kamu ve özel kurumlar tarafından desteklenmeye başlanmıştır. Bu çerçevede, A.B.D. Enerji Bakanlığı'nın Federal Enerji Yönetimi Programı kapsamında, binalarda enerji tasarrufu için güneşten faydalanmak amacıyla bazı girişimleri oluşmuştur [13]. Bu girişimlerle, Pasif Sistem kavramının içeriğinin biraz daha genişletilerek binalar Pasif Güneş Sistemleri olarak dizayn edilirken, sadece ısıtma değil, bunun yanında, günışığıyla aydınlatma, doğal havalandırma, uygun iklimlerde serinletme, v.b. konularının da gözönüne alınması tavsiye edilmektedir. Bu programda, ayrıca, tasarımcıların Güneş Evi dizaynı sırasında özellikle dikkat etmeleri gerekli kriterler açıklamalı olarak tanımlanmıştır. Diğer yandan, yapılan istatistiklere göre; yalnızca A.B.D.'de bir milyondan fazla konut ve 17,000 civarında işyerinin Pasif Sistem dizaynına sahip olduğu belirtiliyor.

North Carolina State University 'de bulunan Güneş Evi ise pasif sistemlerin tanıtılması ve halkın bu konuda bilinçlendirilmesi amacıyla inşa edilmiş ve ziyarete açılmıştır (Şekil 1.1). Bu bina, enerji ihtiyacının %65 'ini güneşten karşılamakta ve elektrik ihtiyacının %55 'ini güneş pillerinden sağlamaktadır [14].

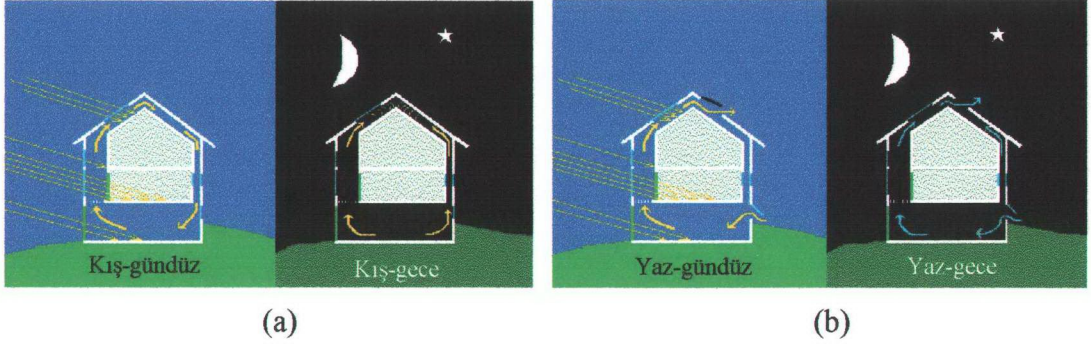


Şekil 1.1 North Carolina State University 'de bulunan Güneş Evi [14]

Pasif Sistemlerin ticari olarak uygulanmasına örnek olarak Enertia® Building System tarafından dizayn edilen güneş evi gösterilebilir [15]. Bu ev klasik pasif sistemlerden farklı olarak ahşap malzemeden yapılmış ve bina etrafında bir hava cebi oluşturacak şekilde içi içe iki hacim olarak dizayn edilmiştir (Şekil 1.2). Bu tür dizaynların diğer bir amacı ise kışın binanın ısı kaybını azaltmaktır. Bina, kışın ısıtma, yazın ise serinletme sağlayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 1.3).



Şekil 1.2 Ticari bir uygulama: Enertia® Building System [15].



Şekil 1.3 Enertia® Building System, (a) Kış çalışması, (b) Yaz çalışması [15]

Türkiye'de de bu konuda bazı araştırmalar sürdürülmektedir. İzmir Ege Üniversitesine bağlı Güneş Enerjisi Enstitüsü Binası ve Ankara Büyükşehir Belediyesine bağlı Belko tarafından inşa ettirilen Ankara Güneş Evi bu araştırmalardan iki tanesidir. İzmir'deki Güneş Enerjisi Enstitüsü sera ısıtmalı olup çok katlı ve çok hacimli bir yapıdır [16]. Hacimler arasındaki hava akışı ventilasyon delikleri vasıtasıyla sağlanmaktadır. Ankara'daki Güneş Evi ise yine sera ısıtmalı bir sistemdir. Fakat, teknik açıdan klasik pasif sistemlerden farklıdır. Bu sistemde, binanın güneyine ve kuzeyine birer sera kurulup bu seraların, geniş çaplı borularla, tavan ve tabandan birbiriyle bağlantısı sağlanmıştır. Böylece güney serasında ısınan hava borular vasıtasıyla kuzeye taşınarak bu seranın da ısıtılması sağlanmaktadır. Sonuç olarak, binanın güney ve kuzeyinde birer hava cebi oluşturularak binanın ısı kaybının azaltılması amaçlanmıştır [17].

Yukarıda özetlenen teorik araştırmaların, laboratuvar boyutundaki deneysel çalışmaların ve gerçek boyutlardaki uygulamaların hiç birinde, üst ventilasyon deliklerindeki türbülanslı akış ve sıcak hava jeti konusunda herhangi bir bilgiye rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında ise, gerçek boyutlarda inşa edilmiş böyle bir sistemin ısı performansının tayini ve üst ventilasyon deliklerinden odaya giren sıcak havanın oluşturduğu jetin ayrıntılı analizi ile *Termosirkülasyon* olayını etkileyen faktörlerin ve sonuçlarının belirlenerek olayın fiziksel temellerinin irdelenmesi amaçlanmıştır.

Bu doğrultudan hareketle, sıcaklık ölçümü ile odanın gün boyunca ısı davranışı incelenmiş; akış ölçümleri ile özellikle üst ventilasyon deliklerinde oluşan sıcak hava jetinin türbülanslı akışının ve tavana yakın bölgedeki akışın karakteristikleri elde edilmiştir. Sözü edilen sıcaklık ve akış ölçümleri, bilgisayar destekli bir *Veri Toplama ve İşleme* (data acquisition) sistemine bağlı bulunan termoelemanlar ve *Sıcak Tel Anemometresi* (Hot Wire Anemometry) yardımıyla yapılmıştır. Sıcaklık verilerinin bilgisayar yardımıyla toplanmaları ve analiz edilmeleri özel olarak hazırlanmış bir bilgisayar programı sayesinde gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, Trombe duvarı ile cam arasında ısıarak üst ventilasyon deliklerinden odaya giren sıcak havanın oda içerisindeki yayılımı ve bu yayılımın odadaki sıcaklık dağılımına etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın; çok odalı pasif güneş evlerinin tasarımında, sıcak havanın binanın en uç noktalarına ulaşabilmesi, bina içindeki sıcaklık dağılımının homojenliği ve sistemin yüksek bir performansa sahip olması için gerekli dizayn değişikliklerine ışık tutacaktır. Ayrıca, kışın, klima santralleriyle ısıtma havalandırma yapılan iç hacimlerdeki akış (zorlanmış taşınım) konusunda yapılan araştırmalar da bu çalışmanın konusu ile ilgilidir.

BÖLÜM 2

TÜRBÜLANSLI DOĞAL TAŞINIM

Yüksek sıcaklıktaki düşey bir levha, daha düşük sıcaklıktaki bir akışkan ortamına konduğu zaman, ilk başta, yalnızca *iletim* yoluyla levhadan akışkana ısı transferi gerçekleşecektir. Bunun sonucu olarak; levha yüzeyine dik doğrultuda oluşan sıcaklık gradyanı, akışkanda yoğunluk gradyanı oluşturacak ve yerçekimli bir ortamda, sıcak akışkan (daha az yoğun), kaldırma kuvvetleri nedeniyle yukarıya doğru yükselecektir. Akışkanın bu hareketine *Doğal Taşınım* adı verilmektedir [18]. Doğal taşınım bir defa başladıktan sonra, yüksek sıcaklıktaki levhadan akışkana olan ısı transferi , artık, sadece iletimle değil *taşınım* yoluyla da gerçekleşmektedir. Bu mekanizmaya *Doğal Taşınım*la *Isı Transferi* adı verilmektedir. Taşınım

Trombe duvarlı pasif sistemdeki akışkan hareketi doğal taşınım, ısı transferi ise büyük oranda doğal taşınım

la ısı transferi, çok küçük oranda ise iletimle ısı transferi yoluyla gerçekleşmektedir. Bu sistemlerde ısı kazancı kanal bölgesinde sağlanmakta ve ventilasyon delikleri vasıtasıyla oda içerisinde tamamen doğal taşınım yoluyla aktarılmaktadır. Kanal bölgesindeki sıcaklık ve hız dağılımının elde edilmesi, *paralel iki levha arasındaki akış ve ısı transferi* problemi; aynı dağılımların oda için elde edilmesi ise kanal bölgesiyle birlikte *kapalı hacimdeki akış ve ısı transferi* problemi şeklinde ele alınabilir. Ancak; bu sistemlerde enerjinin ve momentumun transportu, hız ve sıcaklık alanlarının çok küçük zaman aralıklarında salınım göstermeleri nedeniyle, daha da karmaşıktır. Bu salınımlar *türbülans* ile ilgilidir.

2.1 Türbülans

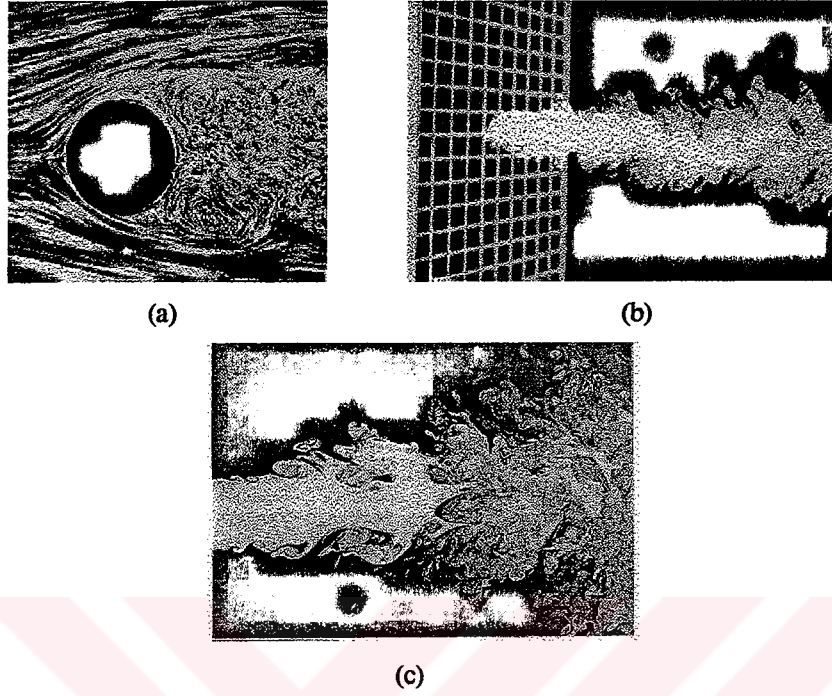
Trombe duvarlı pasif sistemde üst ventilasyon deliklerinde oluşan sıcak hava jetinin akışı türbülanslıdır. Kanal bölgesinde de, gerek alt ventilasyon deliklerinden geçiş sırasında oluşan köşe ayrılmaları, gerekse cam ile duvar arasındaki sıcaklık farkının neden olduğu hız gradyanından dolayı, türbülans görülmektedir. Bu bölgede, alt ventilasyon deliklerinden girişin laminar olmasına karşın, akışkanın, deliklerden geçtikten sonra, 90° 'lik bir açıyla yukarıya yönelmesi sonucu oluşan ikincil akışlar (kanal giriş türbülans yoğunluğu) ve kanal boyunca bazı geometrik düzensizlikler de türbülansın başlıca nedenleridir. Türbülanslı akış gözlenen diğer bir bölge ise soğuk duvar yüzeyinin hemen yakınındadır. Yapılan sayısal çalışmalarda, bu bölgede dengesiz sıcaklık katmanlaşması ve cidar sürtünmeleri sonucu türbülans oluştuğu bildirilmiştir [6].

Bugüne kadar, türbülansı açıklayabilmek için yapılan birçok tanımlamada "Türbülans, akışkanın, zaman ve uzaya göre, üç boyutlu düzensiz ve rastgele davranışlıdır" ifadeleri yer almaktadır [19, 20].

Türbülans, genellikle, akış alanında büyük hız gradyanlarının bulunması, akışkanın bir katı yüzey üzerinden veya katı bir cisim etrafından akması sonucunda oluşmaktadır. Buna göre, katı yüzeyden dolayı oluşan türbülans *Duvar Türbülansı* (wall turbulence), serbest akışta kayma gerilmeleri sebebiyle oluşan türbülans ise *Serbest Türbülans* (free turbulence) olarak iki farklı türde tanımlanmaktadır [20]. Şekil 2.1' de üç değişik türbülanslı akış örneği görülmektedir.

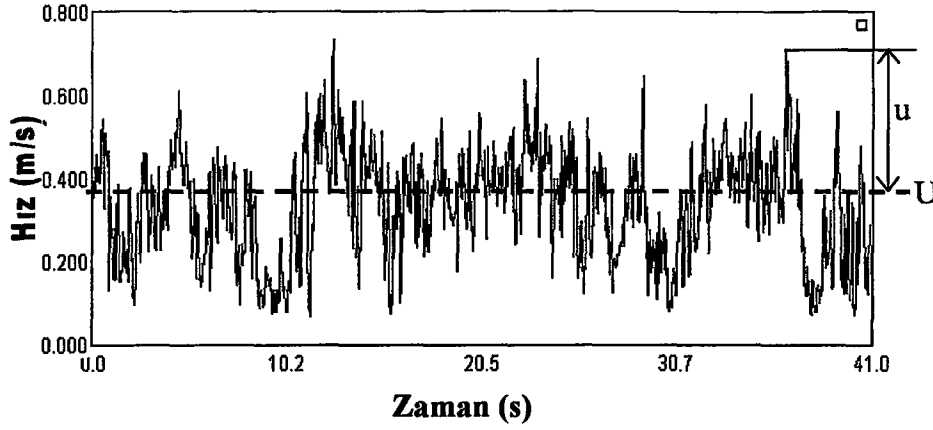
Eğer akış alanının her noktasındaki istatistiksel türbülans değerleri benzer ise, türbülansın *homojen* bir yapıda olduğundan söz edilebilir. Akış alanı içerisindeki yerel istatistiksel türbülans değerleri, her üç koordinat doğrultusunda da aynı değerlere sahip iseler, türbülans *izotropik*dir. Türbülansın izotropik yapıda olması halinde, akış alanı içerisinde ortalama hız gradyanı, dolayısıyla ortalama kayma gerilmeleri de sıfır olur. Akış alanı boyunca bir ortalama hız gradyanı varsa, türbülans *non-izotropik*dir. Bu durumda, anlık hız değerlerinin olasılık dağılımları,

Gauss Eğrisi 'nden sapar [20]. Ortalama hız gradyanının bulunduğu türbülanslı akış, *Türbülanslı Kayma Akışı* (Turbulent Shear Flow) olarak adlandırılmaktadır [20].



Şekil 2.1. Türbülanslı akışın üç farklı şekli, (a) Silindir türbülansı, (b) Grid türbülansı (c) Jet türbülansı [21]

Yıllardır, türbülans üzerine yapılan ve yapılmakta olan sayısız çalışmalara rağmen türbülans tüm ayrıntılarıyla zamana ve uzaya bağlı olarak açıklayabilecek herhangi bir matematiksel ifade bulunamamıştır. Fakat, türbülansın sergilediği düzensizlik, istatistiksel bir yaklaşımla açıklanmasını mümkün kılmaktadır. Bu nedenle, türbülansı çözebilmek için kullanılan en eski yöntem; akışı ortalama değerlerle modellemeye çalışan *istatistiksel* yaklaşımı içerir. Bu yaklaşımı savunanlar, Kolmogorov'u takip edip *kademeler teorisini* (cascades theory) temel almakta ve türbülansla *yapışık yapı* (coherent structure) gibi herhangi bir düzenin bulunabileceğini reddetmektedirler [22]. Buna göre akışı ifade eden bağımlı değişkenler, biri ortalama diğeri ise salınımı temsil eden iki bileşenden oluşmaktadırlar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Türbülanslı akışta ortalama ve salınım hızları

Bu durum hız, basınç ve sıcaklık değerleri için matematiksel olarak,

$$u = U + u'$$

$$P = \bar{P} + P'$$

$$T = \bar{T} + T'$$

şeklinde ifade edilebilir.

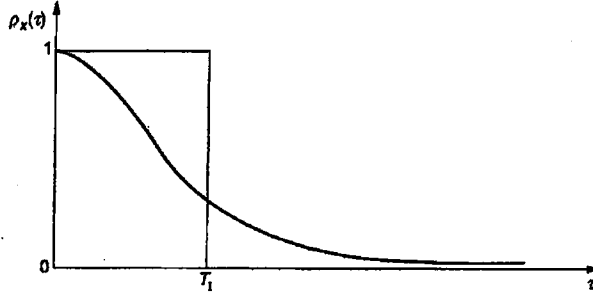
Kademeler modelinde, bu yaklaşımın temellerini oluşturacak ilk fikirlerin Richardson tarafından ortaya atıldığı bilinmektedir [22]. Buna göre, türbülans içerisinde hiyerarşik bir düzende etkileşim içinde olan farklı boyuttaki yapıların, *eddilerin*, varlığı kabul edilmektedir. Büyük boyuttaki eddiler, sahip oldukları akış enerjisini, daha küçük boyuttaki eddilere, *vorteks gerilmeleri* sayesinde aktarmakta, ve bu süreç kademeli bir şekilde en küçük eddinin enerjisinin viskoz kuvvetler sebebiyle dissipasyona uğramasıyla son bulmaktadır [23].

Türbülans enerjisinin büyük kısmına sahip olan eddilerin Integral Uzunluk Ölçeği, *Otokorelasyon Katsayısı Fonksiyonu'* nın (Autocorrelation Coefficient Function) (Şekil 2.3), zamana göre integralinin ortalama hız değeriyle çarpımı sonucu elde edilebilir [24].

Otokorelasyon katsayısı fonksiyonu,

$$\rho_u(\tau) = \frac{\overline{u(t)u(t+\tau)}}{\overline{u^2}} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 2.3 Otokorelasyon Katsayısı Fonksiyonu'nda, $\rho_x(\tau)$, Integral Zaman Ölçeğinin, T_1 , gösterilişi

Türbülans problemlerinin çözümünde karşılaşılan güçlüklerin en önemli nedeni; türbülanslı akışın rastgele, nonlinear, karakterinden kaynaklanmaktadır. Türbülanslı salınım bileşenlerinin elde edilebilmesi için, istatistiksel teoremin Navier Stokes Denklemlerine uygulanması sonucunda *kapatma problemi* (closure problem), denklemlerdeki bilinmeyen sayısının denklem sayısından fazla olması ile karşılaşılır. Bu problem, (2.2) eşitliklerinden de görülebileceği gibi, eşitliklerin sağ taraflarına gelen *Reynolds Gerilmelerinden* ($\overline{uv}, \overline{u^2}, \dots$) kaynaklanmaktadır.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2.2a)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \nabla^2 U - \left(\frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \nu \nabla^2 V - \left(\frac{\partial \overline{uv}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{vw}}{\partial z} \right) \quad (2.2b)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \nu \nabla^2 W - \left(\frac{\partial \overline{uw}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{vw}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + U \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + V \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + W \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \alpha \nabla^2 \bar{T} - \left(\frac{\partial \overline{uT'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{vT'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{wT'}}{\partial z} \right) \quad (2.2c)$$

Bilinmeyen sayısının denklem sayısına eşit olması için tek-eşitlik modeli (one-equation model), çift- eşitlik modeli (two-equation model); örneğin, karışım uzunluğu modeli, k-ε modeli; ya da ikinci - derece kapama modelleri olarak bilinen *Türbülans Modelleri* kurulmuştur. Fakat bu modeller tam anlamıyla evrensel değildir ve ancak Sayısal Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) çözümlerinde kullanılabilirler. Modellerdeki katsayılar, deneyler sonucunda bulunurlar ve geometriye, türbülansın mertebesine, hatta akışkanın fiziksel değerlerine bağlı olabilirler.

2.2 Türbülanslı Doğal Taşınım

Doğal taşınım problemlerinde, akışın hangi rejimde olduğu zorlanmış taşınımındaki *Reynolds* boyutsuz sayısına karşılık gelen *Rayleigh*, Ra , boyutsuz sayısı ile tespit edilebilmektedir [19]. *Rayleigh* sayısı, doğal taşınımındaki dominant etkinin sahibi olan kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır.

Doğal taşınımında, ilgili Ra sayısı yeterince büyük bir değere ulaştığında akış türbülanslı rejime geçmektedir. Zorlanmış akışlarda olduğu gibi, doğal akışlarda da, türbülans, yüksek hız gradyanlarının bulunması durumunda ortaya çıkmaktadır. Örneğin, klasik problemlerden biri olan düşey bir levha üzerindeki akışta veya sıcak duman gazlarının bir bacadan durgun bir ortam içerisinde yükselmesi nedeniyle oluşan akışta, büyük hız gradyanları türbülansa neden olmaktadır [20]. Doğal taşınımında, türbülans oluşumuna katkıda bulunan bir diğer olay ise dengesiz sıcaklık katmanlaşmasıdır (unstratified temperature distribution) [6]. Bu durumda , genellikle geometrik dizayn veya akış karakteri nedeniyle yüksek sıcaklıktaki akışkan soğuk akışkandan daha düşük bir seviyeye düşmekte, bu yüzden yeniden kaldırma kuvvetleri oluşmaktadır. Bunun sonucunda akış daha karmaşık bir hal almakta ve türbülansın artmasına sebep olmaktadır.

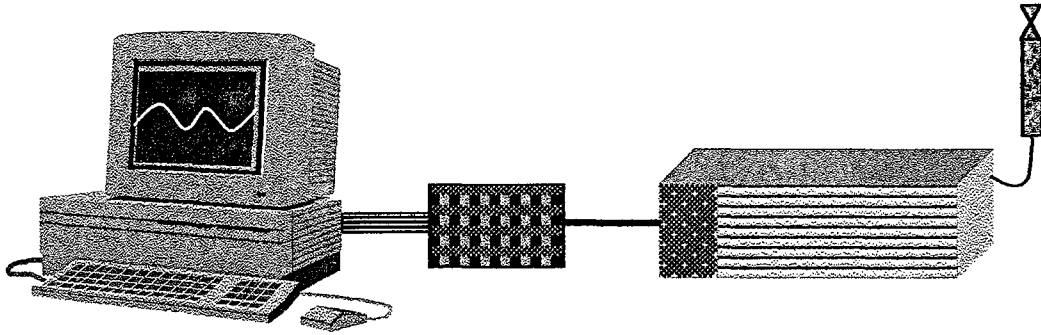
Türbülanslı doğal taşınımın yönetici denklemleri, (2.2) eşitlikleriyle aynı olup, yalnızca, (2.2b) 'deki ikinci eşitliğe, kaldırma kuvvetleri ilave edilmektedir:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mathbf{v} \nabla^2 V - \left(\frac{\partial \overline{uv}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{vw}}{\partial z} \right) - g[1 - \beta(\bar{T} - T_o)] \quad (2.3)$$

BÖLÜM 3

SICAKLIK, AKIŞ VE IŞINIM ÖLÇÜMÜ

Ölçüm cihazları, ölçtükleri fiziksel büyüklükleri (sıcaklık, hız, v.s.) genellikle elektriksel sinyallere dönüştürerek gösterirler. Bu sinyaller analog karaktere sahip olduklarından, bilgisayar tarafından algılanabilmeleri için dijital hale dönüştürülmeleri gerekmektedir. Bunun için de bir *Analog-Dijital-Dönüştürücü*'ye, (Analog-Digital-Converter, ADC) ihtiyaç duyulur. ADC, *Veri Toplama ve İşleme Sistemleri*'nin, (Data Acquisition Systems, DAS) bir elemanı olan elektronik devredir. DAS'ın üzerinde ADC'nin yanı sıra; tersi bir görevi yerine getiren bir *Dijital-Analog-Dönüştürücü* (DAC), elektriksel sinyal yükseltici, birçok sinyalin aynı anda okunmasını sağlamak amacıyla bir tarayıcı ve amaca yönelik özel bazı düzenekler de vardır. Bu sistemler, standartlara uygun olarak üretilmiş, bilgisayarla ölçüm sisteminin iletişimini sağlayan bir veya birkaç elektronik bilgisayar kartı şeklinde ticari olarak mevcut bulunan cihazlardır. Şekil 3.1. 'de bilgisayar kontrollü bir ölçüm sisteminin kuruluş prensibi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.1. Bilgisayar destekli veri toplama sisteminin şematik görünüşü

Bu çalışmada, sıcaklık ölçümleri için maksimum 40 kHz hızında, 12 bit rezolusyon ve 10 V çalışma aralığına sahip, Advantec® PCL 711 DAS ana kartı ve özellikle termoeleman sinyallerinin PCL 711 tarafından okunabilmesi amacıyla, üzerinde 16 kanallı bir tarayıcı, sinyal yükseltici ve termoeleman *soğuk uç kompanzasyonu* (Cold Junction Compensation, CJC) sağlayan bir düzenek bulunan PCL789 *Yükseltici ve Tarayıcı Destek Ünitesi* (Amplifier and Multiplexer Board) kullanılmıştır [25].

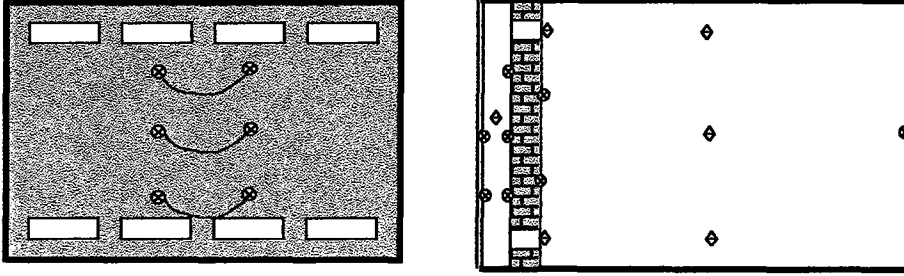
Diğer taraftan, *Sıcak-Tel Anemometresi* (Hot-Wire Anemometry) sisteminin kontrolü ve verilerin dijital hale getirilmesi için maksimum 100 kHz 'lik, 12 bit rezolusyon ve 10 V çalışma aralığına sahip, Kithley Metrabyte® DAS-1601 sistemi kullanılmıştır [26]. Bu sistemlerin bağlandığı bilgisayar, 486 DX 25 MHz işlemciye, 8 MB hafıza ve 400MB sabit diske sahiptir. Ölçümler sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve grafiklerin çizimi *Stanford Graphics V2.1c* programıyla yapılmıştır.

3.1 Sıcaklık Ölçümü

Birçok endüstriyel proseste ve bilimsel araştırmada, en önemli, dolayısıyla en çok ölçülen parametre sıcaklıktır. Sıcaklık ölçme yöntemleri arasında, en yaygını, sıcaklık değişimlerinin elektriksel karakteristikler üzerindeki etkisi esasına dayanan Termoelektrik sıcaklık ölçme yöntemleridir. Termoelektrik sıcaklık ölçme yöntemlerinden en sık kullanılanı *Termoeleman çiftleri* (Thermocouples) ile yapılan sıcaklık ölçümüdür.

Bu çalışmada, akışkan (hava) sıcaklığının ölçümü için 0.2 mm çapında Kromel-Alumel (Cr-Al: K-tipi) termoelemanlar, duvar yüzey sıcaklıklarının ölçümü için ise 0.4 mm ve 0.2 mm çaplarında, yine Kromel-Alumel termoeleman çiftleri kullanılmıştır. 0.2 mm çapındaki eleman çiftleri Teflon, 0.4 mm çaplı eleman çiftleri ise elyaf yalıtımlıdır. Akışkan sıcaklığı ölçme amacıyla kullanılan eleman uçları, noktasal olarak elektrik kaynağıyla birbirlerine tutturulmuştur. Yüzey ölçümü için kullanılan eleman uçları ise boyu en az tel çapının 20 katı olacak şekilde kıvrılarak sarmal hale getirilmiş ve böylece yüzeyde olası yüksek sıcaklık gradyanlerinin etkisi sönmülmüştür [27].

DAS sistemindeki 16 kanaldan biri güneş ışınlamını, biri dış ortam sıcaklığını, geriye kalan 14 tanesi de cam, Trombe duvarı, soğuk duvar, alt ve üst ventilasyon delikleri ile iç ortam sıcaklıklarının ölçümü amacıyla kullanılmıştır. Şekil 3.2 'de termoeleman çiftlerinin yerleştirilişi görülmektedir. Referans sıcaklığı olarak "buz kabı" yerine PCL789 kartının elektronik soğuk uç kompanzasyonundan faydalanılmıştır. Termoelemanların kalibrasyon ve hata analiz sonuçları Ek.A 'da verilmiştir.



Şekil 3.2 Termoelemanların yerleştirilişi

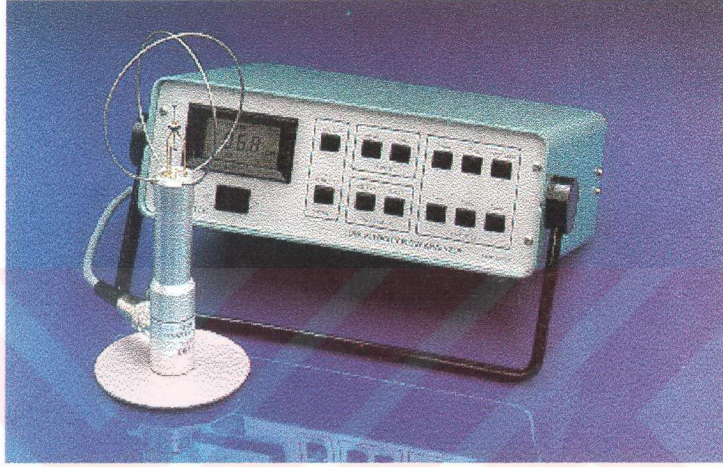
Sıcaklık değerleri, ölçülen saniyelik değişimlerin dakikalık ortalamaları hesaplanarak elde edilmiştir. Ölçüm işlemlerinin kontrolü, elektriksel değerlerin kalibrasyon bağıntıları yardımıyla sıcaklık değerlerine dönüştürülmesi ve verilerin düzenli bir şekilde kaydedilerek dosyalanması amacıyla Turbo C++ bilgisayar programlama dilinde bir yazılım hazırlanmıştır. Yüzey ve iç ortam sıcaklıkları yanında, dış ortam sıcaklığı ve güneş ışınlamı değerleri de aynı sistemle paralel olarak ölçülmüştür.

3.2 Akış Ölçümü

Akışkan hareketinin ölçümü, hacimsel veya kütleli debi ölçümü olarak ifade edilmekte, birçok endüstriyel ve bilimsel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Akış ölçümü, direkt olarak debi (Rotametre) veya hız ölçümü şeklinde gerçekleştirilebilir. Problemin değerlendirilmesinde ve çözümünde hız dağılımının önemli olması durumunda, debinin yanısıra hız değerlerini de ölçmek gerekir. Bu çalışmada, hız ölçümü için, *Düşük Hız Analizörü* (Low Velocity Flow Analyzer) ve *Sıcak Tel Anemometresi, STA* (Hot Wire Anemometry, HWA) kullanılmıştır.

Düşük Hız Akış Analizörü

Düşük Hız Akış Analizörü, sıcak film prensibine göre çalışan, bir hız ve sıcaklık transdüseri ile bir kontrol ve sinyal düzenleyici üniteden oluşmaktadır (DANTEC®) (Şekil 3.3). Bu cihaz, özellikle düşük hızlı akışın mevcut olduğu ofisler, kamu veya ticari binalar gibi iç ortamlarda hava kalitesi analizi yapabilmek amacıyla tasarlanmış ve 5cm/sn - 5m/sn hız aralığında ölçüm yapabilen bir sistemdir.



Şekil 3.3 DANTEC® Düşük Hız Akış Analizörü (Low Velocity Flow Analyzer)

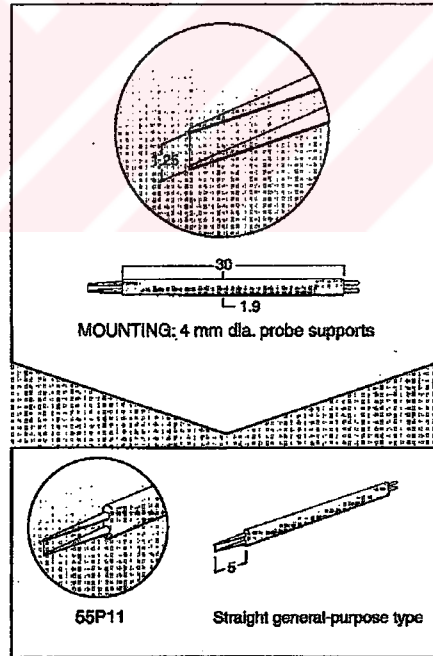
Hız ölçümleri, yön tespiti yapılamayan, küresel şekilde sarılmış iki adet sıcak film sensörü ile yapılmaktadır. Sensörlerden biri direk olarak hız ölçmekte, diğeri ise sıcaklık ölçümü yaparak, ortamdaki sıcaklık salınımlarından dolayı hız değerlerinde oluşabilecek hataların otomatik olarak düzeltilmesini sağlamaktadır. Sıcaklık ölçümleri ise hız sensörlerinin hemen altına monte edilmiş bir *Termistör* yardımıyla yapılmaktadır. Ayrıca, hız ve sıcaklığın elektriksel değerleri, kontrol ünitesinin arkasında bulunan analog çıkışlardan, bir DAS kartı aracılığı ile bilgisayara aktarılabilir. Deneyler sırasında, bu cihaz PCL 711 DAS kartının iki kanalına bağlanıp ölçüm yapılan noktadaki hız ve sıcaklık değerleri, bilgisayara aktarılmıştır.

Sıcak-Tel Anemometresi (STA)

Sıcak Tel Anemometresi'nin çalışma prensibi, akış içerisine yerleştirilmiş ve elektriksel olarak ısıtılmış sıcak bir tel veya filmde akışkana taşınım yoluyla ısı

transferi olması esasına dayanır. Sözedilen sıcak tel veya film, bir Wheatstone köprüsünün dirençlerinden birini oluşturmaktadır. Akıştaki en küçük bir değişiklik, sıcak telden gerçekleşen ısı transferini etkilemekte ve bu etki telin direnç değerinin değişmesine neden olduğundan, Wheatstone köprüsünün elektriksel dengesini bozarak, *Sabit Sıcaklık* STA sistemi (Constant - Temperature HWA) tarafından anında algılanmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan , DANTEC® 55P11 "*sub-miniature*" model sıcak tel probu 1.8 katsayılı *Isıtma Oranı* (Overheat Ratio) ile 300°C 'ye yakın bir çalışma sıcaklığında kullanılmıştır [24]. 55P11 probu, altın kaplama iki bacak üzerine kaynaklanmış bulunan 5µm çap ve 1.25 mm uzunluğa sahip Platinyum kaplı bir Tungsten telden oluşmaktadır (Şekil 3.4). Telin 1.25 mm 'lik boyu, türbülans araştırmaları sonucunda elde edilen (uzunluk/çap > 200) kriterini [24] sağlayacak şekilde tespit edilmiştir.

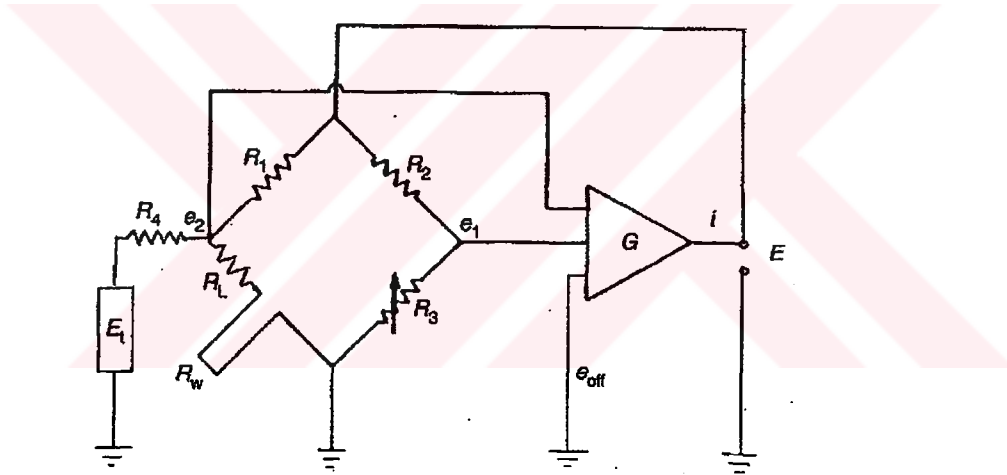


Şekil 3.4 DANTEC® 55P11 *sub-miniature* probu [28]

Sabit Sıcaklık (CT: Constant Temperature) Çalışma Modu

Bu tür sistemlerde, sıcak tel veya sıcak film sensörü sabit bir çalışma sıcaklığında, dolayısıyla sabit bir direnç değerinde tutularak, akıştaki en küçük bir değişiklik hissedilmekte ve soğuyan telin sıcaklığı otomatik olarak anında ayarlanmaktadır. Bu işlem, elektriksel devreye bir diferansiyel yükseltici ilave edilerek gerçekleştirilir. Böylece; sıcak telden geçen ısıtıcı akımın şiddeti yükseltildiğinde, akıştaki ani değişimlerin tel sıcaklığında neden olduğu ani soğumalar telafi edilir.

Şekil 3.5 'de bir Sabit Sıcaklık Anemometresinin elektriksel prensip şeması görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi sıcak tel probu Wheatstone köprüsüne direnç elemanı olarak dahil edilmiştir.



Şekil 3.5 Sabit Sıcaklık (CT) Anemometresi prensip şeması [24]

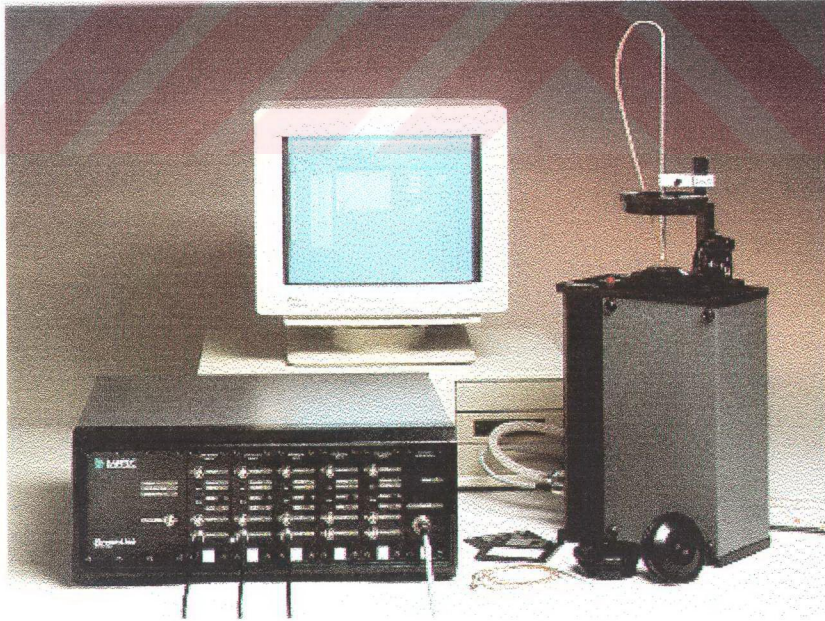
Akıшта meydana gelen herhangi bir değişiklik, R_w direncini (Sıcak tel) değiştireceğinden, köprü'nün iki ucu arasında bir e_2-e_1 gerilim farkı oluşacaktır. Bu voltaj değeri bir İşlemsel Yükselticiye (Operational Amplifier, OPAMP) gönderilmektedir. Yükselticiden çıkan ve değeri, sıcak telin direncindeki değişim miktarıyla ters orantılı olan, i akımı köprü'nün tepesinden geri beslenerek, sıcak telin sabit direnç değerine geri dönmesini sağlamaktadır. Son yıllarda, en son teknolojiyle üretilen yükselticiler çok yüksek reaksiyon hızlarına sahip olduklarından, Sabit

Sıcaklık modunda çalışan bir Sıcak Tel sensörü, çok yüksek frekanslı salınımlar haricinde sabit sıcaklıkta tutulabilmektedir. Yükselticiden çıkan sinyal gerilimi E ise, sensör direncindeki değişimle, dolayısıyla da akıştaki değişimlerle doğru orantılıdır. Diğer bir deyişle bu gerilim, ölçüm sonucu elde edilen anemometre çıkışı olmaktadır. Fakat, bu sinyalin bilgisayar tarafından algılanabilir hale getirilmesi için bazı aşamalardan geçmesi gerekmektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Sıcak Tel Anemometresi ölçme sisteminin aşamaları

STA sistemleri, piyasalarda ticari olarak mevcuttur. Bu çalışmada kullanılan DANTEC® StreamLine™, Sabit Sıcaklık modunda çalışan sistem, tamamen bilgisayar kontrollu bir Sıcak Tel Anemometresidir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 DANTEC® StreamLine™ Sıcak Tel Anemometre Sistemi

Bu sistemde, Düşük Frekans Filtreleme, sinyal düzenleyici ve DAS ayarları, sistemle birlikte satılan StreamWare™ bilgisayar yazılımı kullanılarak bilgisayar yardımıyla yapılabilmektedir.

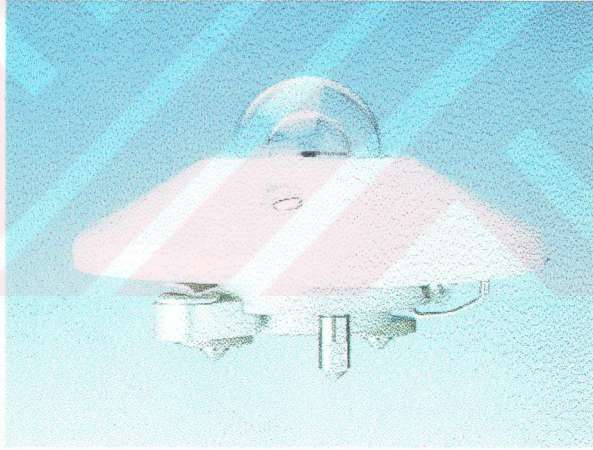
Kalibrasyon işlemi, bir rüzgar tüneline manuel ya da istenirse, sisteme entegre edilebilen bir Kalibrasyon Ünitesi yardımıyla manuel veya tam otomatik olarak yapılabilmektedir. Kalibrasyon Ünitesi, kontrol edilebilen hızlarda laminar akış sağlayan Akış Ünitesi ile bu ünitenin ana sistem ile iletişimini sağlayan bir elektronik Kontrol Ünitesi'nden oluşmaktadır. Deneylerde kullanılan kalibrasyon sonuçları Ek.B 'de verilmiştir.

Deneyler sırasında, StreamLine STA sistemden çıkan analog verilerin bilgisayar ortamına aktarılabilmesi için A/D dönüştürücü olarak Kithley Metrabyte® DAS-1601 sistemi kullanılmıştır. Fakat, burada bir doğal taşınım problemi söz konusu olduğundan, düşük frekanslı türbülans beklentisiyle, STA sisteminin Düşük Frekans Filtre sistemi 300Hz 'e ayarlanmıştır. Buna göre, *Nyquist* kuralı uyarınca, *Aliasing* [29] problemiyle karşılaşılması için DAS sisteminin veri okuma hızının STA sisteminin maksimum frekansının iki katından büyük olması (>600 Hz) gerekmektedir. Bu kriterler gözönünde bulundurularak bu çalışmada kullanılan DAS sistemi 800 Hz 'e ayarlanmıştır.

Diğer yandan, StreamLine STA sistemi bir Sabit Sıcaklık sistemi olduğundan, sensörün çalışma sıcaklığı, kalibrasyon esnasındaki ortam sıcaklığı ile 1.8 ısıtma oranı esas alınarak hesaplanmaktadır. Fakat, Pasif Sistem ortamında sıcaklıklar daha yüksek ve değişken olduğundan bu durum, okunan sinyalde hata oluşmasına sebep olacaktır. Bu problemin üstesinden gelmenin yollarından biri, akış ölçümleriyle simültane olarak sıcaklık ölçümleri yapmak ve daha sonra her bir hız değerine karşılık gelen sıcaklık değeri kullanılarak, basit bir formülasyonla hız değerlerinin düzeltilmesidir. Diğer bir yol ve bu çalışmada tercih edilen yöntem ise, her ölçmeden önce sıcak telin sıcak rezistansının, dolayısıyla çalışma sıcaklığının ortam sıcaklığına göre yeniden ayarlanmasıdır. Bu işlemin yapılması, StreamWare yazılımında, *Automatic Overheat Adjustment* (Otomatik Isıtma Oranı Ayarı) fonksiyonu olarak seçeneğe bağlı olarak sağlanmıştır.

3.3 Güneş Işınımı Ölçümü

Bu çalışmada sıcaklığın ve akışın yanısıra, anlık güneş ışıınımı değęerleri de ölçölmüştür. Böylece; Trombe duvarlı sistemin enerji girdisi de tespit edilmiştir. Güneş ışıınımının ölçölebilmesi amacıyla, bir KIPP&ZONEN® CM21 model piranometre kullanılmıştır (Şekil 3.8) [30]. Bu cihaz, yatay düzleme gelen anlık tüm güneş ışıınımının ölçölebilmesini sağlamaktadır. Cihaz, iç içe iki cam yarım kubbenin tabanına yerleştirilmiş siyah bir sensör ve basit bir elektronik devreden oluşmaktadır. Sinyal çıkışları volt cinsinden okunmakta ve imalatçı tarafından yapılan kalibrasyona göre W/m^2 birimine çevrilmektedir. Bu çalışmada, cihaz, termoelemanların bağı olduğı PCL789 tarayıcı ve yükseltici kartına bağlanmış ve cihazın verdiği sinyaller aynı yazılım vasıtasıyla sıcaklık değęerleriyle birlikte okunup otomatik olarak anlık güneş ışıınımı birimine, W/m^2 , çevrilmiştir.



Şekil 3.8 KIPP&ZONEN CM21 piranometre

BÖLÜM 4

DENEYSEL ANALİZ

4.1 Dizayn Parametreleri ve Gölge Hesabı

Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Gümüşsuyu Kampüsü 'nde bulunan Trombe Duvarlı Pasif Güneş Sistemi, Şekil 4.1 'de görülmektedir.



Şekil 4.1 Trombe Duvarlı Pasif Sistemin önden görünüşü

Bu sistem üç hacimden oluşmaktadır: Ortada, $330 \times 330 \text{ cm}^2$ taban alanına sahip *Trombe Duvarlı Test Odası*; doğu tarafında , ölçüm sistemlerinin ve bu sistemleri kontrol eden bilgisayarın bulunduğu ve $250 \times 330 \text{ cm}^2$ taban alanına sahip *Kontrol Odası* (Şekil 4.2); batı tarafında ise kontrol odasından dolayı, ısı transferi açısından

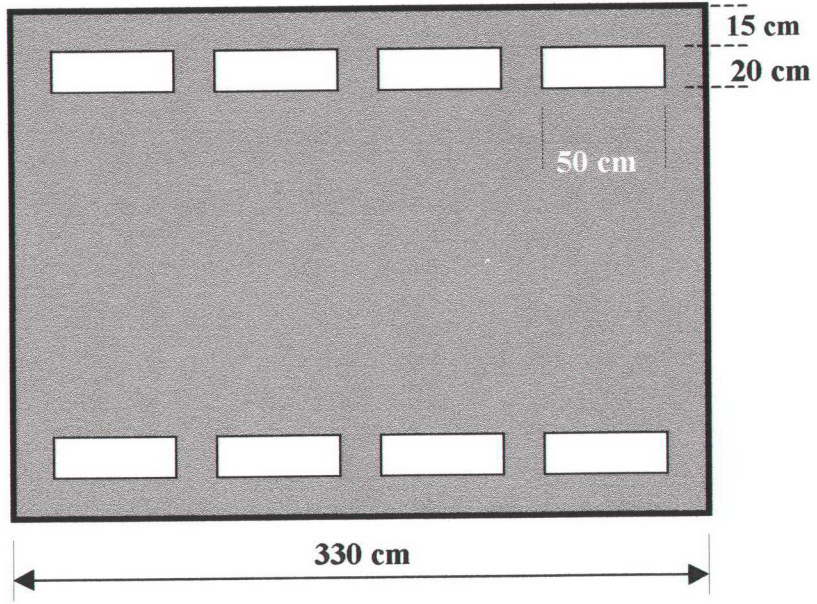
simetrikliğin bozulmaması için ilave edilmiş, $100 \times 330 \text{ cm}^2$ taban alanına sahip bir boş hacim bulunmaktadır.



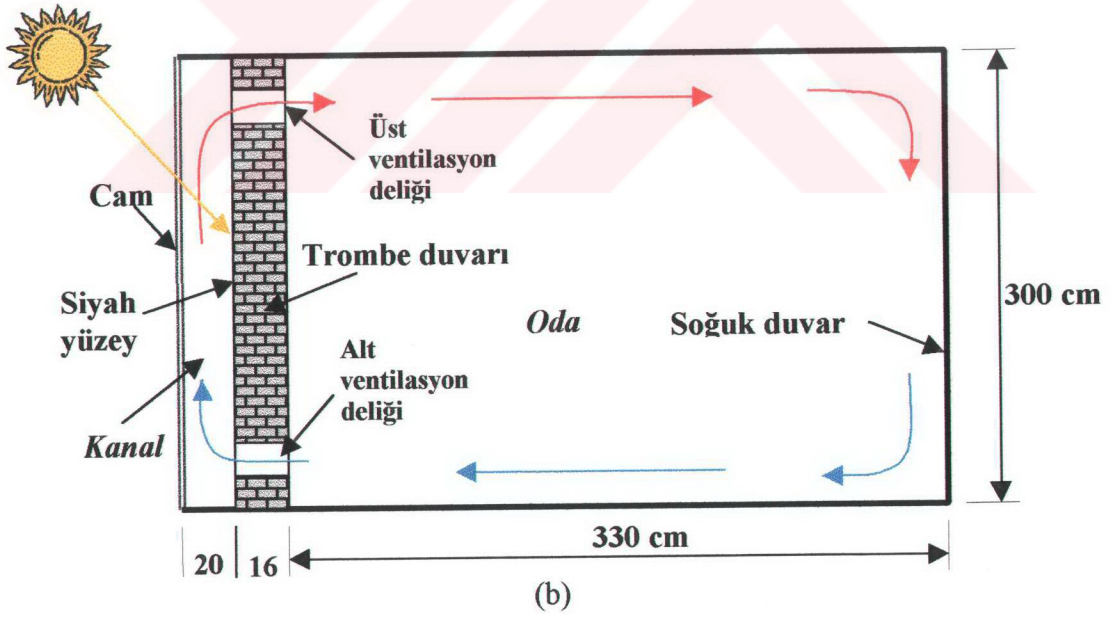
Şekil 4.2 Kontrol odası

Sistem performansının, tavan, taban ile doğu ve batı duvarlarından meydana gelebilecek ısı kayıplardan etkilenmemesi, böylece ısı transferinin iki boyutlu olarak, Cam-Trombe duvarı - Soğuk duvar arasında gerçekleşmesini sağlamak amacıyla tavan, taban, doğu ve batı duvarları yüzeyleri, 3 cm kalınlığındaki İzocam® Foamboard™ ile yalıtılmıştır.

Test odası, 330 cm genişlik, 330 cm derinlik ve 300 cm yüksekliğe sahiptir (Şekil 4.3). Trombe duvarı 16 cm kalınlığa sahiptir. Trombe duvarında, tavana ve tabana yakın bölgelerde, 50 cm genişlik ve 20 cm yüksekliğinde dörder adet ventilasyon deliği bulunmaktadır (Şekil 4.4). Trombe duvarının dışa bakan yüzeyi siyah renkte mat bir boyayla boyanmış olup, duvarın 20 cm önünde çift-camdan oluşan saydam bir örtü bulunmaktadır. Böylece; Trombe duvarlı sistemin ısı mekanizması gerçekleştirilebilmektedir.



(a)



Şekil 4.3 Test Odası 'nın şematik görünüşü; a) önden görünüş, b) yandan görünüş



Şekil 4.4 Ventilasyon deliklerinin yerleştirilişi, a) üst, b) alt

Gölge Hesabı

Pasif güneş sistemlerinin ısı kaynağı güneş olduğundan, bu sistemlerin performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri de, güneşin geliş açısına göre, herhangi bir yatay veya düşey çıkıntıdan ya da yakın çevredeki bir komşu binadan dolayı Trombe duvarı 'nın bir kısmının gölgelenmesidir. "Gölgelenme" olarak adlandırılan bu olayın sonucunda sistemin performansında bir düşüş görülebilmektedir. Bu konuda Onbaşıoğlu [31] tarafından yapılan çalışmada, gölgelenen kısımların soğuk duvar gibi davrandığı tespit edilmiştir. Fakat, buna karşın, yaz ve kış güneş geliş açıları gözetilerek yerleştirilen çıkıntılar ile kışın duvarın tamamen güneşlenmesini yazın ise büyük oranda gölgelenerek aşırı ısınmanın önlenmesi sağlanabilir.

Bu çalışmada, test odasının cam örtüsünün üst kısmında bulunan bir kepenk kasası Trombe duvarı üzerinde gölgelenmeye sebep olmaktadır. Bu kasa 30 cm 'lik bir yatay çıkıntı oluşturmaktadır (Şekil 4.5). Bundan dolayı, mevsime bağlı olarak duvar yüzeyi değişik oranlarda gölgelenmektedir.

Trombe Duvar yüzeyinin ne kadarının gölgelendiğini bulmak için literatürde verilen yöntemlerle gölge hesabı yapılmalıdır [32]. Buna göre, yatay bir çıkıntının düşey bir yüzeyde oluşturduğu gölgenin uzunluğu, e , (4.1) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$e = c \cdot \frac{\tan h}{\cos b} \quad (4.1)$$

Burada;

$$b = \gamma_s - \gamma$$

olmak üzere,

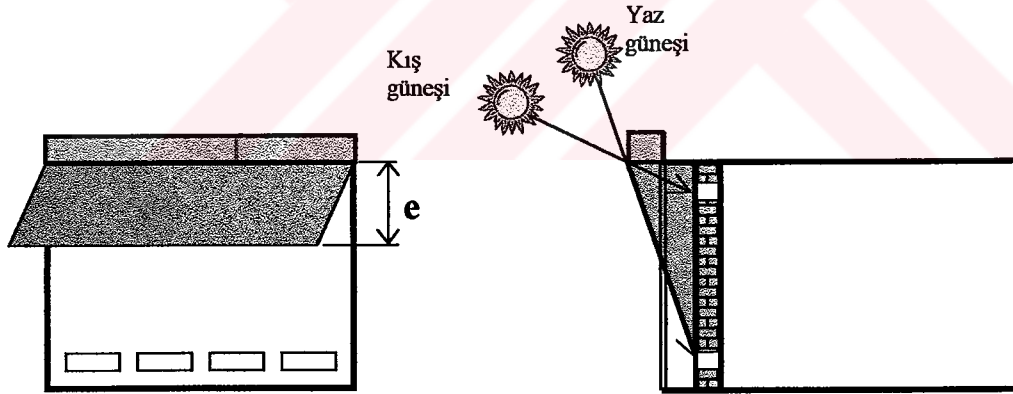
γ : yüzey azimut açısını,

γ_s : güneş azimut açısını,

c : yatay çıkıntının genişliğini,

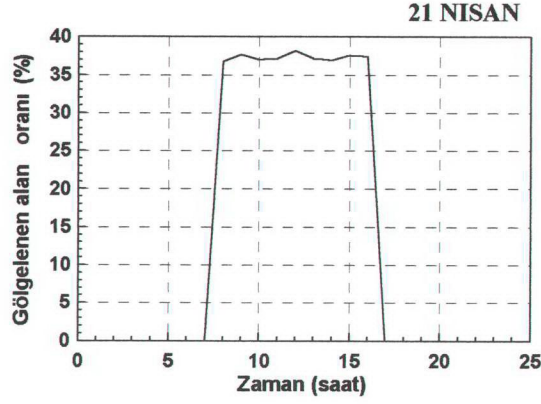
h : güneş yükseklik açısını,

ifade etmektedir.



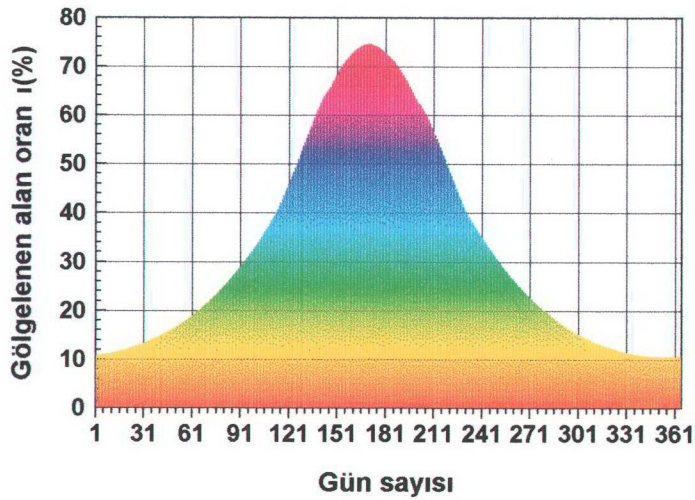
Şekil 4.5 Trombe duvarının gölgelenmesi

Hazırlanan bir bilgisayar programı ile , gölge uzunluğu, her gün, güneşlenme süresi boyunca, 365 gün için hesaplanmıştır (Şekil 4.6 ve 4.7). Ayrıca, bazı trigonometrik bağıntılardan faydalanılarak, gölgelenen yüzey alanı ve gölgelenen yüzeyin toplam yüzeye oranı da hesaplanmıştır.

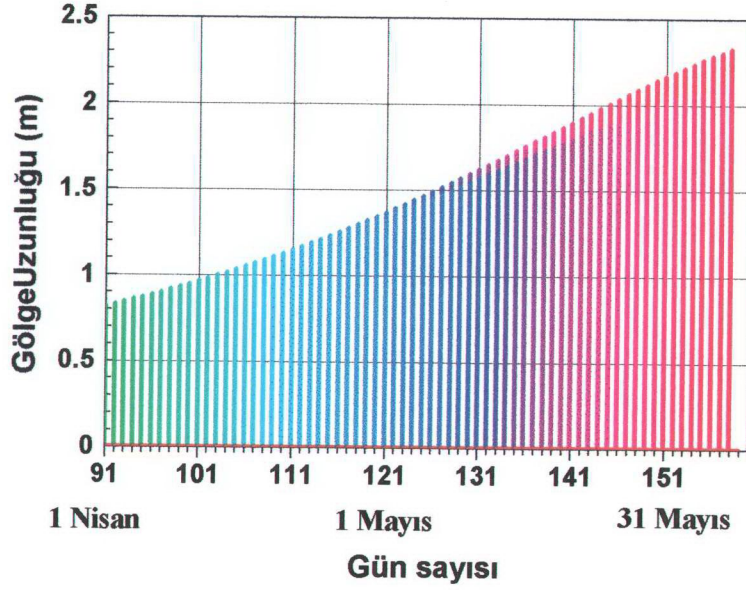


Şekil 4.6 Gölğelenen yüzeyin toplam yüzeye oranının gün boyunca değişimi

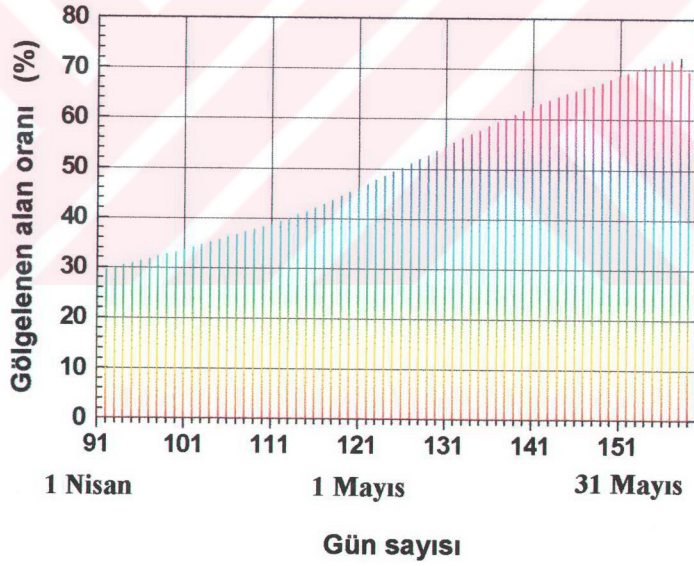
Şekil 4.6 'dan da görülebileceği gibi, gölgelenen yüzey alanı gün içinde çok az bir salınım göstererek neredeyse sabit kalmaktadır. Buna göre, yapılan ısı hesaplarında gölgelenen alanın sabit kabul edilmesi önemli bir hata getirmeyecektir. Şekil 4.7 'de ise, hazırlanan bilgisayar programı yardımıyla yapılan hesaplamalar sonucu gölgelenen yüzey alanının yıl boyunca değişimi verilmiştir. Şekilden de anlaşılabileceği üzere, yaz aylarında, gölgelenen alan en yüksek değerlere (%60-75) çıkmakta, kış aylarında ise en düşük seviyelerde (% 10-20) bulunmaktadır. Deneylerin yapıldığı Nisan ve Mayıs aylarında gölgelenme durumunu daha ayrıntılı olarak Şekil 4.8 ve gölgelenen alan oranının verildiği Şekil 4.9 'da görülmektedir.



Şekil 4.7 Bir yıl boyunca gölgelenme oranının değişimi



Şekil 4.8 Gölge uzunluğunun, e, Nisan ve Mayıs aylarındaki durumu



Şekil 4.9 Gölgelenen alanın, Nisan ve Mayıs aylarındaki durumu

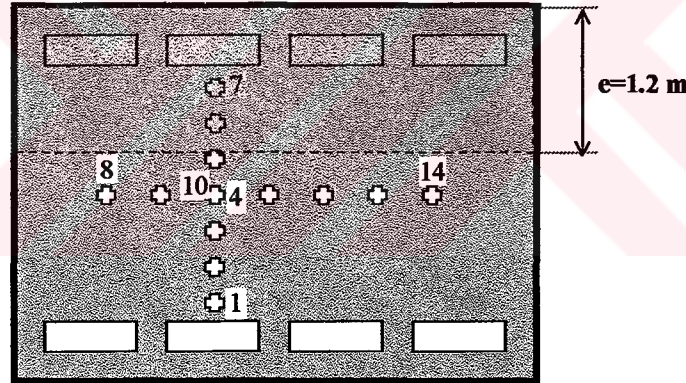
Şekil 4.7 'den de görüldüğü gibi Nisan ve Mayıs aylarında gölgelenen alanın yüksek bir gradyanle arttığı görülmektedir. Bu sonuç, Şekil 4.8 ve 4.9 da görüldüğü gibi gölgelenen alanın, iki ay gibi bir sürede iki katından fazla artması ile de doğrulanmaktadır.

4.2 Trombe Duvarının Isıl Davranışı

Sisteme güneşten gelen ısı kazanç, sistemin, Trombe duvarı yüzeyine düşen ışıınımdan sağlanmaktadır. Deneyler sırasında yapılan güneş ışıınımlı ölçümleri ise, yalnızca, yatay düzlemde birim yüzeye gelen anlık tüm güneş ışıınımlı (W/m^2) vermektedir. Burada, bazı güneş ışıınımlı bağıntıları yardımıyla düşey düzleme gelen ışıınımlı miktarı hesaplanmıştır (Bakınız Ek.C).

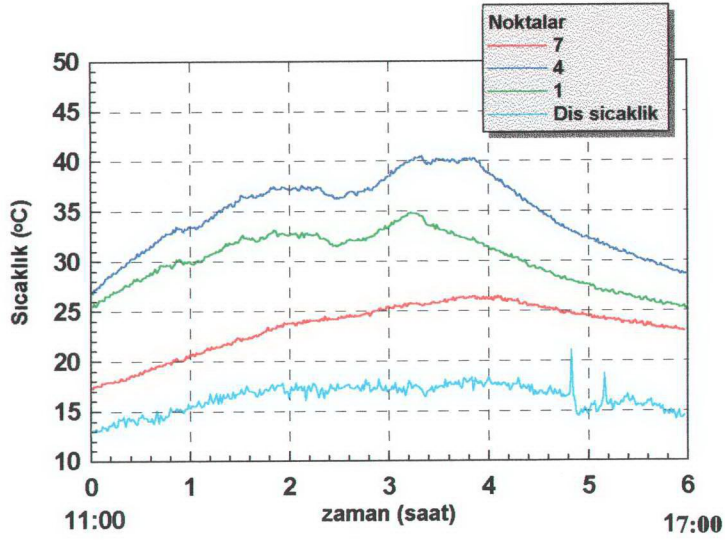
Gün boyunca değışik açılardan güneş ışıınımlı alan ve bir kısmı da gölgelenen Trombe duvarının nasıl bir ısııl davranış içine girdiğini tespit edebilmek amacıyla iki gün boyunca farklı deneyler yapılmıştır.

İlk gün (19 Nisan 1997) yapılan deneyde, biri yatay diğeri düşey olmak üzere iki çizgi boyunca (Şekil 4.10) sıcaklığın zamana göre değışimi gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10 Trombe duvarı yüzeyine termoelemanların yerleştirilişi (19 Nisan 1997)

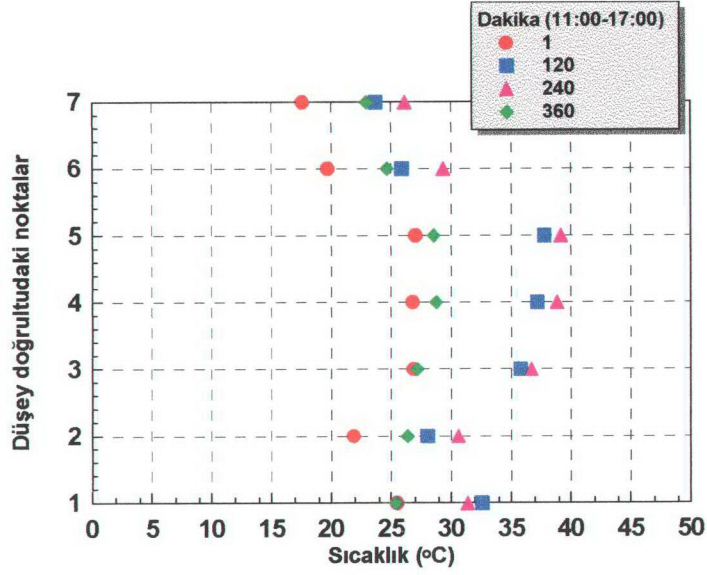
Bu değışim, düşey doğrultudaki bazı noktalar için Şekil 4.11 'de verilmiştir. Bu sonuçlar değıerlendirilmeden önce, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 'daki gölge sonuçları gözönüne alınırsa, 19 Nisan 1998 günü, Trombe duvarının üst kısmından itibaren 1.2 m' lik bir kısmının (%44 yüzey alanı) gölgelendiğı görölmektedir.



Şekil 4.11 Düşey doğrultuda, 1, 4 ve 7 noktalarındaki sıcaklıkların zamana göre değişimleri (19 Nisan 1997)

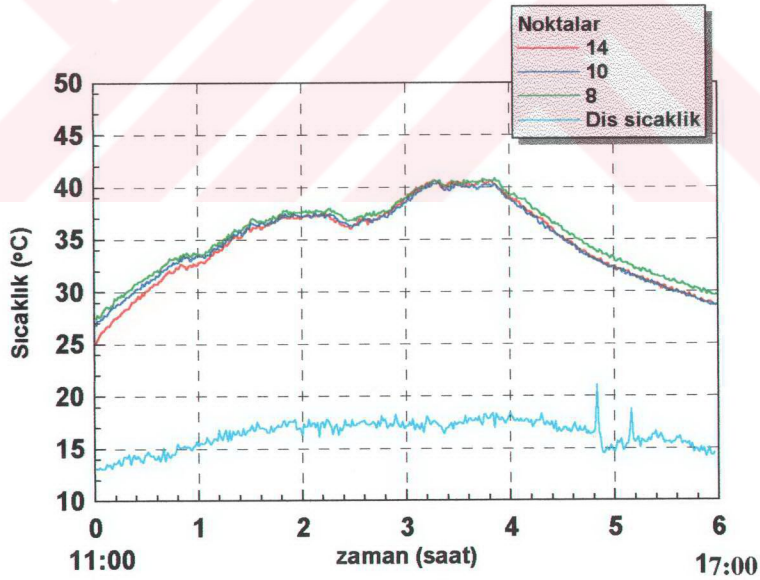
Şekil 4.11 'den de görülebileceği gibi (4) noktası direkt güneş ışınımına maruz kaldığı için, gün boyunca en yüksek sıcaklığa sahip olmuştur. Bunun yanında, (1) noktası ise sabah saatlerinde (4) noktası ile hemen hemen aynı sıcaklığa sahip olmasına rağmen günün ilerleyen saatlerinde (4) noktası ile aralarındaki sıcaklık farkı artmıştır. Bunun başlıca nedeni, alt ventilasyon deliğinden kanal bölgesine giren düşük sıcaklıktaki havanın ilk aşamada duvarın bu bölgesinden taşınım yoluyla ısı almasıdır. Duvarın üst kısmında kalan (7) noktası ise, gölgelenen bölgede bulunduğu için, diğer noktalara göre düşük bir sıcaklığa sahip olmuştur. Aşağıdan gelen ısınmış havanın etkisiyle, bu noktanın sıcaklığında saat 15:00 civarında hafif bir artış gözlenmektedir. Saat 16:00 civarında, dış ortamdaki ani sıcaklık değişiminin ise bir ölçüm hatasından dolayı kaynaklandığı söylenebilir.

Düşey doğrultudaki sıcaklık profili ise belirli zaman aralıkları için Şekil 4.12 'de verilmiştir. Şekilden de anlaşılabileceği üzere, (6) ve (7) noktaları gölgelenen bölgede bulundukları için, sıcaklıkları, diğerlerinden 10°C kadar daha düşük kalmıştır. (2) noktasının da banzer bir davranış gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni, bu noktanın, cam örtünün plastik (PİMAPEN®) yatay kayıtlarından (çerçeve) birinin gölgesinde kalmasıdır. Duvar yüzeyinde en yüksek sıcaklıklar ise (3, 4 ve 5) noktalarında, yani duvarın orta kesiminde gerçekleşmektedir.



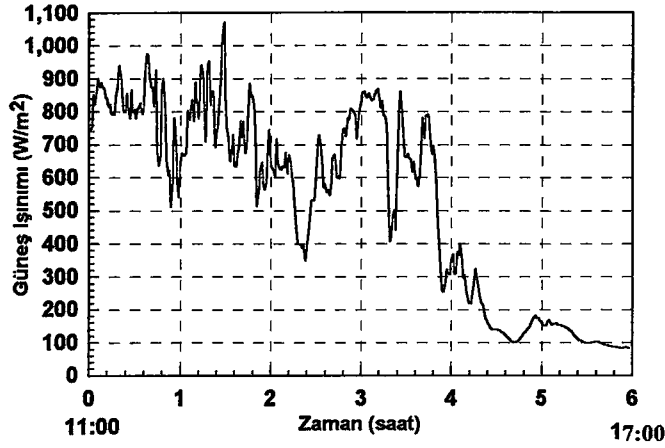
Şekil 4.12 Belirli zaman aralıklarında düşey doğrultudaki sıcaklık profilleri (19 Nisan 1997)

Yatay doğrultudaki noktaların sıcaklıklarının değer olarak gün içinde değişmelerine karşın, bu noktaların sıcaklıkları birbirlerine neredeyse eşit olmaktadır (Şekil 4.13).



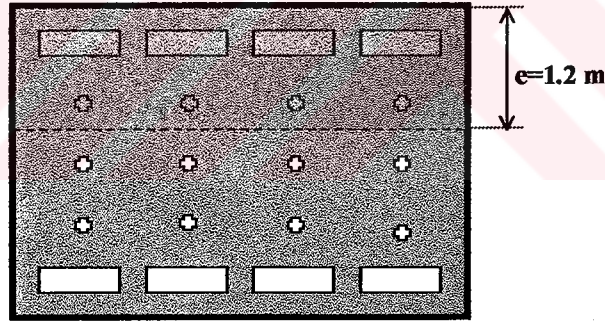
Şekil 4.13 Yatay doğrultuda, 8, 10 ve 14 noktalarındaki sıcaklıkların zamana göre değişimleri (19 Nisan 1997)

Trombe duvarındaki bu sıcaklık değişikliklerine neden olan güneş ışınımının aynı saatler arasındaki değişimi Şekil 4.14 'de verilmiştir.



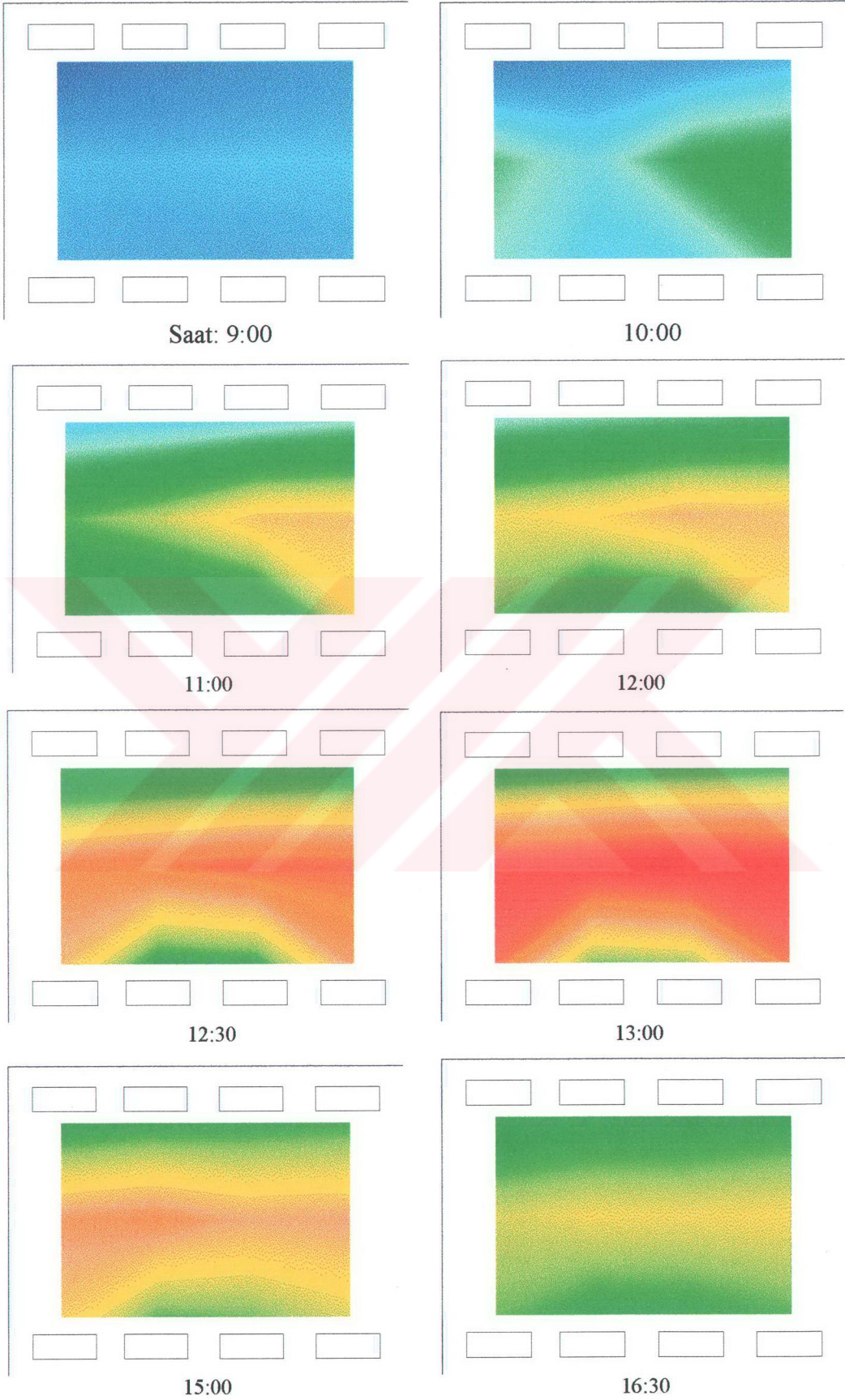
Şekil 4.14 Yatay düzlemde birim yüzeye gelen anlık tüm güneş ışıınımı
(19 Nisan 1997)

21 Nisan 1997 'de yapılan Trombe duvarı yüzey sıcaklık ölçümlerinde, sensörler duvar yüzeyine grid düzeninde yerleştirilmiş (Şekil 4.15) ve gün boyunca duvar yüzeyindeki sıcaklık dağılımının nasıl değiştiği gözlenmiştir. Bu tarihteki gölgelenme, iki gün öncekiyle hemen hemen aynı düzeyde bulunmaktadır ($e=1.2$ m veya gölgelenen yüzey alanı oranı = %44).

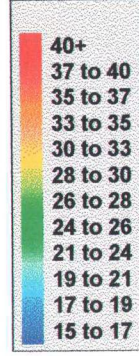


Şekil 4.15 Trombe duvarı yüzeyine termoelemanların yerleştirilişi (21 Nisan 1997)

Günboyunca, Trombe duvarı yüzeyinde yapılan sıcaklık ölçümleri sonucu elde edilen verilerden, günün belirli saatlerinde yüzeydeki sıcaklık dağılımının renk haritası çıkarılmıştır. Buna göre, Şekil 4.16 'da sırasıyla, Saat 9:00, 10:00, 11:00, 12:00, 12:30, 13:00, 15:00 ve 16:30 'de Trombe duvarı yüzeyindeki sıcaklık dağılımları verilmiştir. Şekil 4.16 'deki grafikler için Şekil 4.17 'de verilen renk skalası geçerlidir.



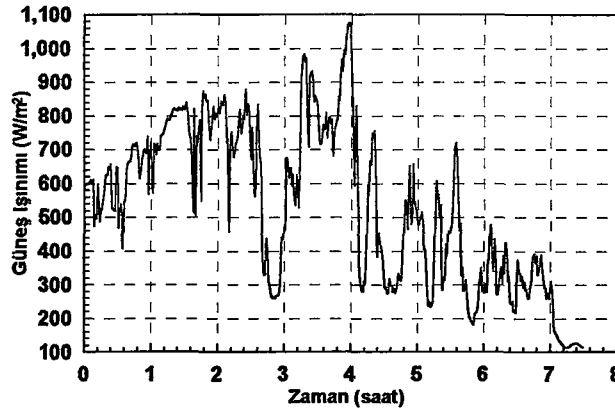
Şekil 4.16 Trombe duvarı yüzeyindeki sıcaklık dağılımının gün içindeki seyri
(21 Nisan 1997)



Şekil 4.17 Şekil 4.16 için geçerli olan renk skalası (°C)

Şekil 4.16'daki grafikler, sırayla ele alındığı zaman, saat 9:00'da yüzeydeki sıcaklığın neredeyse homojen bir dağılıma sahip olduğu, bununla birlikte, üst bölgenin özellikle sol kısmının, diğer bölgelere göre çok az bir miktar daha düşük sıcaklıkta olduğu görülmektedir. Bunun en önemli sebebi, üst kısmın, sürekli gölge altında bulunmasıdır. Gün ilerledikçe, duvar yüzeyi sağ kenarından ısınmaya başlamakta (saat 10:00) ve ısınma, orta bölgeyi takip ederek sola doğru yayılmaktadır (saat 11:00, 12:00 ve 12:30). Saat 13:00 'de sıcaklık dağılımı, simetrik bir hal almakta; fakat, alt ventilasyon deliklerinden ortadaki iki tanesinin üst kısmının, plastik pencere kayıtları nedeniyle gölgelendiği görülmektedir. Diğer taraftan, duvarın orta kısmının en yüksek sıcaklığa ulaştığı görülmektedir. Öğleden sonra (saat 15:00, 16:30), duvarın sağ taraftan başlamak üzere yavaşça soğuduğu ve saat 16:30 'da, orta kısım biraz daha yüksek sıcaklıkta olmak üzere, sıcaklık dağılımının hemen hemen homojen bir hal aldığı söylenebilir. Bununla birlikte, gün boyunca, üst kısımdaki gölgelenmenin etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Sonuç olarak, ısınma ve soğuma süreçlerinin kenarlardan başlaması, güneşin doğudan batıya hareketi ve cam örtü üzerindeki çerçevelerin gölgelenme etkisiyle, üstteki geniş ve alttaki küçük bölge düşük sıcaklıklarda kalmaktadır.

Şekil 4.18'de, aynı gün güneş ışınımının durumu görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi, parçalı bulutlu bir gün olmuştur.



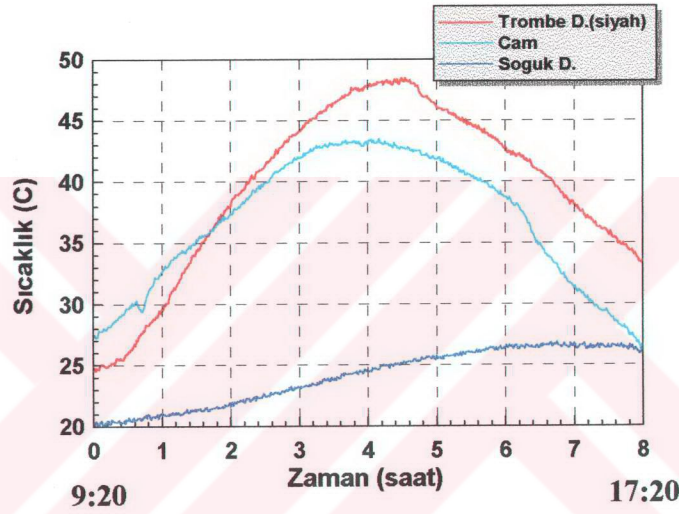
Şekil 4.18 Yatay düzlemde birim yüzeye gelen anlık tüm güneş ışıını (21 Nisan 1997)

4.3 Odaanın Isıl Davranışı

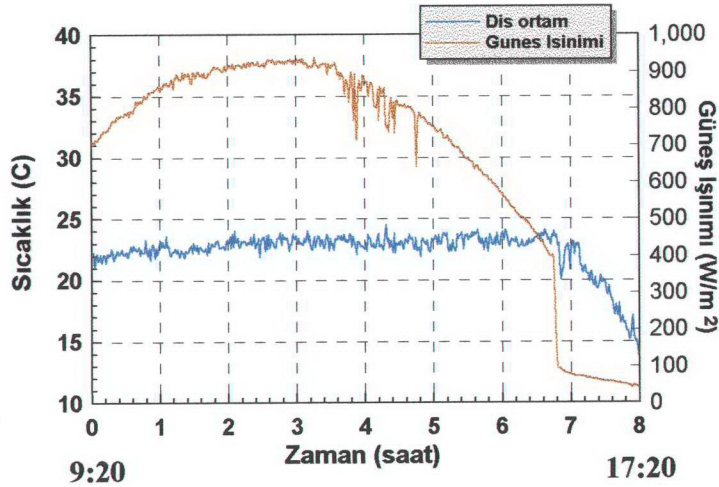
Trombe duvarının siyah yüzeyi ve cam örtü, üzerlerine düşen güneş ışıını sayesinde ısınarak sıcaklıkları artmaktadır. Yüzey sıcaklıklarının artmasıyla birlikte, kanal bölgesinde başlayan doğal taşınım güneşten gelen enerjiyi ventilasyon delikleri aracılığıyla odaya aktarmaktadır. Böylece, termosirkülasyon nedeniyle, oda içerisindeki ve diğer duvar yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinde değişimler oluşmaktadır. Bu değişimleri tespit edebilmek amacıyla, 23 ve 26 Nisan 1997 tarihlerinde, oda içinde, yüzeylerde, ve dış ortamda sıcaklık ölçümleri ile birlikte anlık tüm güneş ışıını da ölçülmüştür.

Şekil 4.19' da 23 Nisan 1998 tarihinde, Trombe duvarı cam ve soğuk duvar yüzeylerindeki sıcaklıkların gün içindeki değişimleri verilmektedir. Şekil 4.20 'de ise aynı saatler arasında, dış ortam sıcaklığı ile yatay düzleme gelen anlık tüm güneş ışıınının değişimi görülmektedir. Burada üzerinde durulması gereken nokta; dış ortam sıcaklığı gün boyunca yaklaşık olarak sabit kalırken, Trombe duvarı ile cam yüzeylerinin 20°C 'lik bir salınım yapmaları, soğuk duvarın sıcaklığındaki salınımın ise en fazla 5-6°C olmasıdır. Ayrıca, güneş ışıını eğrisi ile Trombe duvarı ve cam sıcaklık eğrilerinin tepe noktaları arasında yaklaşık 1-1.5 saatlik bir faz farkı bulunması da dikkat çekicidir. Soğuk duvar sıcaklığının ise çok daha büyük bir faz farkına sahip olduğu (4-5 saat) görülmektedir. Bunun nedeni, soğuk duvarın, termosirkülasyondan dolayı, taşınım yoluyla ısıtılmasıdır.

Şekil 4.19'da verilen sıcaklık değişimlerinde dikkat edilmesi gereken çok önemli diğer bir nokta ise, Trombe duvarı ile cam arasındaki sıcaklık farkının pozitif ve negatif yönlerde değişim göstermesidir. Günün ilk saatlerinde, güneş ışınları ilk önce cam yüzeyine düştüğünden ve camın ısı kapasitesi duvarından çok daha düşük olduğundan, ilgili şekilden de görülebileceği gibi, cam sıcaklığı duvar sıcaklığından daha yüksek olmaktadır. Gün ilerledikçe, Trombe duvarı daha çok ısınarak sıcaklığı cam sıcaklığının üzerine çıkmakta ve uzun bir süre durum böyle devam etmektedir. Bu durum, büyük ölçüde, güneş ışınımının sürekliliğine, havanın bulutlu olup olmamasına bağlıdır.

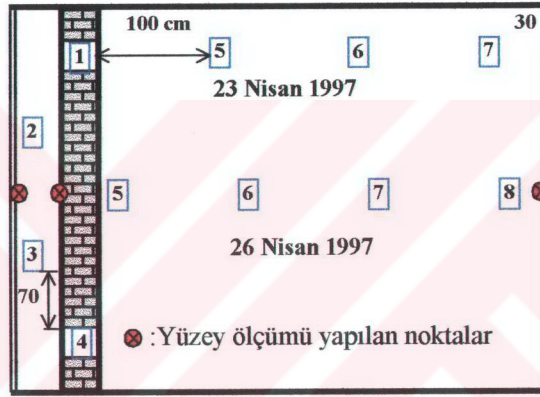


Şekil 4.19 Trombe duvarı cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının zamana göre değişimi (23 Nisan 1997)

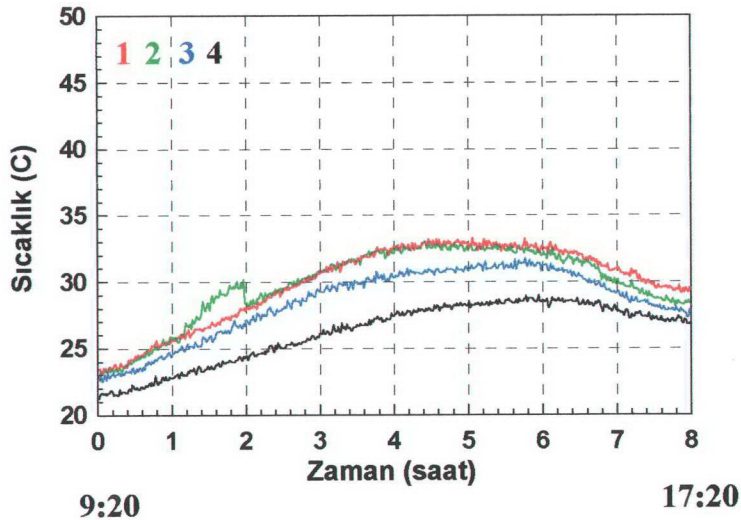


Şekil 4.20 Dış ortam sıcaklığı ile güneş ışınlamının zamana göre değişimi (23 Nisan 1997)

Termosirkülasyon olayı sırasında, havanın alt ventilasyon deliklerinden kanal bölgesine girmesi ve burada doğal ısı taşınımı yoluyla duvar ve camla ısı alışverişinde bulunması ve üst ventilasyon deliklerinden, ısınmış olarak, odaya girmesi, bu olayın ısıtma evresini açıklamaktadır. Isıtma evresinde bahsedilen noktalardaki (Şekil 4.21) sıcaklıkların zamana göre değişimleri Şekil 4.22 'de görülmektedir. Burada belirtilmesi gerekli önemli bir husus, kanal boyunca akışkan sıcaklığında (2 ve 3 noktaları) çok az bir değişim gerçekleştiği, kanalın üst kısmıyla üst ventilasyon deliğindeki sıcaklıkların, üst bölgedeki gölgelenme dolayısıyla birbirlerine eşit olduğudur. Ayrıca, en yüksek sıcaklık farkı ise, beklendiği gibi üst ve alt ventilasyon delikleri arasında bulunmaktadır.

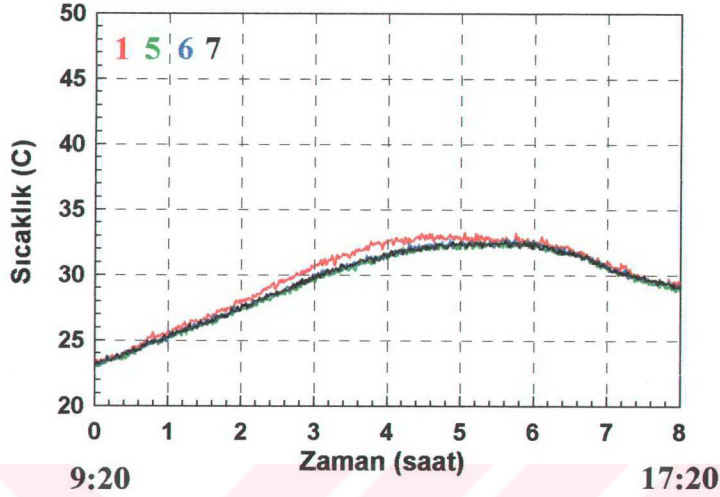


Şekil 4.21 Oda ve kanal içerisinde sıcaklık ölçümü yapılan noktalar



Şekil 4.22 Ventilasyon delikleri ve kanal içerisinde sıcaklıkların zamana göre değişimi (23 nisan 1997)

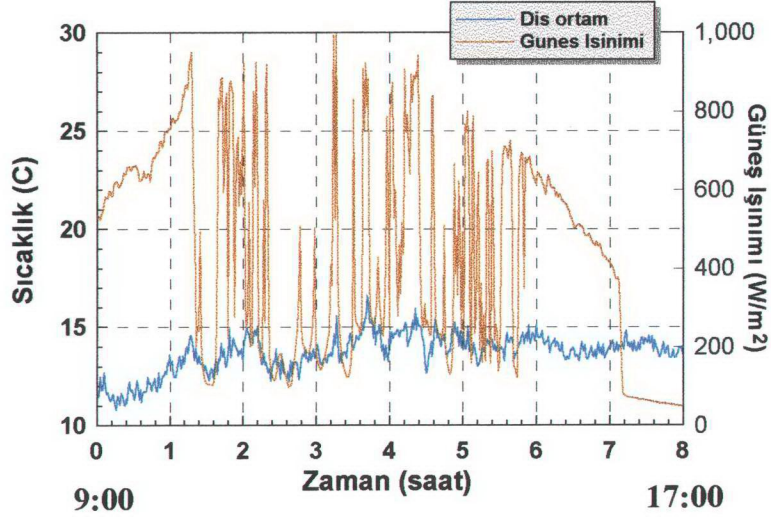
Odanın üst kısmındaki (Şekil 4.21) sıcaklıklara bakıldığında (Şekil 4.23), üst ventilasyon deliğinden soğuk duvarın yakınına kadar kalan bölgede (1,5,6,7 noktaları), sıcaklıkların hemen hemen birbirlerine eşittir.



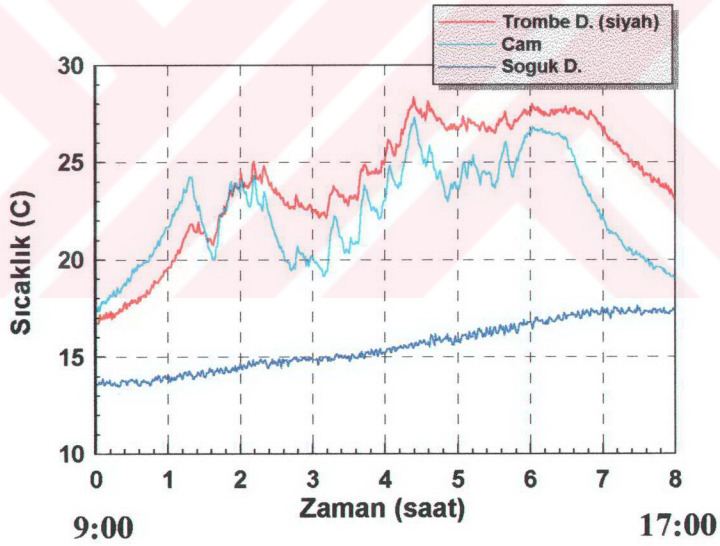
Şekil 4.23 Odanın üst kısmında sıcaklıkların zamana göre değişimi (23 nisan 1997)

26 Nisan 1997 tarihinde yapılan deneyde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Fakat, bu tarihte hava parçalı bulutlu olduğundan, güneş ışınlamındaki salınımlara bağlı olarak gerçekleşen sıcaklık salınımları belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.24'den de görülebileceği gibi saat 10:15 civarında, havanın bulutlanmasından dolayı ölçülen anlık güneş ışınlamı miktarında büyük salınımlar başlamış ve bu durum akşam 15:00'e kadar devam etmiştir. Buna bağlı, olarak dış ortam sıcaklığında da 3-4°C 'lik salınımlar gözlenmektedir. Bu durumdan en çok etkilenen elemanların ise cam ve Trombe duvarı olduğu Şekil 4.25 'te açıkça görülmektedir. Özellikle camın, ısıl ataletinin düşüklüğü nedeniyle, duvara göre daha büyük salınımlarla tepki verdiği görülmüştür. Diğer taraftan, soğuk duvar duvarın bu olaydan hiç etkilenmediği ve bir önceki deneydekine (23 Nisan1997, Şekil 4.19) benzer bir davranış sergilediği söylenebilir.

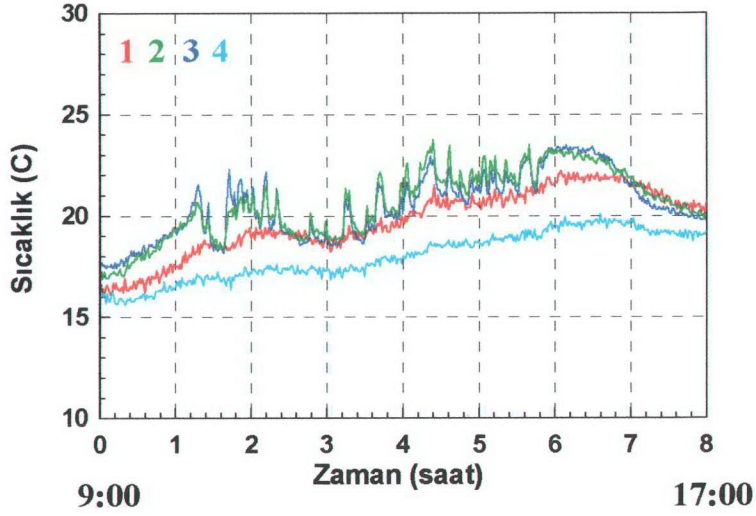


Şekil 4.24 Dış ortam sıcaklığı ile güneş ışınlamının zamana göre değişimi (26 Nisan 1997)



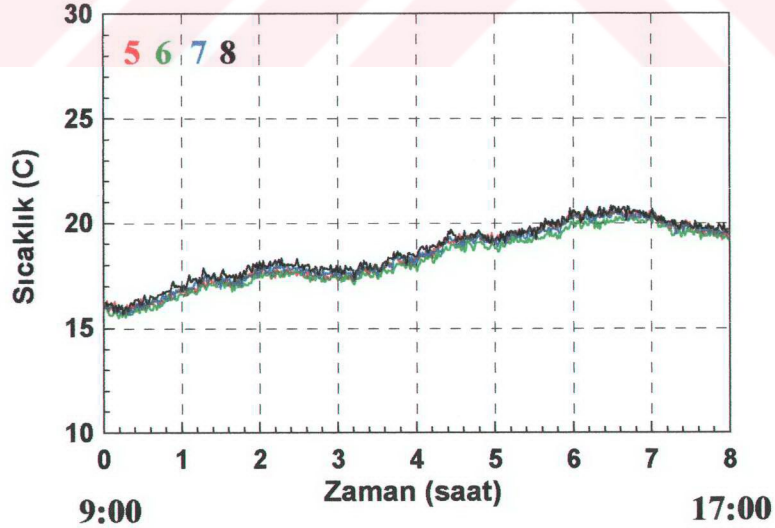
Şekil 4.25 Trombe duvarı cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının zamana göre değişimi (26 Nisan 1997)

Ventilasyon delikleri ve kanal bölgesine bakıldığında ise (Şekil 4.26, ölçüm yapılan noktalar için Şekil 4.21), kanaldaki akışkan sıcaklıklarının, güneş ışınlamındaki değişimlerden etkilendikleri görülmektedir. Üst ventilasyon deliğindeki sıcaklık değerlerinde de bu etki, daha az olmakla birlikte hissedilebilmektedir. Güneş ışınlamındaki değişimin etkisi, alt ventilasyon deliğinde çok azdır.



Şekil 4.26 Ventilasyon delikleri ve kanal içerisinde sıcaklıkların zamana göre değişimi (26 nisan 1997)

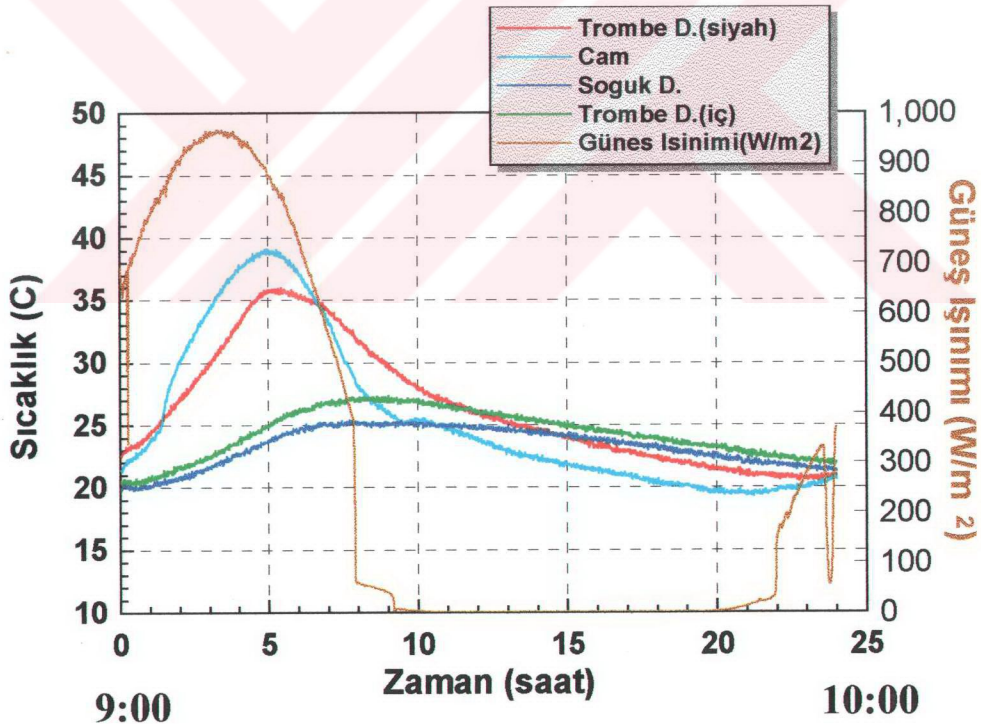
Diğer taraftan odanın orta kısmında, yapılan ölçümlerde (Şekil 4.27, Şekil 4.19) yatay doğrultuda sıcaklıkların birbirlerine eşit olduğu sonucu elde edilmiştir. Buna göre, bir önceki deneyden de elde edilen verilere göre (Şekil 4.22), Trombe duvarının iç yüzeyi ile soğuk duvar arasında yatay boyunca sıcaklıklar sabit kalmaktadır.



Şekil 4.27 Odaanın orta kısmında sıcaklıkların zamana göre değişimi (26 nisan 1997)

Sistemin ısı performansının tespit edilebilmesi amacıyla 18 Mayıs 1997 tarihinde saat 9:00 'dan 19 Mayıs 1997 saat 9:00 'a kadar yapılan 24 saatlik ölçümler sonucu bazı yüzeylerdeki sıcaklık değerleri Şekil 4.28 'de verilmiştir. Şekilde ısıtım

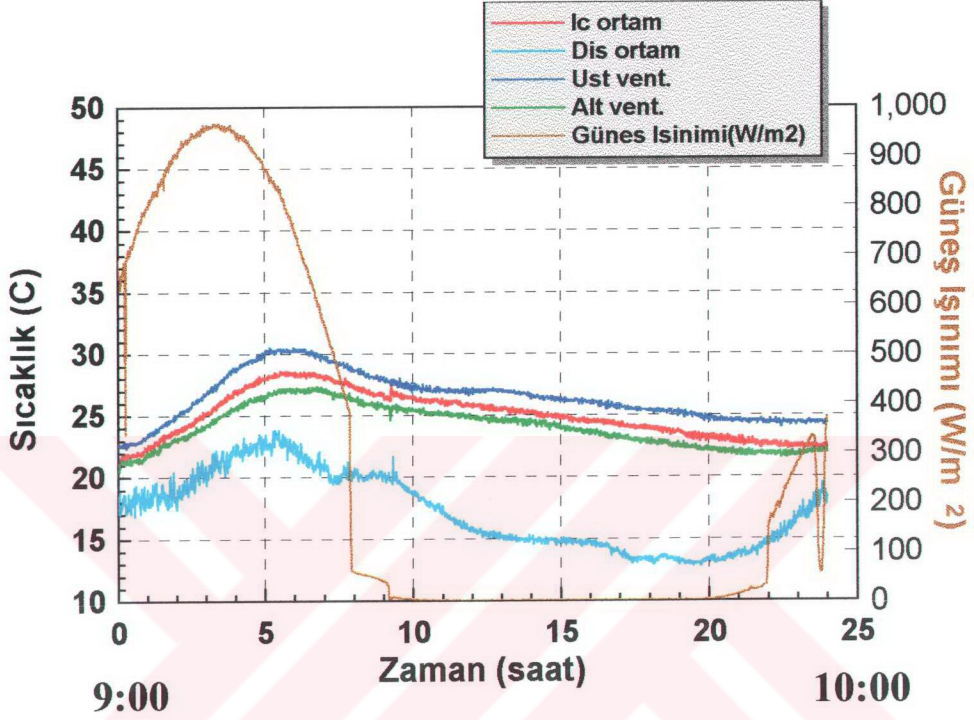
eğrisinin düzgün seyretmesi, havanın açık olduğunun işaretidir. Buna bağlı olarak yüzey sıcaklıkları, özellikle Trombe duvarı siyah yüzeyi ile cam yüzeyi sıcaklıkları da düzgün bir seyir izlemiştir. Burada, yine, en önemli iki elemana, cama ve siyah yüzeye dikkat edilecek olursa; sabah saatlerinden akşam saatlerine kadar, uzun bir süre, cam sıcaklığının siyah yüzey sıcaklığından yaklaşık 5°C daha yüksek kaldığı görülmektedir. Akşam saatlerinden itibaren, durum tersine dönmekte ve güneş ışınımının etkisini yitirmesiyle, cam, siyah yüzeye göre daha hızlı soğuyarak ve ertesi gün sabah saatlerine kadar siyah yüzey sıcaklığından daha düşük fakat ona paralel bir seyir izlemektedir. Bu paralelliğin nedeni, gece boyunca Trombe duvarından cama ısı transferinin gerçekleşmesidir. Trombe duvarı iç yüzeyi (odaya bakan taraf) ile soğuk duvar gözönüne alındığında, doğal olarak, güneş ışınımına çok yumuşak bir tepki gösterdikleri ve birbirlerine çok yakın sıcaklıklarda seyrettikleri görülür.



Şekil 4.28 Trombe duvarının iki yüzeyi, cam ve soğuk duvardaki sıcaklıkların 24 saat boyunca değişimleri (18 Mayıs 1997)

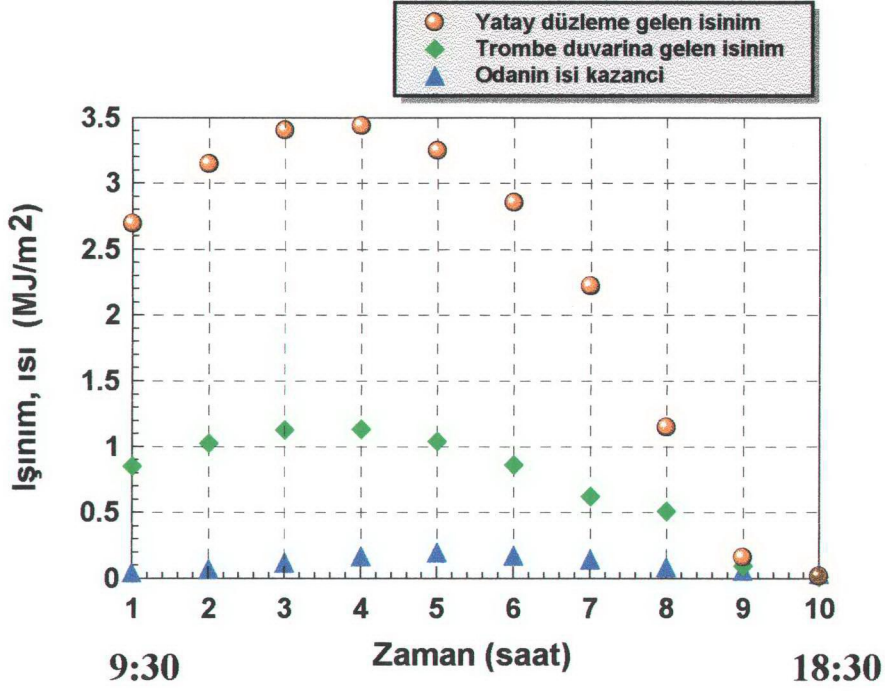
Diğer taraftan, üst ve alt ventilasyon delikleri ile oda iç ortam sıcaklıklarına bakıldığında (Şekil 4.29), termosirkülasyon olayının kanıtı olarak, üst ventilasyon

deliği en yüksek, alt ventilasyon deliği en düşük, oda sıcaklığının ise ara değerde seyrettiği görülmektedir. Dış ortam sıcaklığının ise, özellikle gece saatlerinde düşük bir değerde ve salınımlı bir seyir izlediği farkedilmektedir.



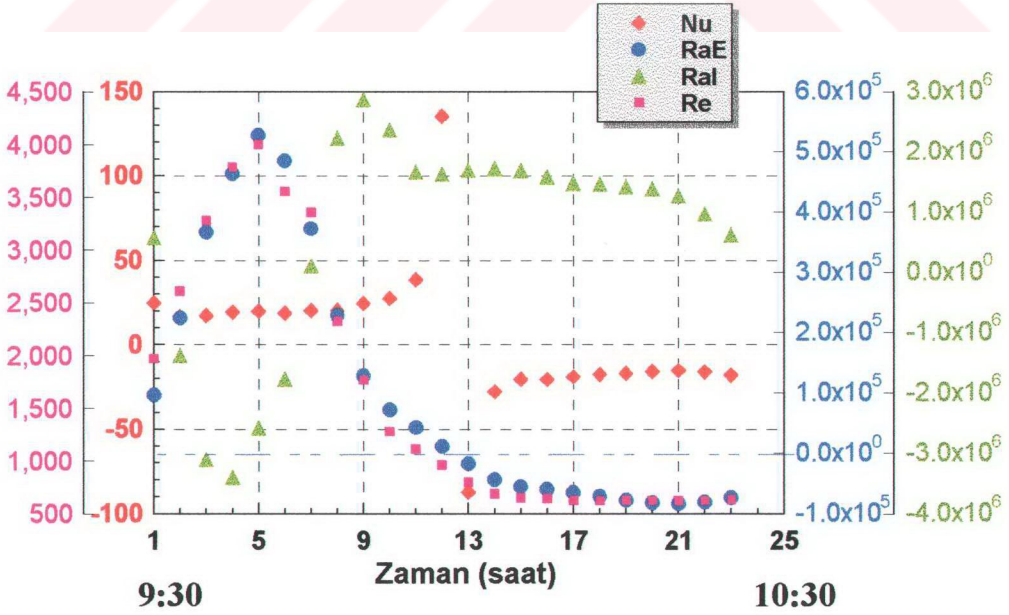
Şekil 4.29 Üst ve alt ventilasyon delikleri, iç ortam (odanın ortası) ve dış ortamdaki sıcaklıkların 24 saat boyunca değişimleri (18 Mayıs 1997)

Yatay düzleme gelen güneş ışıması verileri kullanılarak, düşey düzleme gelen ışımanın hesaplanması sonucunda, saatlik toplam ışıma eğrileri de elde edilmiştir. Şekil 4.30 'de , bu değerlerin yatay düzlem ışıma değerleri ile karşılaştırmalı olarak gün içindeki değişimleri verilmiştir. Bununla birlikte, odanın, Trombe duvarı birim yüzey alanı başına gerçekleşen ısı kazancı, (4.4) eşitliği yardımıyla hesaplandığında, düşey düzleme gelen ışıma miktarına göre düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.30 Yatay ve düşey düzleme gelen saatlik güneş ışınlamının, odanın saatlik ısı kazancının ve saatlik ortalama verimin gün boyunca değişimi (18 Mayıs 1997)

Isı transferi ve akışı karakterize eden boyutsuz sayıların, saatlik ortalama değerlerinin, 24 boyunca değişimleri Şekil 4.31 'de görülebilir.



Şekil 4.31 İçsel Rayleigh -Ra_I, Dışsal Rayleigh-Ra_E, Reynolds-Re ve Nusselt-Nu sayılarının saatlik bazda, 24 saatlik seyirleri (18 Mayıs 1997)

Burada ifade edilen İçsel Rayleigh sayısı,

$$Ra_I = \frac{g\beta(T_d - T_c)s^3}{\nu\alpha} \quad (4.2)$$

şeklinde tanımlanmakta ve yalnızca kanal bölgesindeki doğal taşınımı ifade etmektedir [5].

Dışsal Rayleigh sayısı ise, kanal ve oda arasında gerçekleşen Termosirkülasyon olayını karakterize etmekte ve

$$Ra_E = \frac{g\beta(T_{(d+c)/2} - T_{in})s^4}{\nu\alpha H} \quad (4.3)$$

şeklinde verilmiştir [5].

Burada, T_d , Trombe duvarı siyah yüzey sıcaklığını; T_c , cam yüzey sıcaklığını; T_{in} , alt ventilasyon deliklerinden kanala giren havanın sıcaklığını; karakteristik uzunluk olarak, s , kanalın genişliğini, H , ise yüksekliğini temsil etmektedirler.

Isı transferini karakterize eden Nusselt sayısı ise, şu şekilde tanımlanmıştır:

$$Nu = \frac{\dot{Q} \cdot s}{(T_d + T_c - 2T_{in}) \cdot A \cdot k} \quad (4.4)$$

Buradaki tanımda, kanal bölgesinden odaya olan ısı transferi esas alınmıştır. Buna göre, $\dot{Q}$ (W), bir saat boyunca odaya transfer edilen ortalama net gücü; A (m^2), Trombe duvarı yüzey alanını, $k=0.02624$ (W/mK) [19], havanın ısı iletim katsayısını ifade etmektedirler.

Birim zamanda odaya verilen enerji miktarı $\dot{Q}$ (W), ;

$$\dot{Q} = \rho U A_v c_p (T_{out} - T_{in}) \cdot 1000 \quad (4.5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu ifadedeki bazı parametreler,

ρ (havanın , 27°C 'deki yoğunluğu) : 1.774 kg/m³

A_v (üst ventilasyon deliklerinin toplam kesit alanı) : 0.4 m²

c_p (havanın 27°C 'deki özgül ısısı) : 1.0057 kJ/kgK

U (ventilasyon deliklerindeki ortalama hız) (m/s)

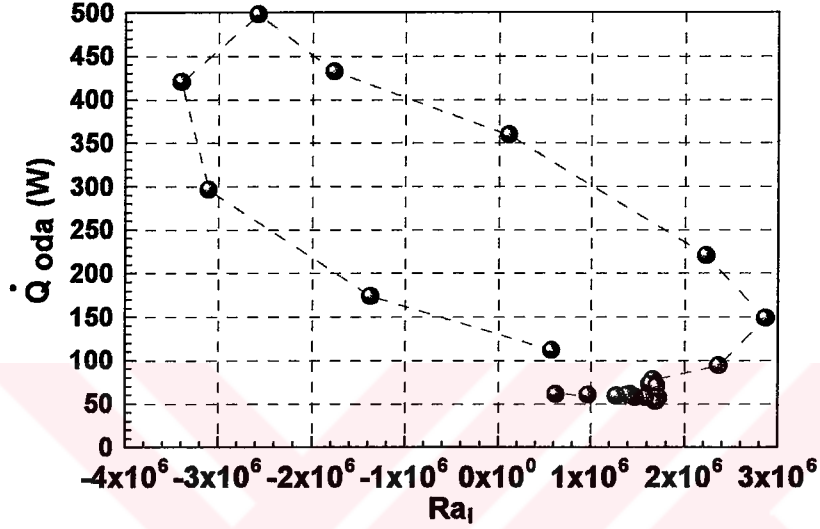
olarak verilmişlerdir [19].

La Pica v.d. [12] tarafından, yapılan çalışmada, paralel iki levha arasındaki doğal taşınım incelenirken, alışılmışın dışında, bir Re - Ra korelasyonu kurulmuştur. Bu yüzden benzer bir amaçla, akışın Re sayısı ile ilişkisini görebilmek için aşağıdaki şekilde bir, Re , sayısı tanımlanmıştır:

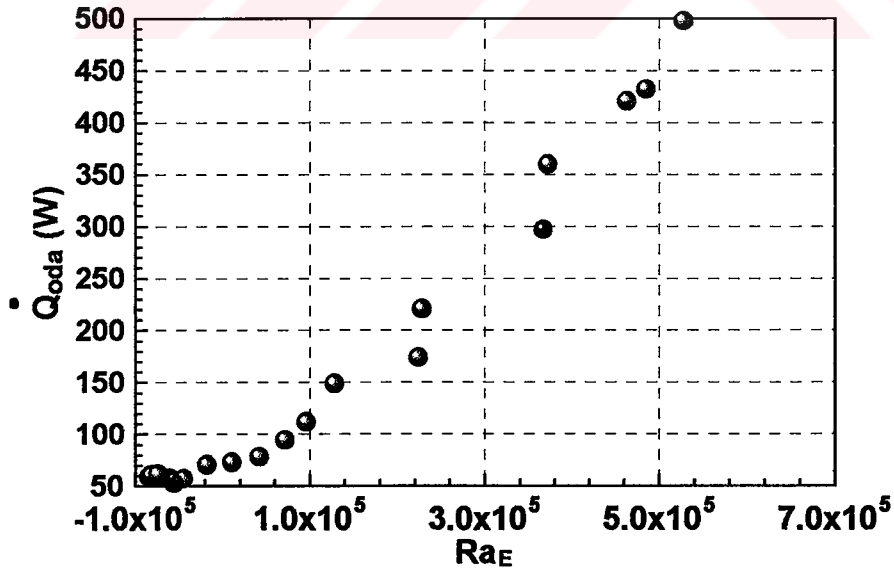
$$Re = \frac{U s}{\nu} \quad (4.6)$$

Buna göre, Şekil 4.31 'de Termosirkülasyonu temsil eden, Ra_E , sayısı ile bu olaydan dolayı ortaya çıkan akış hızını ifade eden, Re sayısının doğal olarak paralel bir değişim gösterdikleri görülmektedir. Ra_E ve Re sayıları, 13:00 - 14:00 saatleri arasında maksimum değerlerine ulaşmaktadırlar. Bu sırada, Ra_I sayısının ise Ra_E ile ters orantılı bir seyir izlediği farkedilmektedir. Yani, Ra_I azaldığı sırada Ra_E artmakta veya tam tersi geçerli olmaktadır. Ra_I 'nin negatif değerlere sahip olması, cam sıcaklığının siyah yüzey sıcaklığından yüksek olduğu anlamına gelmekte ve kanalda, saat yönünde akış döngüleri oluşması beklenmektedir. Pozitif değere sahip olması ise siyah yüzey sıcaklığının cam sıcaklığından daha yüksek olması ve saatin ters yönünde döngüler oluşması anlamındadır (Şekil 4.28). Bu noktada, dikkat edilmesi gereken husus, Ra_I minimum değeri için Ra_E 'nin maksimum değere sahip olduğu, dolayısıyla odanın ısı kazancının en üst düzeyde olduğudur. Ters durumda ise odanın ısı kazancı minimum düzeyde gerçekleşecektir. Bu durum Şekil 4.32 ve 4.33 'de daha net bir şekilde görülebilir. Şekil 4.31 'de dikkat edilmesi gereken kritik noktalar ise, $Ra_I=0$ ve $Ra_E=0$ noktalarıdır. $Ra_I \geq 0$ durumunda, kanalda, saatin ters

başlamakta ve devam etmektedir. $Ra_E \leq 0$ durumunda ise Termosirkülasyon olayı durmakta ve kanaldaki akış döngülerinin yanısıra tersine bir Termosirkülasyon gerçekleşebilmektedir. Bunun anlamı ise, odadan dış ortama ısı kaybı olmasıdır. Şekilden de görülebileceği gibi, $Ra_E = 0$ noktasında Nu sayısı sonsuza gitmekte, $Ra_E < 0$ için ise tanımı dolayısıyla negatif değerlere sahip olmaktadır. Bu negatif değerlerin anlamı odadan dış ortama, kanal vasıtasıyla ısı kaybı olmasıdır.

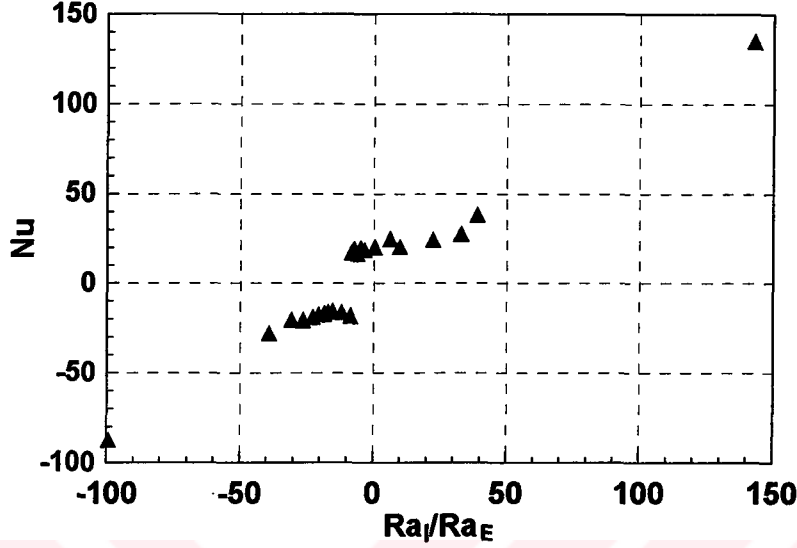


Şekil 4.32 Oda ısı kazancının içsel Rayleigh sayısına göre değişimi (18 Mayıs 1997)



Şekil 4.33 Odaya transfer edilen ısı miktarının dışsal Rayleigh sayısına göre değişimi (18 Mayıs 1997)

Ra_I ve Ra_E ile Nu sayıları arasında bir ilişki kurulmaya çalışılırsa, Şekil 4.34'deki gibi bir sonuç elde edilir. Buradan, ısı transferinin en iyi olduğu durumun, Ra_I 'nin Ra_E 'den büyük ve pozitif olduğu hallerde gerçekleştiği sonucu çıkmaktadır.



Şekil 4.34 İçsel Rayleigh/Dışsal Rayleigh oranı ile Nusselt arasındaki ilişki (18 Mayıs 1997)

4.4. Ventilasyon Deliklerinde Hava Hareketi

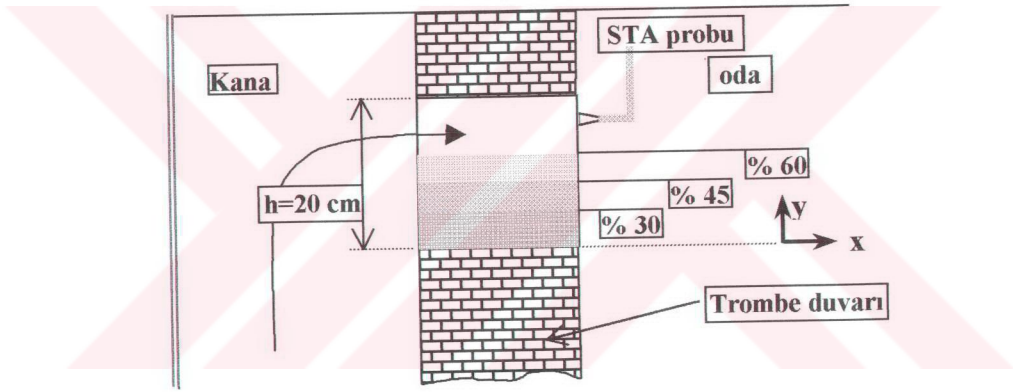
Trombe duvarlı pasif sistemin kanalındaki akışla birlikte, odanın sıcak hava menfezleri sayılan üst ventilasyon deliklerindeki ve bununla bağlantılı olarak tavana yakın bölgedeki akış; sistemin doğal taşınım yoluyla ısı alış-verişinde önemli bir rol oynamaktadır.

Kanal bölgesinde, doğal taşınım yoluyla ısı alıp üst ventilasyon deliklerinden, bir sıcak hava jeti şeklinde odaya giren akışkanın oda içindeki dağılımı, konfor şartlarının oluşmasında önemli bir parametredir. Bu dağılım jetin akış karakteristikleri ile yakından ilgilidir. Bu yüzden, üst ventilasyon delikleri çıkışında düzgün bir akışın oluşması istenir.

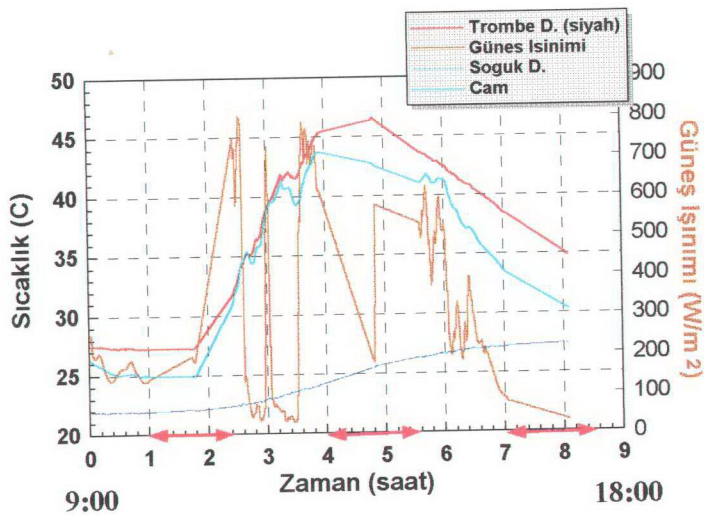
Buradan hareketle, ventilasyon deliklerinin değişik kesit alanları için üst ventilasyon deliklerindeki jetin akış karakteristikleri; bir Sıcak Tel Anemometresi ile yapılan ölçümler sonucu elde edilen verilerin analiz edilmesi sayesinde bulunmuştur. Böylece, ilk olarak, ventilasyon deliklerinin %100 açık halleri için sabah, öğle ve

akşam üzerleri ayrı ayrı ölçümler yapılmıştır. Diğer günler ise kanal sıcaklıklarının en yüksek olduğu öğle saatlerinde, deliklerin, %30, %45 ve %60 kapalı durumları için ölçümler alınmıştır (Şekil 4.35). Akbarzadeh v.d. [3] tarafından, benzer bir geometride yapılan çalışmalarda, ventilasyon deliklerindeki kesit değişikliklerinin sistem performansı üzerinde çok küçük bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle bu etki üzerinde durulmamıştır.

Ventilasyon deliklerinin tam açık hali için, 9 Nisan 1998 tarihinde üst ve alt ventilasyon deliklerinde akış ölçümü yapıldığı sırada, Trombe duvarı siyah yüzeyi, cam ve soğuk duvar sıcaklıkları ile yatay düzleme gelen güneş ışınımının zamana göre değişimleri Şekil 4.36 'da görülmektedir. Grafiğin, x-eksenindeki kırmızı oklar hız ölçümlerinin yapıldığı zaman aralığını belirtmektedirler.

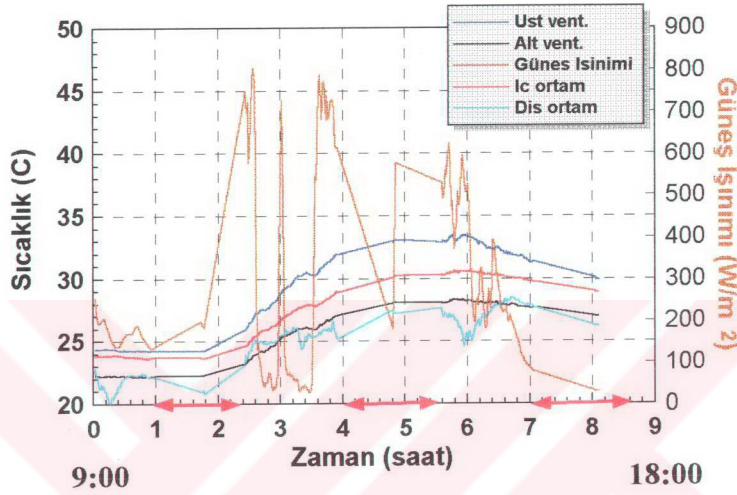


Şekil 4.35. Ventilasyon deliklerinin kesit alanlarının daraltılması



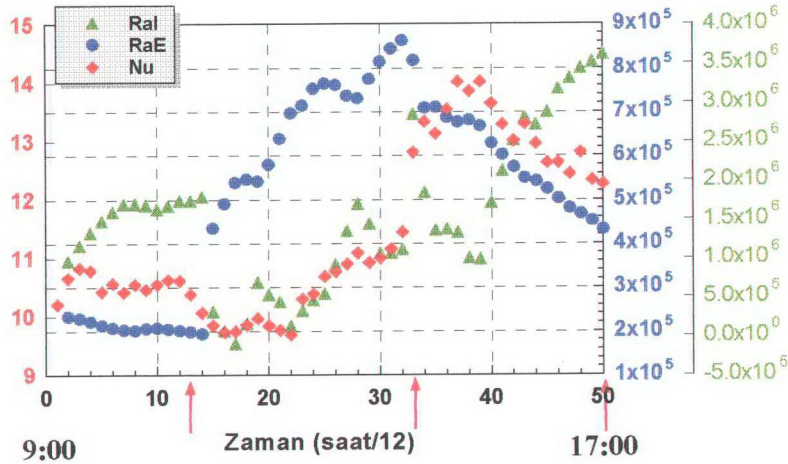
Şekil 4.36 Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının ve yatay düzleme gelen anlık güneş ışınımının gün içindeki seyri (9 Nisan 1998)

Akış ölçümü yapılan, üst ve alt ventilasyon deliklerindeki sıcaklıkların, iç ortam ve dış ortam sıcaklıklarıyla birlikte, gün boyu değişimleri, Şekil 4.37 'de görüldüğü gibidir. Şekilden de anlaşılabileceği üzere, sıcaklıklar, Termosirkülasyon olayını doğrulayıcı bir düzen içinde bulunmaktadır. Dış ortam sıcaklığının, zaman zaman alt ventilasyon deliğindeki sıcaklıktan daha yüksek bir değere ulaşması ise odadaki sıcaklıkların büyük oranda güneş ışınımına bağlı olmaları, dış sıcaklığın bazan salınımlar yapabilmesi ve ölçüm hatalarından kaynaklandığı söylenebilir.



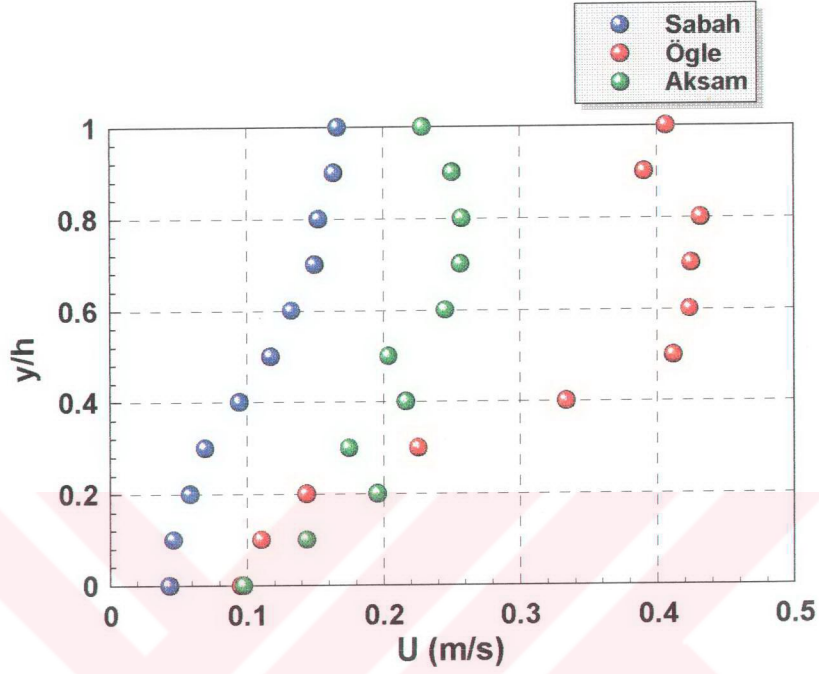
Şekil 4.37 Üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortamdaki sıcaklıkların ve güneş ışınımının gün boyunca değişimi (9 Nisan 1998)

Isı transferi ve akışı karakterize eden boyutsuz sayıların 5 dakikalık ortalama değerlerinin gün içindeki değişimleri ise Şekil 4.38 'de verilmiştir. Kırmızı oklar, ölçüm yapılan anları göstermektedirler.



Şekil 4.38 İçsel Rayleigh-RaI, Dışsal Rayleigh-RaE ve Nusselt boyutsuz sayılarının beşer dakikalık ortalama değerlerinin gün içindeki değişimleri (9 Nisan 1998)

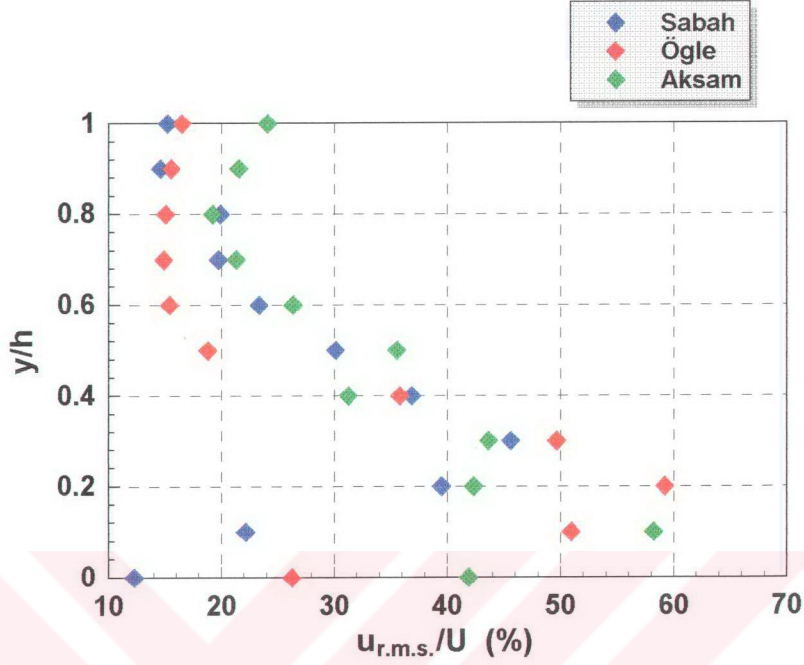
Aynı gün (9 Nisan 1998), üst ventilasyon deliklerinde, sabah, öğle ve akşam, Sıcak Tel Anemometresi ile yapılan ölçümler (Şekil 4.35) sonucunda deliğin çıkışındaki hız profilleri Şekil 4.39 'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.39 Üst ventilasyon deliklerindeki hız profilleri-sabah, öğle, akşam (9 Nisan 1998)

Şekilden de görülebileceği gibi, en yüksek hızlar öğle saatlerinde, en düşük hızlar ise sabah saatlerinde gerçekleşmektedir. Bu profillerin, Şekil 4.38'deki Ra_E ile uyumlu olduğu söylenebilir. Yani, Ra_E , en yüksek değerine öğle saatlerinde, en düşük değerine ise sabah saatlerinde sahip olmaktadır. Burada, dikkati çeken önemli diğer bir nokta, ventilasyon deliğinin alt yarısında yüksek hız gradyanlarının oluşmasıdır. Bununla birlikte, türbülans yoğunluğu profilleri de incelenecek olursa (Şekil 4.40), aynı bölgede, türbülans yoğunluklarının maksimuma ulaştığı görülmektedir. Akışın bu özellikleri, kanalda düşey doğrultuda akmakta olan akışkanın 90° 'lik bir dönüşle yatay konumda, ventilasyon deliğinden geçerek odaya giriş yapması sırasında (Şekil 4.35) cidardan olan ayrılma sebebiyle oluşan döngülerden kaynaklanmaktadır. Ventilasyon deliğinin alt yarısındaki hız ve türbülans yoğunluğu ile Ra_I arasındaki ilişki incelenecek olursa; sabah ve öğle saatlerinde, $Ra_I = 2 \times 10^6$ civarında bulunduğu, ve bu saatlerde hız ve türbülans değerlerinin düzgün bir profil oluşturdukları, buna

karşın, akşam saatlerinde, $Ra_I = 3.5 \times 10^6$ olduğu ve buna karşılık gelen hız ve türbülans profillerinin düzgün olmadıkları görülmektedir.



Şekil 4.40 Üst ventilasyon deliklerindeki türbülans yoğunluğu-sabah, öğle, akşam (9 Nisan 1998)

Sıcaklıkların en yüksek olduğu öğle saatlerinde, üst ventilasyon deliklerindeki akış ele alınacak olursa, hız, türbülans yoğunluğu ve varyans profilleri Şekil (4.41)'de aynı grafik üzerinde görülmektedir. Burada, önemli noktalardan bazıları; varyansın , hız profilinin en yüksek, pozitif gradyana sahip olduğu noktada maksimum değere ulaşması, diğer yandan, türbülans yoğunluğunun ise varyans profilinin en yüksek ve pozitif gradyana sahip olduğu noktada maksimum değere sahip olmasıdır. Bu maksimum değerlerin, ventilasyon deliğinin alt yarısında bulunması, burada, kenar ayrılmasından dolayı akış döngülerinin oluştuğunu göstermektedir [3]. Bu sonuçların desteklenmesi amacıyla, ayrıca, delik boyunca *Skewness* ve *Kurtosis* değişimlerinin incelenmesi yararlı olacaktır [24].

İstatistik olarak, verilerin dağılımının normal dağılımdan sapma derecesi anlamına gelen *Skewness*, fiziksel açıdan, türbülans enerjisinin, yüksek yoğunluklu bölgeden düşük yoğunluklu bölgeye taşınımı ile ilgili bir parametredir [33]. *Skewness*, homojen türbülans halinde, sıfıra yakın bir değere, türbülanslı kaymalı akış

durumunda biraz daha yüksek ve serbest türbülanslı akışın, mesela jet akışı, kenarında ise yüksek bir değere sahip olmaktadır.

Skewness, matematiksel olarak, salınımların üçüncü kuvvetlerinin ortalamasının, standart sapmanın üçüncü kuvveti ile boyutsuzlaştırılması şeklinde, (4.7) eşitliğindeki gibi ifade edilmektedir.

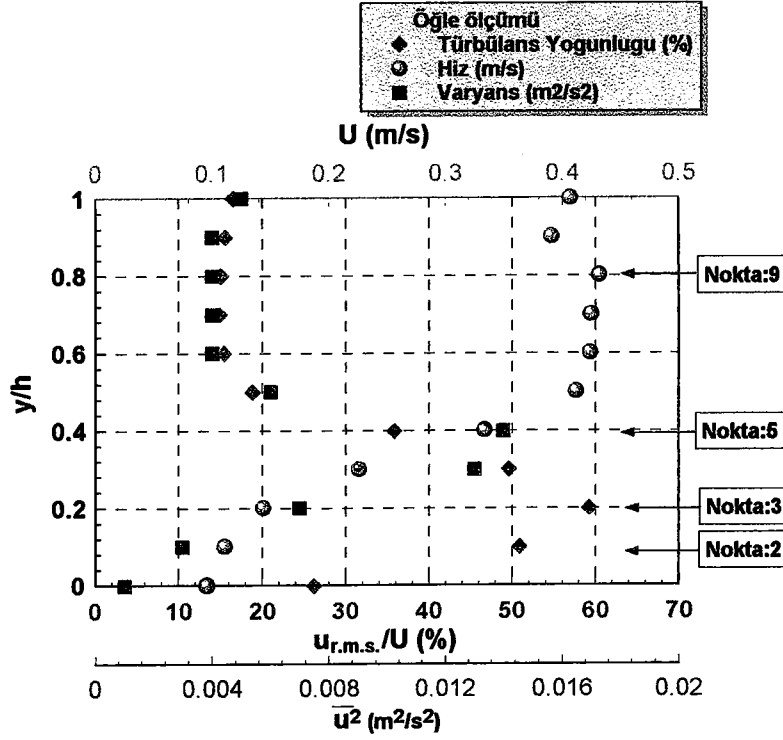
$$S = \overline{x^3} / \sigma_x^3 \quad (4.7)$$

Kurtosis sayısı (veya Flatness Factor) ise, benzer şekilde, salınımların dördüncü kuvvetlerinin, standart sapmanın dördüncü kuvveti ile boyutsuzlaştırılması sonucu elde edilir.

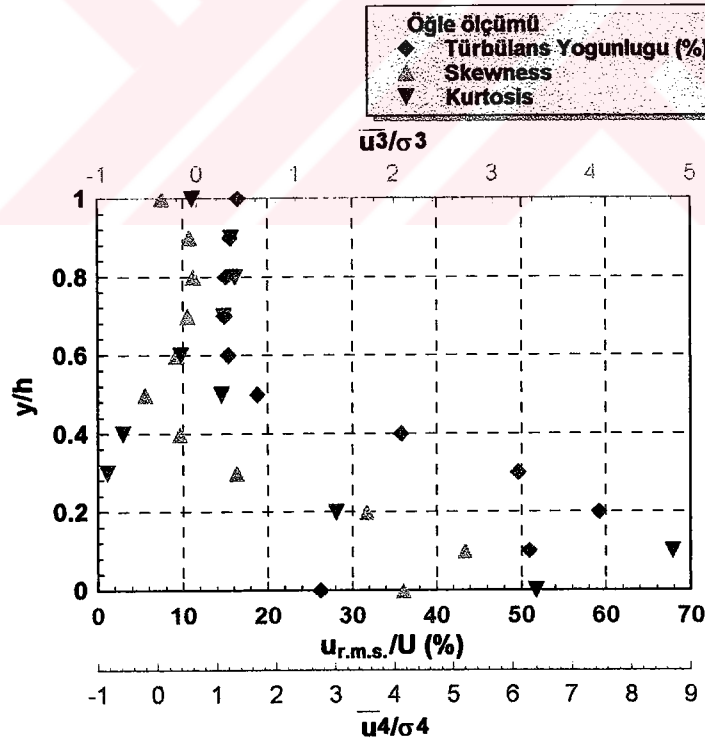
$$K = \overline{x^4} / \sigma_x^4 \quad (4.8)$$

Kurtosis, genellikle, jet akışının kenarlarında olduğu gibi türbülans yoğunluğunun homojen olmadığı durumlarda yüksek değerlere sahip olur [33].

Bu bilgiler doğrultusunda, Şekil 4.41 incelenecek olursa, Skewness ve Kurtosis eğrilerinin varyansın maksimum olduğu 5 no'lu ölçüm noktasında en düşük değerlere sahip oldukları, türbülans yoğunluğu gradyanı bulunan 2 no'lu ölçüm noktasında ise en üst değerlere ulaştıkları görülmektedir. Bunun nedeni, varyansın en üst değere sahip olduğu 5 noktasının, türbülans yoğunluğunun en üst değere ulaştığı 3 nolu noktanın, ve Kurtosis 'in maksimuma ulaştığı 2 no'lu noktanın akışın yüzeyden ayrılmasından etkilenen bölgede kalmalarıdır.



(a)



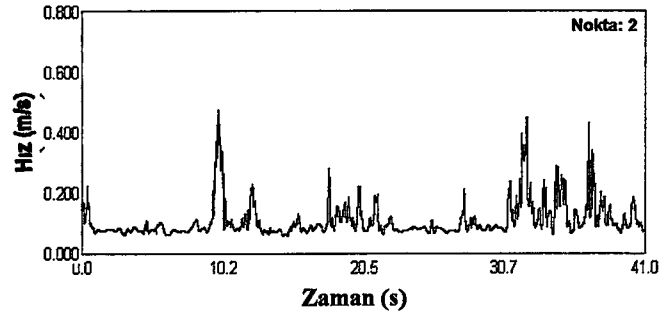
(b)

Şekil 4.41 Üst ventilasyon deliklerindeki; a) ortalama hız, türlülans yoğunluğu ve varyans; b) skewness ve kurtosis -öğle (9 Nisan 1998)

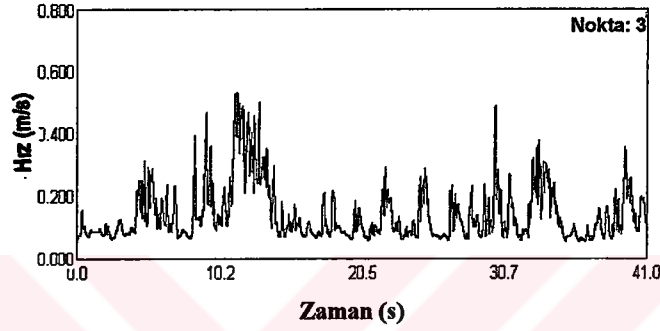
Bu noktalardaki (2, 3, 5 ve üst bölgedeki 9) hızların zaman serileri incelenecek olursa olay daha iyi kavranabilir (Şekil 4.42). Şekilden de görüldüğü gibi (Şekil 4.42a), 2 noktasında, türbülans, büyük sıçramalar şeklinde kendini göstermektedir. Türbülans yoğunluğunun en yüksek değere sahip olduğu 3 noktasında ise sıçramalardan salınımlı akışa bir geçiş (Şekil 4.42b), varyansın en yüksek olduğu 5 noktasında ise tamamen salınımlı bir akışın yanısıra zaman içinde genel bir dalgalanma görülmektedir. Diğer yandan, tüm eğrilerin gradyanlarının hemen hemen sıfır olduğu 9 noktasındaki hızın zaman serisi ise Şekil 4.42d 'deki gibidir.

Özellikle 3 ve 9 noktalarındaki akış karakteristikleri arasındaki farklılıkları biraz daha belirginleştirmek amacıyla, bu noktalardaki Güç Spektrumları ile Otokorelasyon Fonksiyonu Katsayıları karşılaştırılmıştır. Bu iki karakteristik noktadaki güç spektrumları ele alınacak olursa (Şekil 4.43a ve b), 3 noktasında, türbülans enerjisinin 0.5 - 3 Hz frekansları arasında; 9 noktasında ise 0.5 - 10 Hz frekansları arasında yoğunlaştığı görülmektedir. Buna göre, 9 noktasında türbülans enerjisinin büyük bölümüne sahip eddiler, 3 noktasındakilere oranla daha küçük boyutlara sahiptirler. Bu durum, Otokorelasyon Fonksiyonu eğrilerinde daha net bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 4.44a ve b). Şekilden de görülebileceği gibi, 9 noktasındaki zaman ölçeği yaklaşık olarak, 3 noktasındakinin 1/8'i mertebesinde. Buna karşın 9 noktasındaki ortalama hız değeri, yaklaşık olarak, 3 noktasındakinin 3 katı civarındadır. Buna göre, 3 noktasında, türbülans enerjisinin büyük bölümüne sahip olan eddilerin ölçeklerinin, 9 noktasındakilerin birkaç katı civarında olacağı kolayca anlaşılabılır.

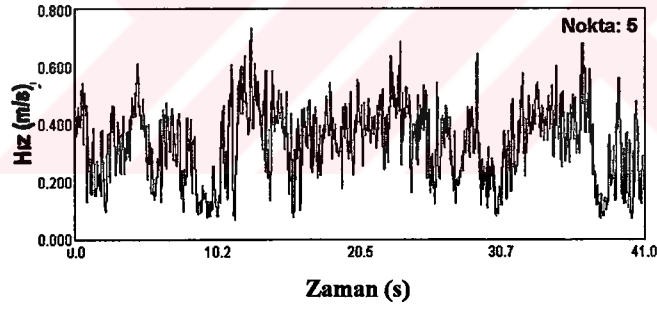
Sabah ve akşam ölçümlerinden elde edilen hız ve türbülans yoğunluğu profilleri yanında, Skewness ve Kurtosis profilleri de dikkate alınacak olursa (Şekil 4.45 ve 4.46) sabah saatlerinde, bu profillerin 3 noktasında maksimuma ulaşmaları nedeniyle, akışkanın deliğe girişindeki ayrılmanın etkisinin belirgin olduğu, akşam saatlerinde ise maksimum değerlerin 1 noktasına kaymasıyla, bu etkinin daha küçük boyutlu sonuçlara neden olduğu anlaşılmaktadır. Ra_1 değerinin akşam saatlerinde en üst değere ulaşmasının bu sonuçlar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.



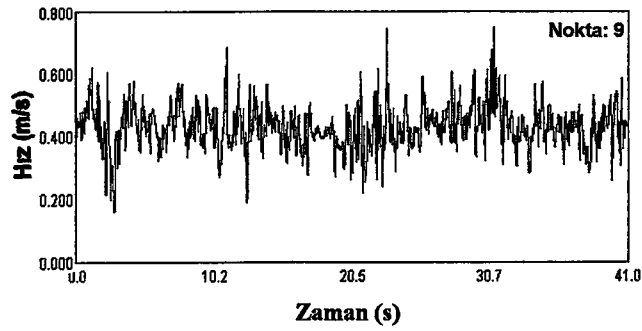
(a)



(b)

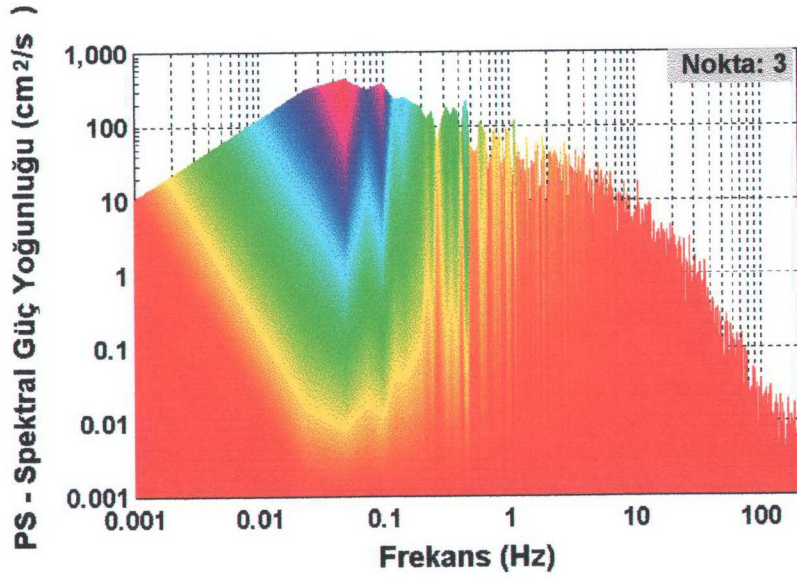


(c)

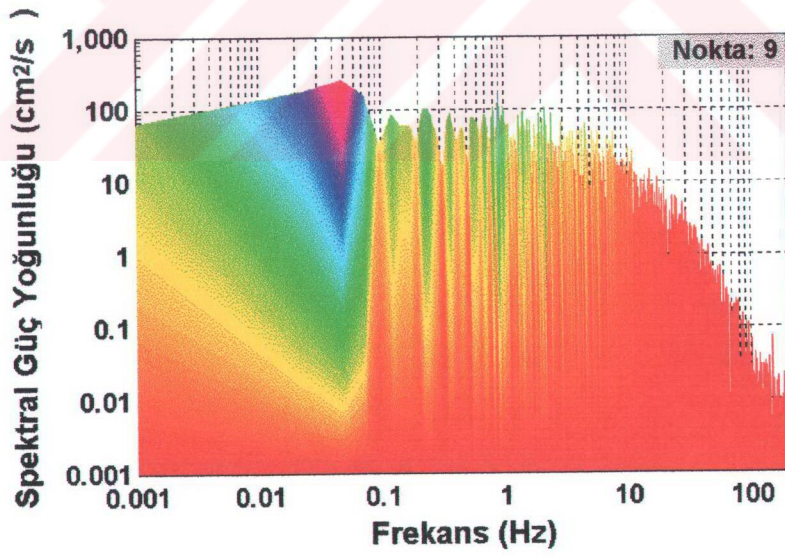


(d)

Şekil 4.42 Üst ventilasyon deliklerinde bazı noktalardaki hızların zaman serileri-öğle
a) 2 noktası , b) 3 noktası, c) 5 noktası ,d) 9 noktası (9 Nisan 1998)

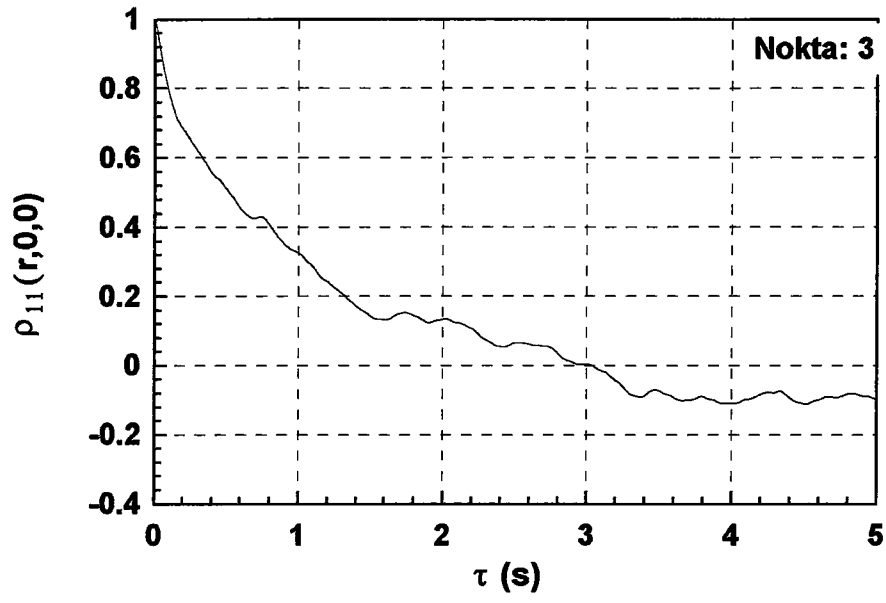


(a)

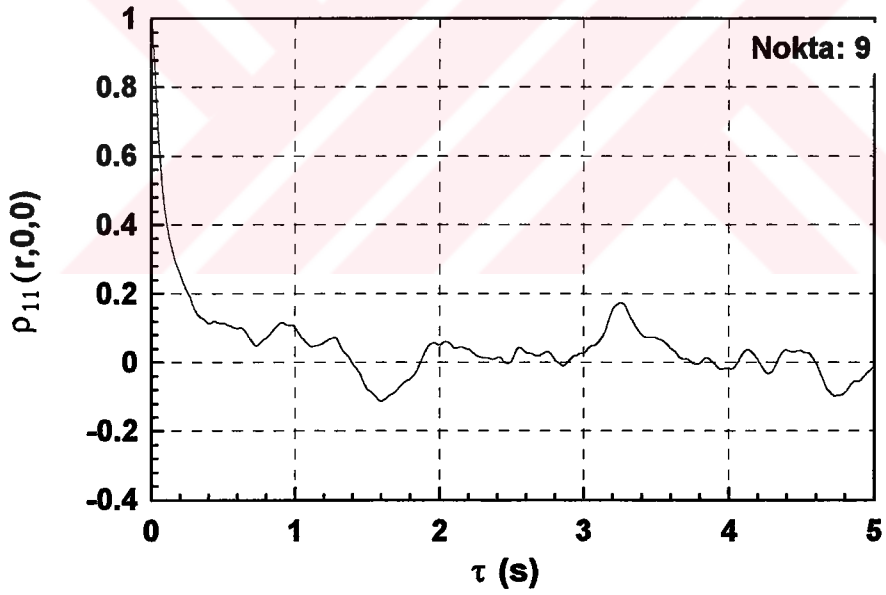


(b)

Şekil 4.43 Üst ventilasyon deliklerinde Güç Spektrumu-öğle; a) 3 noktası, b) 9 noktası (9 Nisan 1998)

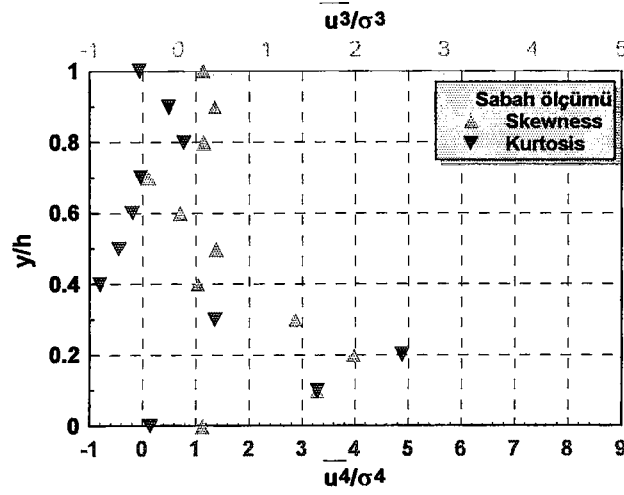


(a)

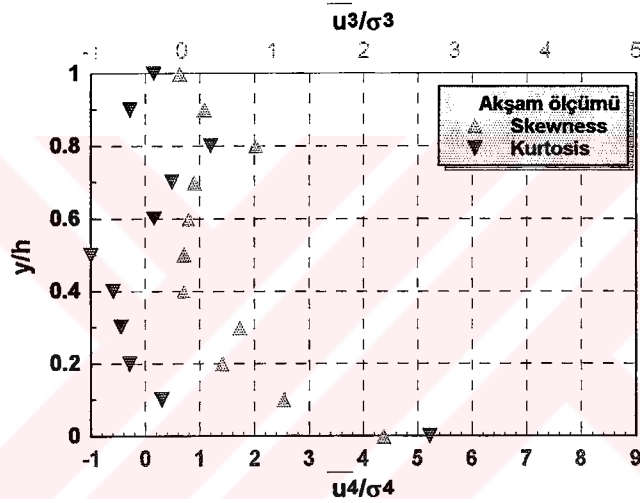


(b)

Şekil 4.44 Üst ventilasyon deliklerinde Otokorelasyon Fonksiyonu Katsayısı-öğle;
a) 3 noktası, b) 9 noktası (9 Nisan 1998)

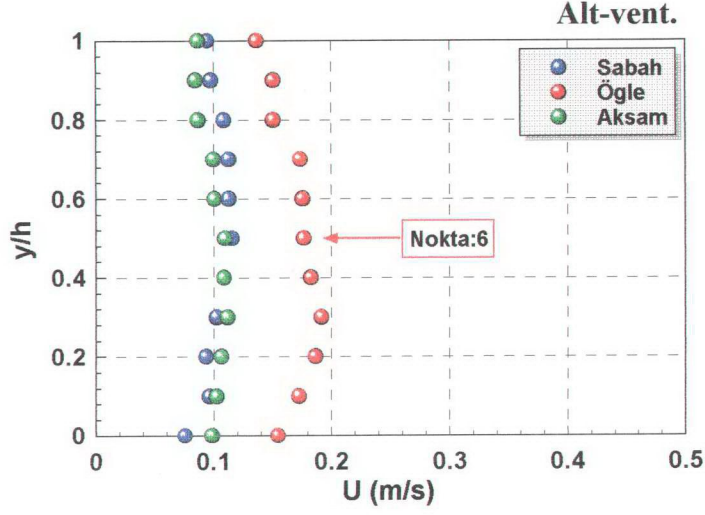


Şekil 4.45 Üst ventilasyon deliklerinde Skewness ve Kurtosis profilleri-sabah (9 Nisan 1998)



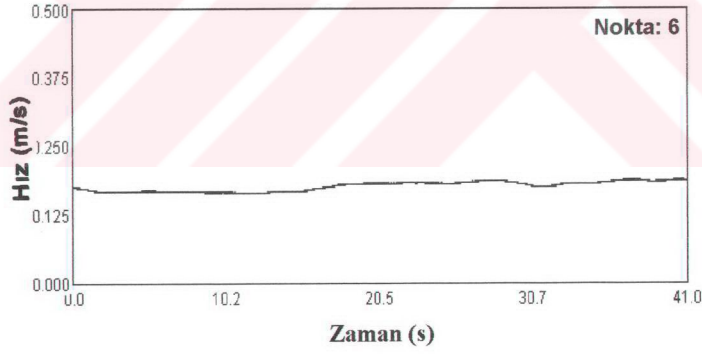
Şekil 4.46 Üst ventilasyon deliklerinde Skewness ve Kurtosis profilleri-akşam (9 Nisan 1998)

Diğer taraftan, alt ventilasyon deliklerindeki durum incelenecek olursa, burada, akışın tamamen laminar ve düzgün bir hız profili oluştuğu görülecektir (Şekil 4.47). Şekil 4.39 'da verilen üst ventilasyon deliğinde, sabah, öğle ve akşam üzeri yapılan ölçümler sonucunda elde edilen hız profilleri ile Şekil 4.47'de verilen alt ventilasyon deliğindeki hız profilleri gözönüne alındığında, türbülans yoğunluklarının düşük olduğu sabah ve akşam ölçümlerinde alt ve üst deliklerdeki ortalama hızların birbirine yakın olduğu görülmektedir (kütlenin korunumu). Buna karşın, öğle üzeri elde edilen profillere göre ortalama hızların pek uyum göstermediği görülmektedir. Bunun sebebi ise üst delikteki yüksek türbülans yoğunluğu dolayısıyla oluşan ters akışların tek boyutlu sıcak tel anemometresi tarafından algılanamamasıdır.



Şekil 4.47 Alt ventilasyon deliklerindeki hız profilleri-sabah, öğle, akşam (9 Nisan 1998)

Burada, 6 noktasındaki ortalama hızın zaman serisine bakılacak olursa, akışın laminarlığı açıkça görülebilir (Şekil 4.48).



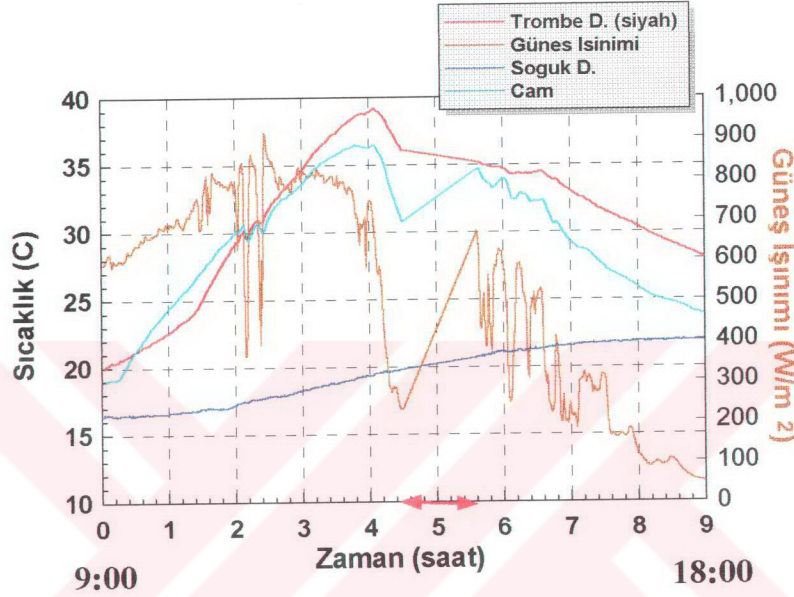
Şekil 4.48 Alt ventilasyon deliklerinde 6 noktasındaki hızın zaman serisi-öğle (9 Nisan 1998)

Ventilasyon Deliklerinin %30 Kapalı Hali

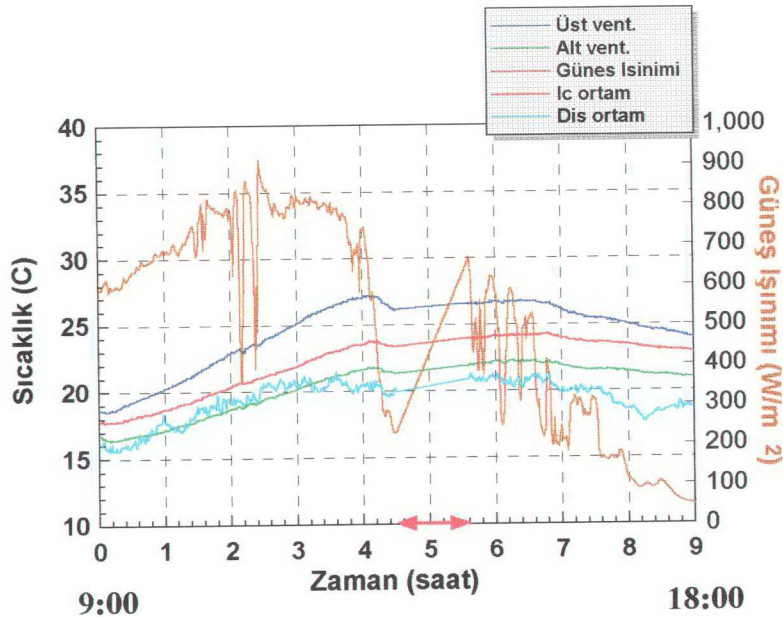
Ventilasyon deliklerindeki kesit değişimlerinin, akışı nasıl etkilediğini görmek amacıyla, ilk olarak, 29 Nisan 1998 tarihinde, kesit alanının %30 'u (300 cm^2 'lik kısmı) kapatılmış (Şekil 4.35) ve akış ölçümleri yapılmıştır.

Şekil 4.49'da, gün içinde , Trombe duvarı, cam ve soğuk duvarın sıcaklık değişimleri görülmektedir. Burada, sabah saatlerinde, cam sıcaklığının duvar sıcaklığından

yüksek seyrettiği, daha sonra ise durumun tersine döndüğü dikkati çekmektedir. Fakat her iki sıcaklık da saat 13:00 civarında en yüksek değerlerine ulaşmaktadırlar. Soğuk duvar sıcaklığı ise her zamanki gibi çok yumuşak bir geçişle küçük bir değişim arz etmektedir. Yatay düzleme gelen anlık güneş ışınlamından, yine parçalı bulutlu bir gün olduğu anlaşılmaktadır. Üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortam sıcaklıklarının seyri ise Şekil 4.50 'de görülmektedir.



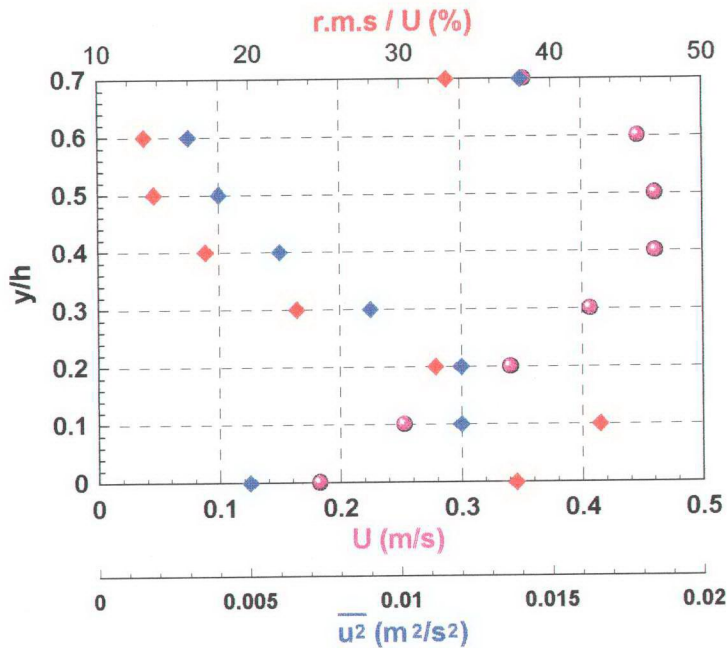
Şekil 4.49 Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının ve yatay düzleme gelen anlık güneş ışınlamının gün içindeki seyri (29 Nisan 1998)



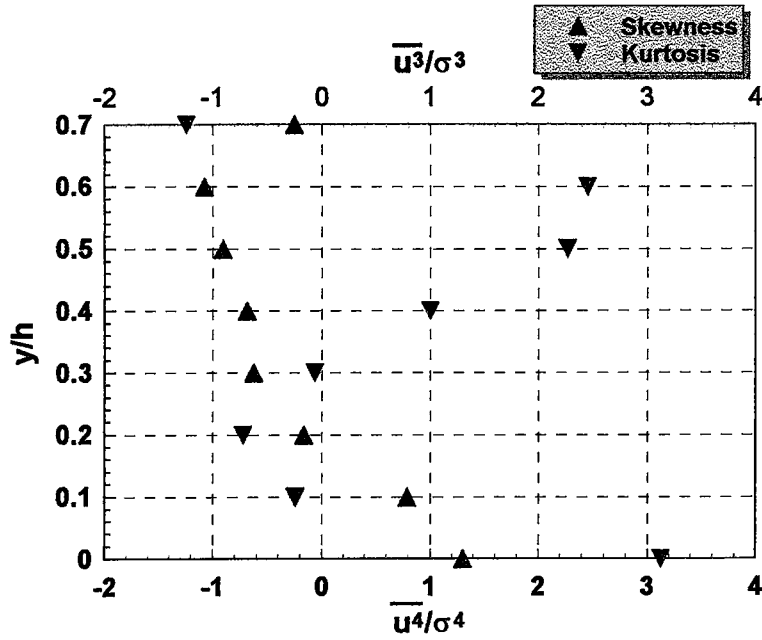
Şekil 4.50 Üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortamdaki sıcaklıkların gün boyunca değişimi (29 Nisan 1998)

Yatay eksenlerdeki iki başlı kırmızı ok, STA ile hız ölçümlerinin yapıldığı aralığı göstermektedir. Hız ölçümleri sıcaklıkların en yüksek değerlere sahip olduğu öğle saatlerinde alınmıştır. Bu saatlerde, $Ra_I/Ra_E = 3.5$ olduğu hesaplanmıştır.

Böylece, ventilasyon deliklerinin kesit alanlarının %30 kapalı olması durumundaki hız, türbülans yoğunluğu ve varyans profilleri Şekil 4.51 'deki gibidir. Hız profiline bakılacak olursa, deliğin alt kısmında ayrılmadan dolayı oluşan döngünün, deliklerin tam açık konumundaki kadar etkili olmadığı anlaşılmaktadır. Yani, tam açık konumda, deliğin alt cidarına yakın bölgede ortaya çıkan bir ters akış izlenimi, bu geometride pek görülmemektedir. Bununla birlikte, türbülans yoğunluğu ve varyans değerlerinin maksimuma ulaştıkları noktaların alt cidara çok yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.52 'de verilen Skewness ve Kurtosis profilleri incelendiğinde olursa, maksimum değerlerin 1. noktada gerçekleştiği görülecektir. Buradan, ayrılma sonucu oluşan döngüden dolayı bir ters akış oluşmasının mevcut sıcaklıklarda, bu kesit alanı için zor olduğu söylenebilir. Şekil 4.51'de göze çarpan bir nokta, deliğin üst cidar yakınında, türbülans yoğunluğu ve varyansın çok yüksek değerlerde bulunmasıdır. Bununla uyumlu olarak, Şekil 4.52'de, üst kısımda, Kurtosis eğrisinin, neredeyse maksimuma yakın bir değerde bulunmasının nedeninin, delik yüksekliğinin küçülmesi sonucunda üst cidarda oluşan hafif bir ayrılma olduğu tahmin edilmektedir.

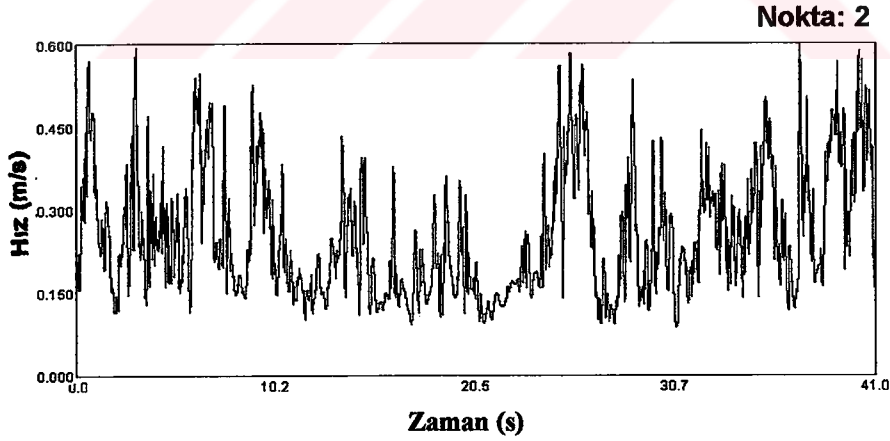


Şekil 4.51 Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (29 Nisan 1998)



Şekil 4.52 Üst ventilasyon deliklerindeki Skewness ve Kurtosis (29 Nisan 1998)

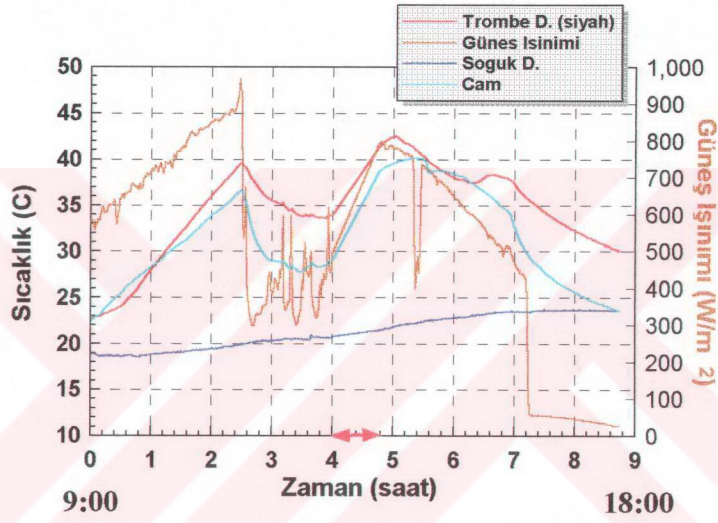
Türbülans yoğunluğunun en yüksek değerine sahip olduğu 2 noktasındaki hızın zaman serisi Şekil 4.53' de verilmiştir. Bu noktadaki zaman serisi, tam açık konumdakine benzer şekilde sıçramalı; farklı olarak, daha çok salınımlı bir görüntü arz etmektedir. Bu farklılığın kesit daralmasından dolayı gerçekleştiği açıktır.



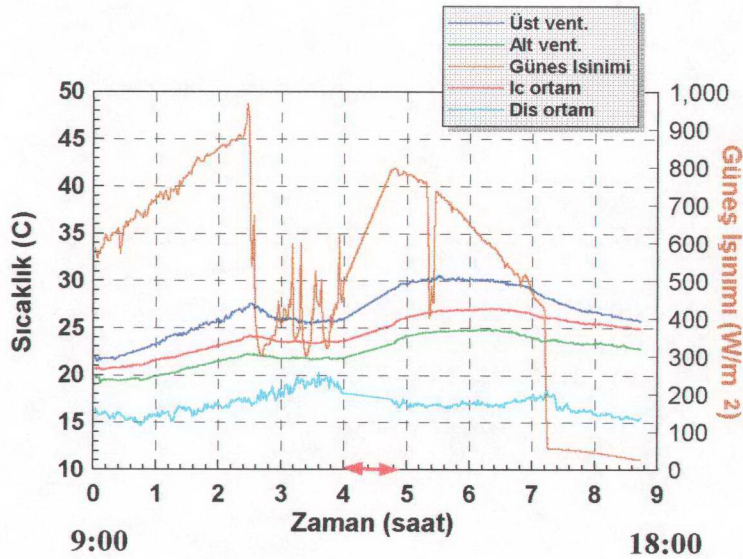
Şekil 4.53 Üst ventilasyon deliklerinde 2 noktasındaki hızın zaman serisi (29 Nisan 1998)

Ventilasyon deliklerinin %45 Kapalı Hali

Ventilasyon deliklerinin kesit alanı olarak % 45'inin kapalı olması durumunda, yani ventilasyon deliğinin açık yüksekliğinin 11cm olduğu halde, 20 Nisan 1998 tarihinde yapılan ölçümler sonucunda, Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıkları ile yatay düzleme gelen anlık güneş ışınlamının gün içindeki değişimleri Şekil 4.54 'de verilmiştir. Benzer şekilde, üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortam sıcaklıklarının değişimleri ise, Şekil 4.55 'de görülebilir. Her iki grafikten de anlaşılacağı gibi, öğle saatlerinde, yaklaşık bir saat süreyle hava bulutlanmış ve bu durum, özellikle Trombe duvarı ve cam sıcaklıkları üzerinde etkili olmuştur.

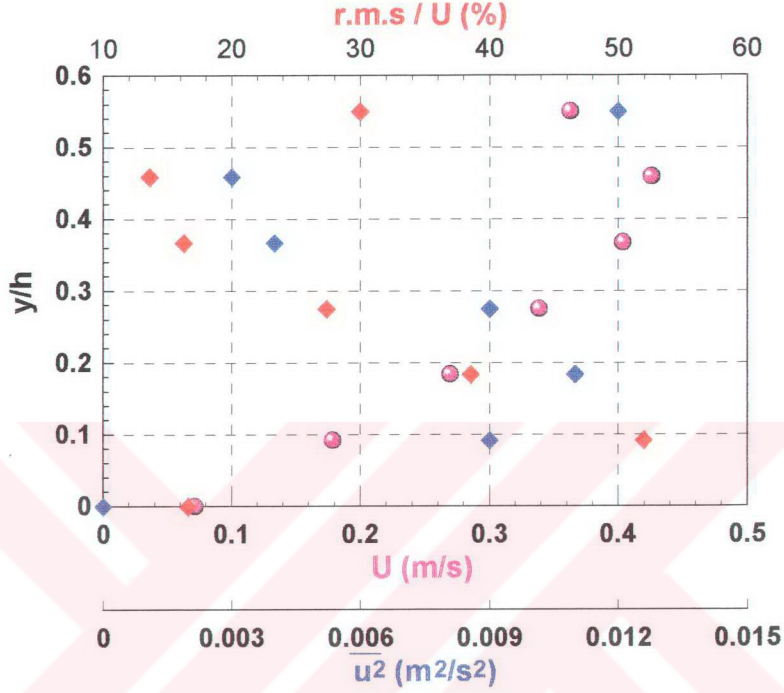


Şekil 4.54 Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının ve yatay düzleme gelen anlık güneş ışınlamının gün içindeki seyri (20 Nisan 1998)



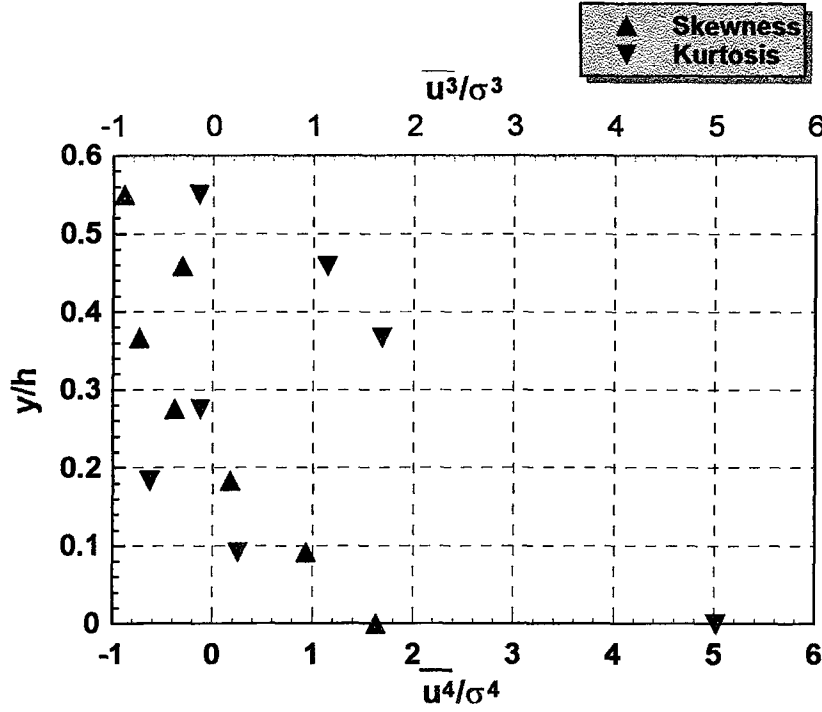
Şekil 4.55 Üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortamdaki sıcaklıkların gün boyunca değişimi (20 Nisan 1998)

Bu durum için akış karakteristikleri değerlendirilecek olursa; ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans profilleri, bir önceki duruma (% 30 kapalı halde) benzer karakterde Şekil 4.56 'daki gibi elde edilmiştir. Akış ölçümü sırasında $Ra_I/Ra_E = 4.6$ olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.56 Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (20 Nisan 1998)

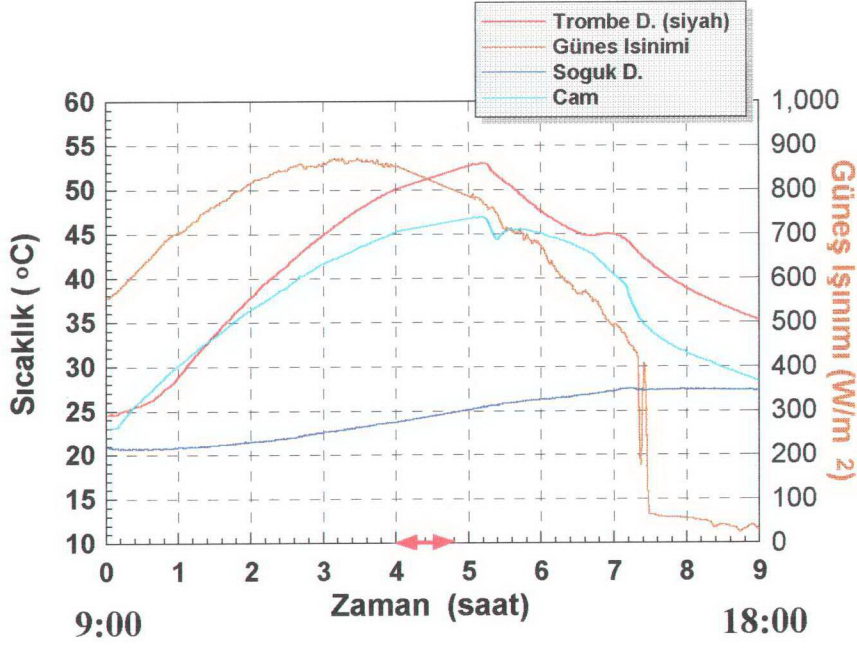
Hız profili, ventilasyon deliğinin alt cidarında ters akış izlenimi vermemekte, fakat, türbülans yoğunluğu ve varyans değerleri bu bölgede maksimuma ulaşmaktadırlar. Diğer yandan, alt cidara en yakın noktada, Skewness ve Kurtosis maksimum değerlerine ulaşmaktadırlar (Şekil 4.57). Ayrıca, Kurtosis, bir önceki duruma benzer şekilde üst bölgede yüksek değerlere ulaşmaktadır. Sonuç olarak, yine, delik yüksekliğinin küçülmesi sonucu, üst kısımda bir cidar ayrılması olduğu söylenebilir. Alt kısımda ise döngü, ventilasyon deliğinin çıkışında, oda içerisinde yer almaktadır.



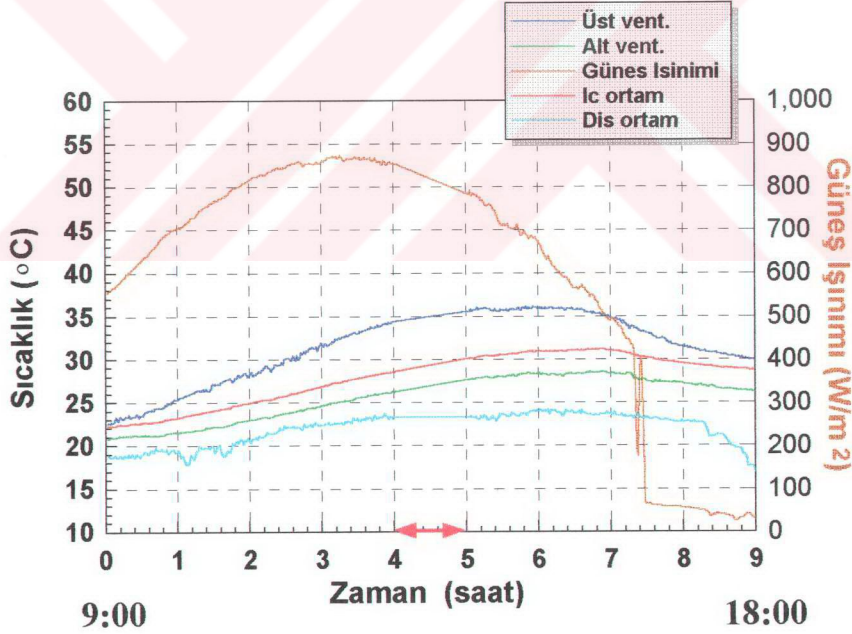
Şekil 4.57 Üst ventilasyon deliklerindeki Skewness ve Kurtosis (20 Nisan 1998)

Ventilasyon deliklerinin % 60 Kapalı Hali

Ventilasyon deliklerinin % 60 'ının kapalı olması durumunda, yani deliğin açık yüksekliğinin 8 cm olduğu durumda, 18 Nisan 1998 tarihinde yapılan ölçümler sonucunda, Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıkları ile yatay düzleme gelen anlık güneş ışıının gün içindeki değişimleri Şekil 4.58 'de verilmiştir. Benzer şekilde, üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortam sıcaklıklarının değişimleri ise, Şekil 4.59 'da görülebilir. Güneş ışıını eğrisinden de anlaşılabileceği üzere, havanın tamamen açık ve berrak olduğu bir gün yaşanmıştır. Buna bağlı olarak, sıcaklıklar da, diğer günlere oranla daha yüksek değerlerde seyretmiştir. Bu ölçümde, Trombe duvarı ve cam sıcaklıklarının saat 14:00 civarında maksimuma ulaştığı, soğuk duvarın ise her zamanki gibi çok yumuşak ve uzun periyotlu bir salınım yaptığı gözlemlenmiştir. Ventilasyon deliklerindeki ve iç ortamdaki sıcaklıklar ise oda içerisindeki katmanlaşmayı belirten bir düzen içerisinde dirler.



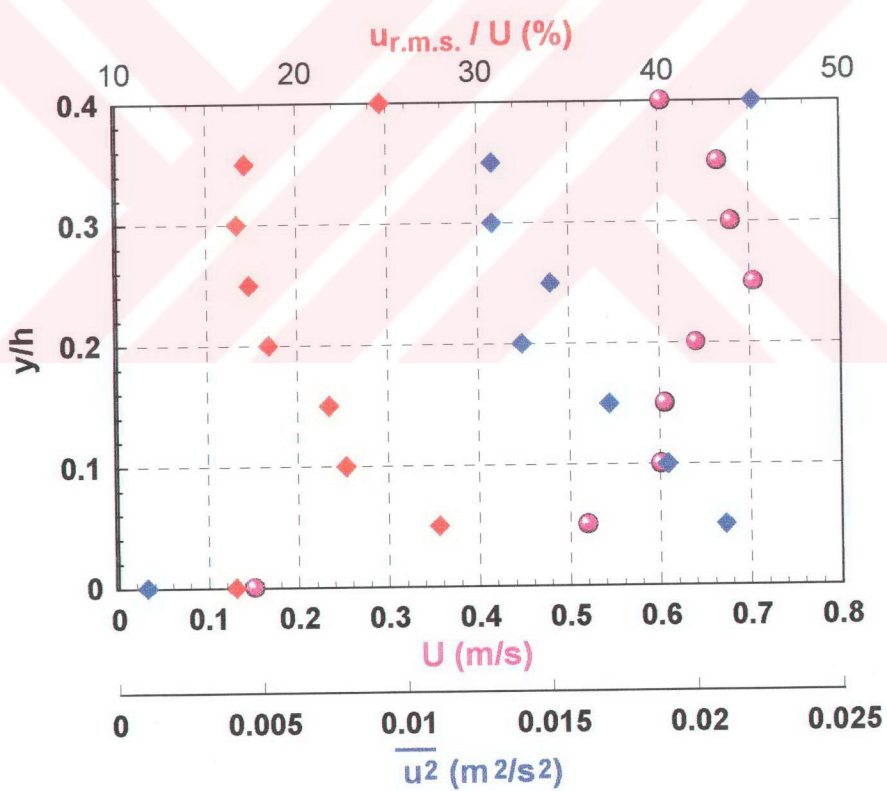
Şekil 4.58 Trombe duvarı, cam ve soğuk duvar sıcaklıklarının ve yatay düzleme gelen anlık güneş ışınlamının gün içindeki seyri (18 Nisan 1998)



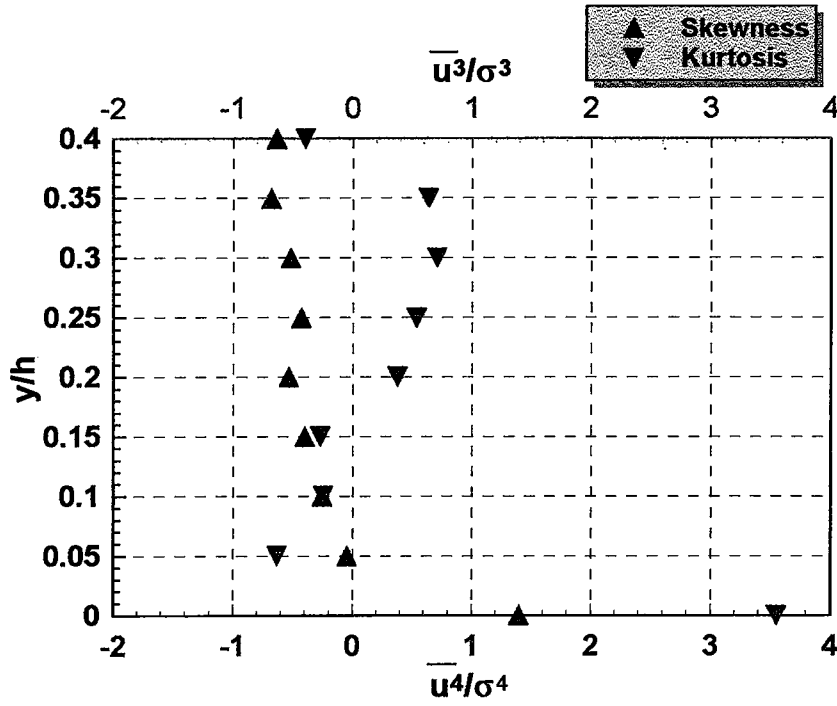
Şekil 4.59 Üst ve alt ventilasyon delikleri ile iç ve dış ortamdaki sıcaklıkların gün boyunca değişimi (18 Nisan 1998)

Yüzey sıcaklıklarının en yüksek olduğu saatlerde STA ile yapılan hız ölçümleri sonuçları Şekil 4.60 ve Şekil 4.61 'de verilmiş; $Ra_I/Ra_E = 4.1$ değerine sahiptir olduğu bulunmuştur. Burada, ortalama hız profilinin, pek düzgün olmamasına rağmen, delik yüksekliği boyunca çok küçük bir gradyana sahip olduğu; yalnızca, alt

cidarda, akışın deliğe girişte cidardan ayrılmasının etkisiyle yüksek bir gradyan geliştiği görülmektedir. Diğer bir değişle, bu delik kesiti çıkışında, diğerlerine oranla daha homojen bir akış profili ve daha düşük türbülans yoğunlukları elde edilmiştir. Hızların yüksek değerlere sahip olması, kesit alanının küçülmesi yanında sıcaklıkların yüksek olmasının da bir sonucudur. Türbülans yoğunluğu ve varyans ise alt cidarın hemen üzerinde aynı noktada maksimum değerlere ulaşmışlardır. Aynı zamanda, üst cidara çok yakın bir noktada da yüksek değerlere sahiptirler. Bunun nedeni ise, daha önceden bahsedildiği gibi kesitin daralması sonucunda, üst cidarda gerçekleşen bir ayrılmadır. Fakat, kanaldan gelen akışkanın yukarıya doğru akıyor olması, bu ayrılmanın etkisini azaltıcı bir rol oynamaktadır. Bu durum Şekil 4.61'deki Skewness ve Kurtosis profillerinde de görülmektedir.



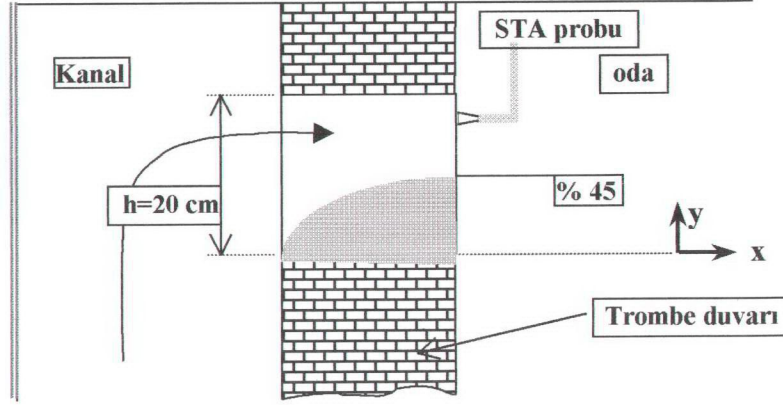
Şekil 4. 60 Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (18 Nisan 1998)



Şekil 4.61 Üst ventilasyon deliklerindeki Skewness ve Kurtosis değerleri (18 Nisan 1998)

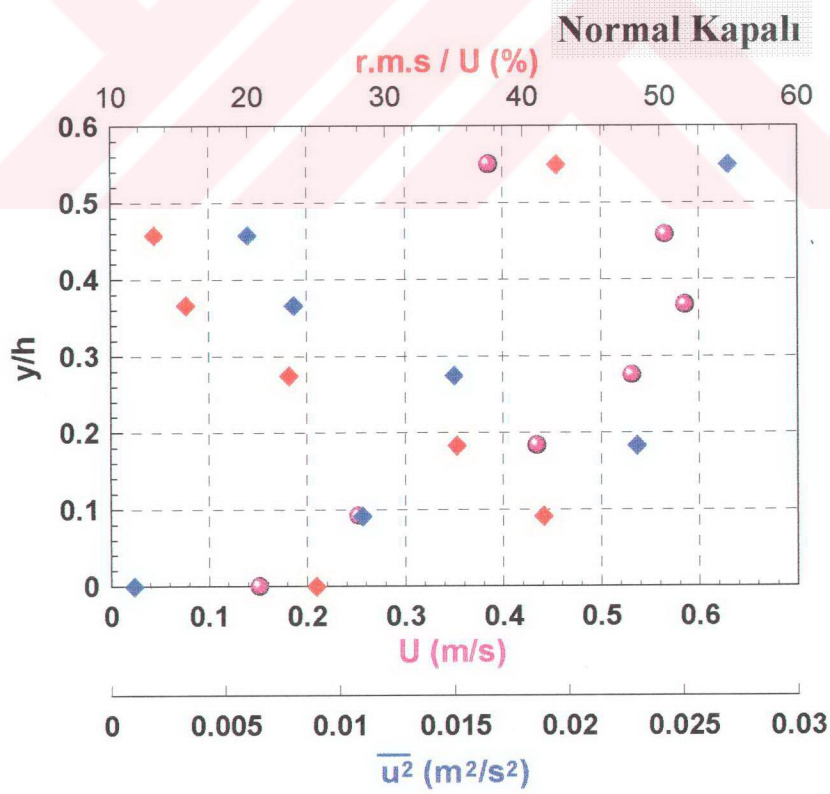
Ventilasyon Deliği Kesitinin %45 Kapatılması halinde Profil Kullanılmasının Akışa Etkisi

Üst ventilasyon deliklerinin girişinde alt yüzeyde, akışın cidardan ayrılması sonucu oluşan döngüler, ters akışlar ve buna bağlı olarak yüksek türbülans değerleri, sıcak havanın oda içerisinde düzgün dağılımı ve odanın en uzak köşelerine erişebilmesi açısından olumsuz etkilerde bulunmaktadır. Bu olumsuzluğun giderilebilmesi amacıyla yapılan bir deneyde, deliklerin %45 kapalı hali için kapatma malzemesi olarak 3 cm kalınlığındaki plakalar yerine (Şekil 4.35), akışın yüzeyden ayrılmasını engelleyen ve akışın cidarı takip ederek delikten düzgün bir profilde çıkmasını sağlayacak bir profil malzeme kullanılmıştır (Şekil 4.62). Bu yöntem Akbarzadeh v.d. [3] tarafından yapılan çalışmada da kullanılmış; fakat, herhangi bir akış ölçümü yapılmamış, sadece akış görüntülemeyle etkisi incelenmiştir.



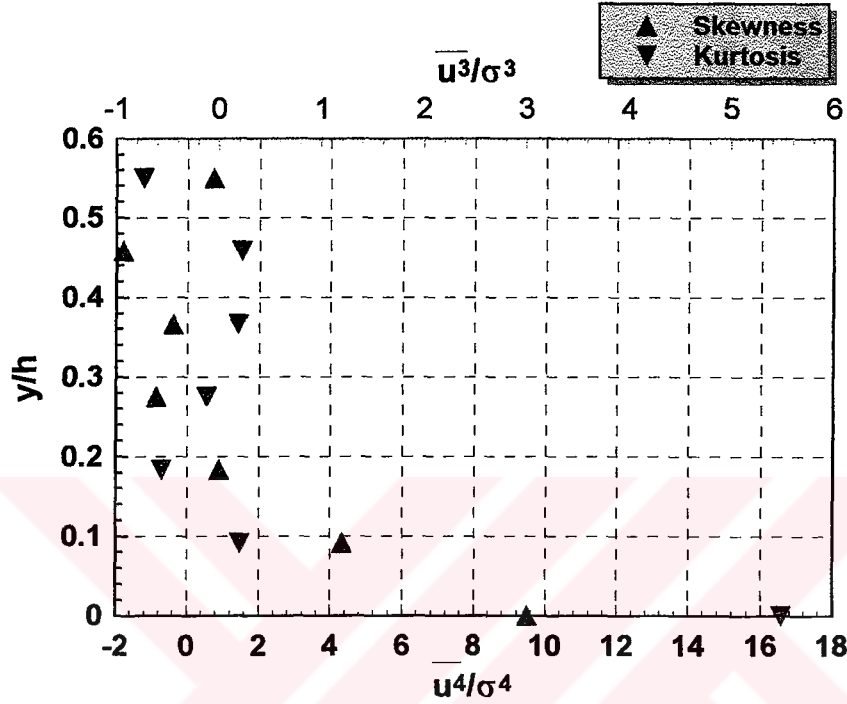
Şekil 4.62 Ventilasyon deliğinin profil malzemeyle kapatılması

Bu profilin etkisini görebilmek ve değerlendirebilmek amacıyla, ilk önce deliğin, plakalarla profilsiz (normal) olarak %45 kapatıldığı halde ölçüm alınmış, hemen arkasından, bu defa profille, yine %45 kapatıldığı halde ölçümler yapılmıştır. Normal kapalı halde yapılan ölçümler sonucu elde edilen hız profili ve türbülans yoğunluğu Şekil 4.63 'de görülmektedir.

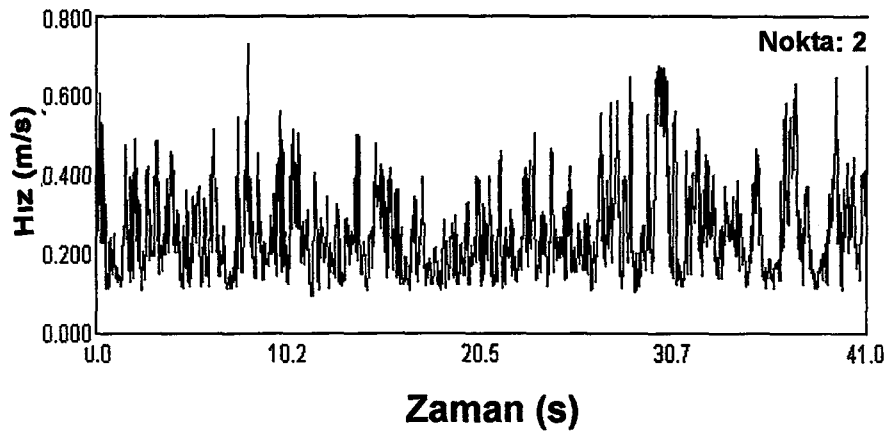


Şekil 4. 63 Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (Normal kapalı - %45)

Skewness ve Kurtosis değerleri ise daha önceki %45 kapalı hal için elde edilen sonuçlara benzer şekilde Şekil 4.64 'de görülmektedir. Akış ayrılmasının gerçekleştiği alt bölgede 2 noktasındaki hızın zaman serisine bakılacak olursa Şekil 4.65 'deki gibi bir yapı ile karşılaşılacaktır.

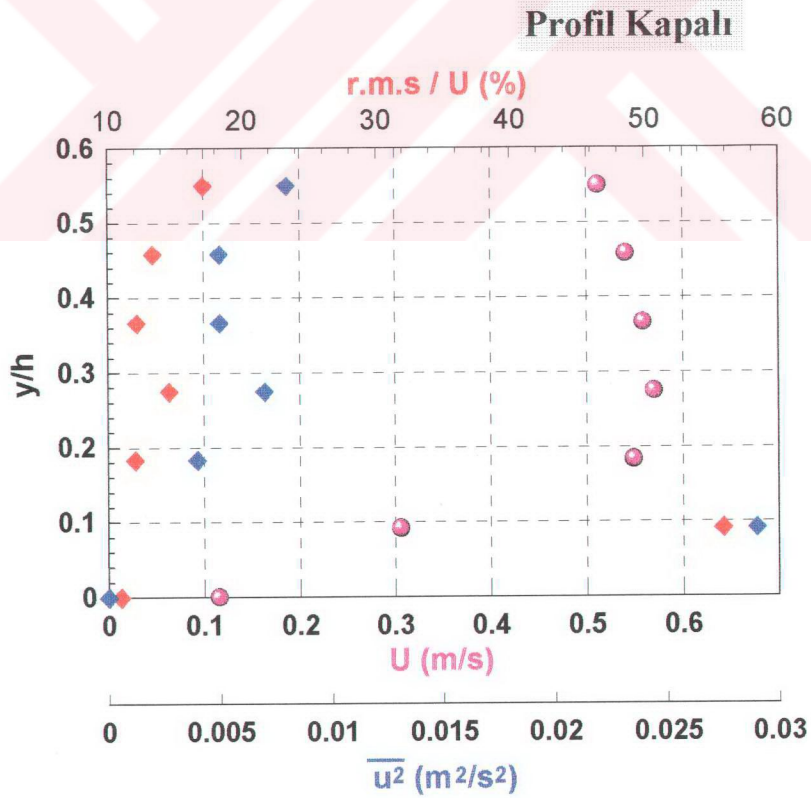


Şekil 4.64 Üst ventilasyon deliklerindeki, Skewness ve Kurtosis (Normal Kapalı-%45)

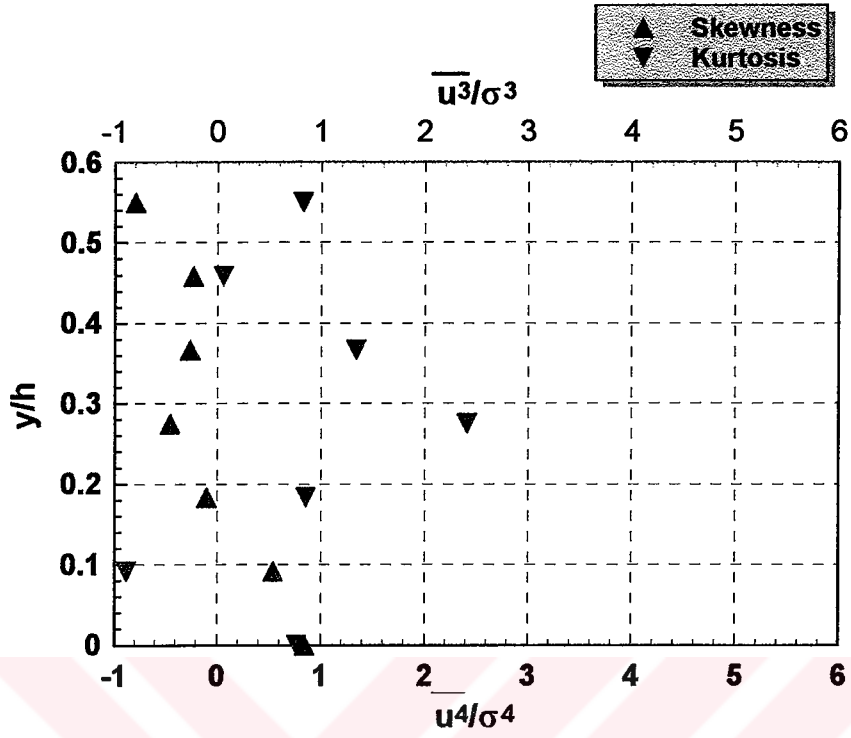


Şekil 4.65 Üst ventilasyon deliklerinde 2 noktasındaki hızın zaman serisi (Normal Kapalı -%45)

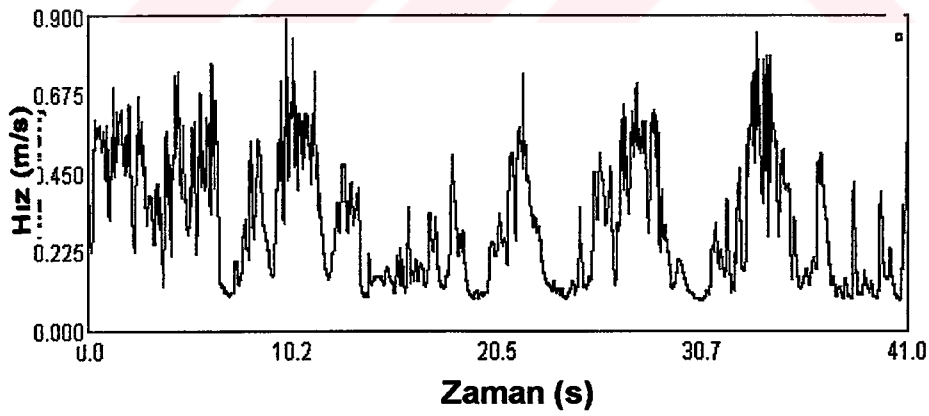
Diğer taraftan, yukarıdaki sonuçların elde edildiği ölçümün hemen ardından profil malzeme kullanılarak yapılan ölçümler sonucu, hız profili ve diğer karakteristik profiller Şekil 4.66' daki gibi elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi profil malzemeyle kapatılmış delikten çıkan akışın sahip olduğu hız profili normal kapatılmış deliktekiye göre daha düzgün bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte, türbülans seviyesi de oldukça düşük mertebelerde bulunmaktadır. Bu olumlu etkilere rağmen, 2 noktasındaki türbülans yoğunluğunda bir sıçrama görülmekte; bu durum ise akışkanın yine cidardan ayrıldığını göstermektedir. Şekil 4.67 'deki Skewness ve Kurtosis değerlerine bakılacak olursa, alt cidarda, normal kapalı durumdakinin tersine herhangi bir sıçrama görülmemektedir. Kurtosis değerinin delik boyunca ortalama 1 gibi düşük bir değerde bulunmasından, 2 noktası haricinde, akışın genelde hafif dalgalanmalar gösterdiği anlaşılmaktadır. Kritik bir nokta olan 2 noktasındaki hızın zaman serisi ise Şekil 4.68 'de verilmiştir.



Şekil 4.66 Üst ventilasyon deliklerindeki ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve varyans (Profil kapalı - %45)



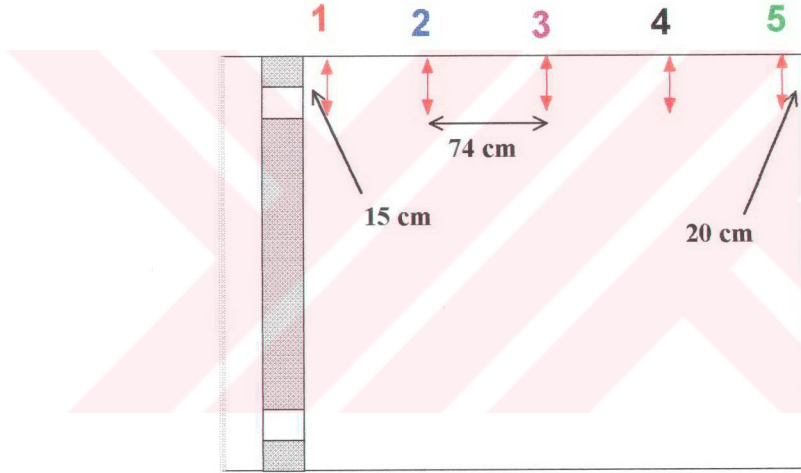
Şekil 4.67 Üst ventilasyon deliklerindeki, Skewness ve Kurtosis (Profil Kapalı-%45)



Şekil 4.68 Üst ventilasyon deliklerinde 2 noktasındaki hızın zaman serisi (Profil Kapalı -%45)

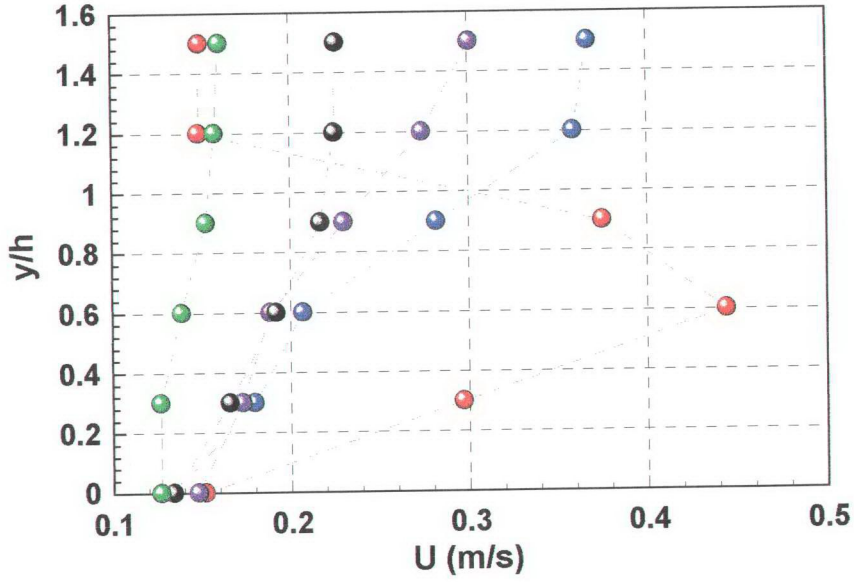
4.5 Oda İçerisinde Hava Hareketi

Ventilasyon deliklerinin tam açık konumlarında, sıcak havanın odaya girişten sonra, akışın nasıl bir karaktere sahip olduğunu anlayabilmek amacıyla odanın üst kısmında STA ile ölçümler yapılmıştır. Buna göre, tavan ile ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan 32 cm mesafelik bölgede, her biri altışar nokta olmak üzere, Trombe duvarı ile soğuk duvar arasında beş ayrı konumda hız ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.69). Tavan ile ventilasyon deliğinin üst sınırı arasındaki mesafe 12 cm (15 cm - 3 cm izolasyon kalınlığı) olduğu halde, ölçümlere tavandan 2 cm aşağıda başlanmış ve ventilasyon deliğinin alt sınırı hizasına kadar (30 cm) 6 noktada ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.69 Tavana yakın bölgede ölçüm yapılan aralıklar

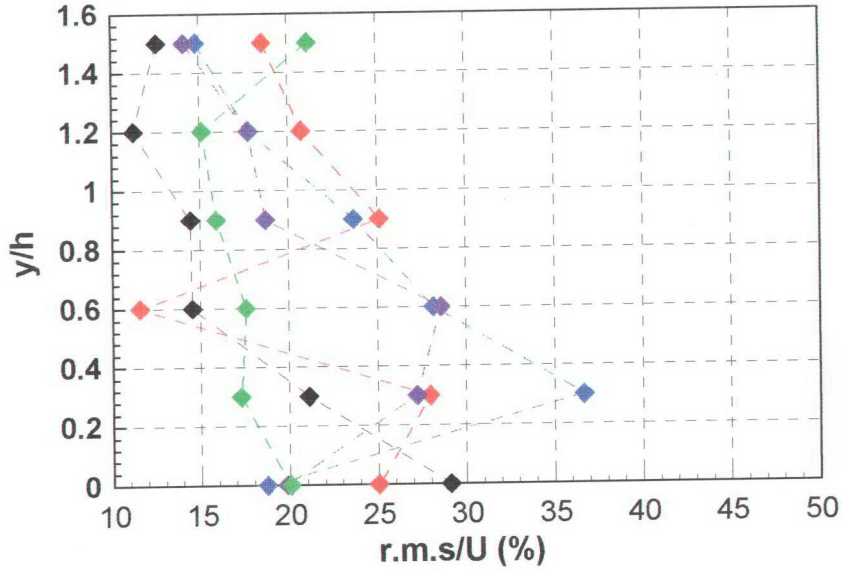
1 Mayıs 1998 tarihinde, öğle saatlerinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen ortalama hız profilleri Şekil 4.70 'de görülmektedir. Bu şekildeki profillerin renkleri Şekil 4.69 'daki renk kodlarıyla karşılaştırılarak hangi konuma ait oldukları belirlenebilir. Şekildeki profillerden, ventilasyon deliğinin 15 cm önündeki 1 konumunda sıcak hava jeti belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Trombe duvarından uzaklaştıkça, 2, 3 ve 4 konumlarında jetin tavana doğru yükseldiği ve soğuk duvara kadar hızını kaybederek tavana yapışık şekilde devam ettiği; soğuk duvara 15 cm mesafede, 5 noktasında, alınan ölçümlerde ise akışın düşük hızlara sahip olduğu görülmektedir.



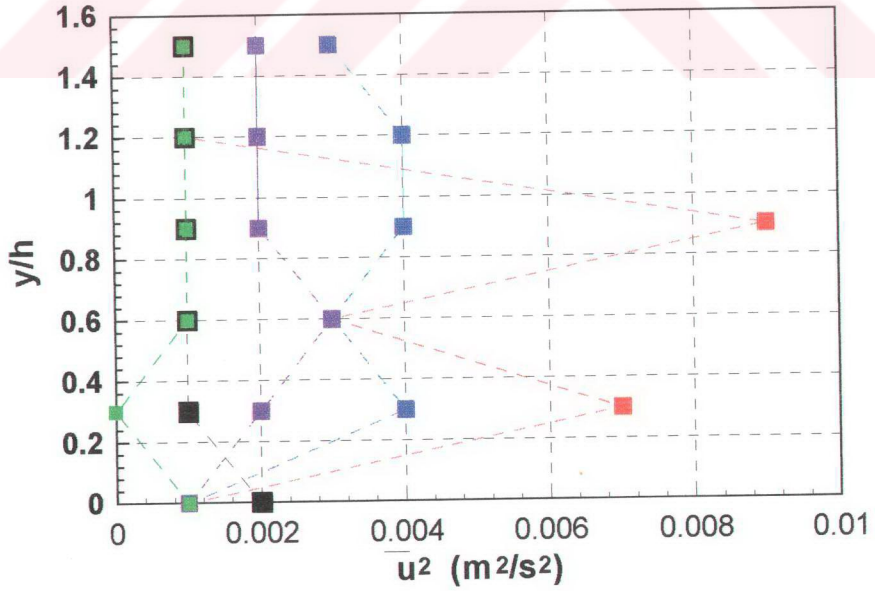
Şekil 4.70 Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki hız profilleri

Türbülans yoğunluğu (Şekil 4.71) ve varyans (Şekil 4.72) değerleri incelenecek olursa, jetin alt sınırının önce tavana doğru kaydığı (2 ve 3 konumları), soğuk duvara yakın bölgede ise (4 ve 5 konumları) etkisini kaybederek tekrar aşağıya kaydığı görülmektedir. Soğuk duvar yakınında, 5 konumunda, tavana en yakın noktada türbülans yoğunluğunun diğer konumlardaki değerine göre daha yüksek olması, soğuk duvarın üst köşesinde oluşan bir döngüden dolayıdır. Bu döngü, soğuk duvara çarpan akışkanın aşağıya yönelmesi nedeniyle oluşmaktadır.

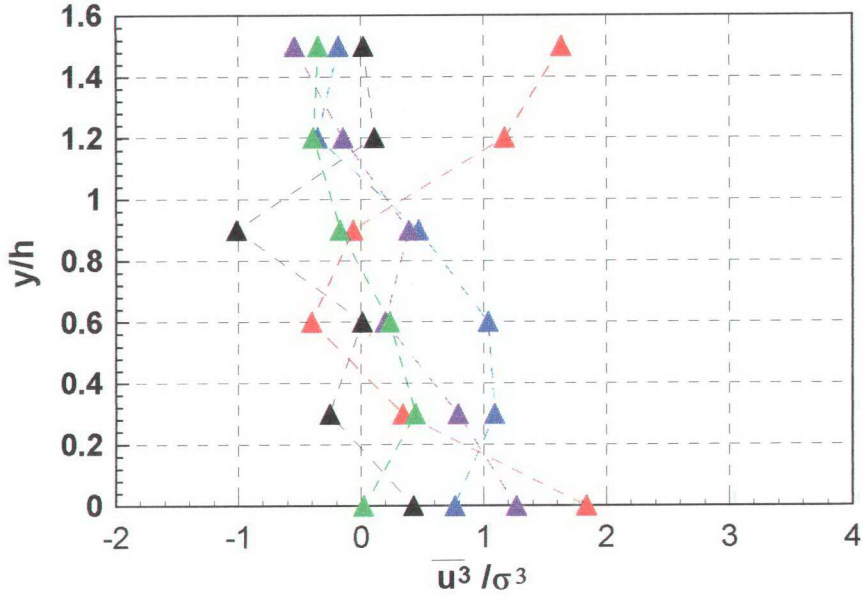
Skewness (Şekil 4.73) ve Kurtosis (Şekil 4.74) profilleri değerlendirilecek olursa, jetin üst sınırının odaya girişten hemen sonra tavana yöneldiği (1 konumu), alt sınırının ise ventilasyon deliğinin alt sınırıyla aynı hizada kaldığı görülmektedir.



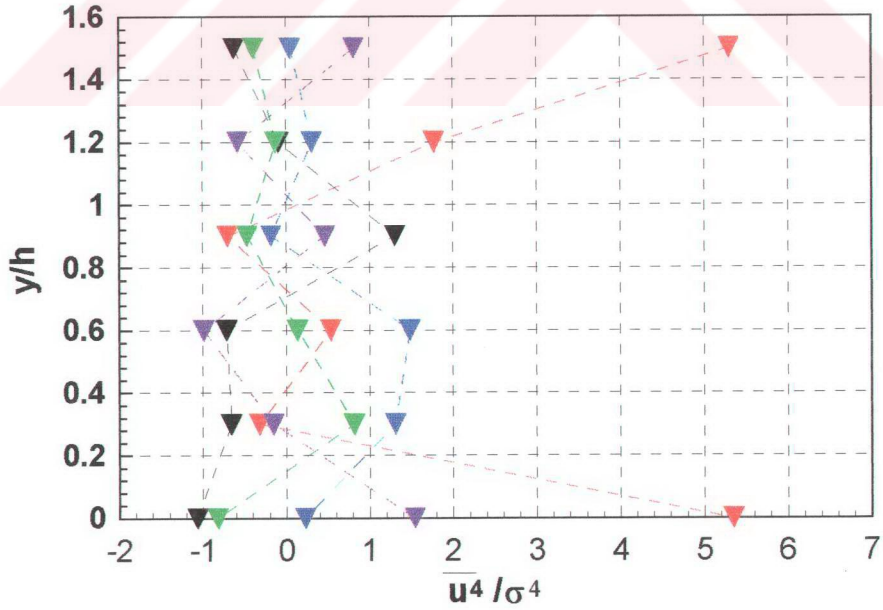
Şekil 4.71 Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki türbülans yoğunluğu değerleri



Şekil 4.72 Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki varyans değerleri

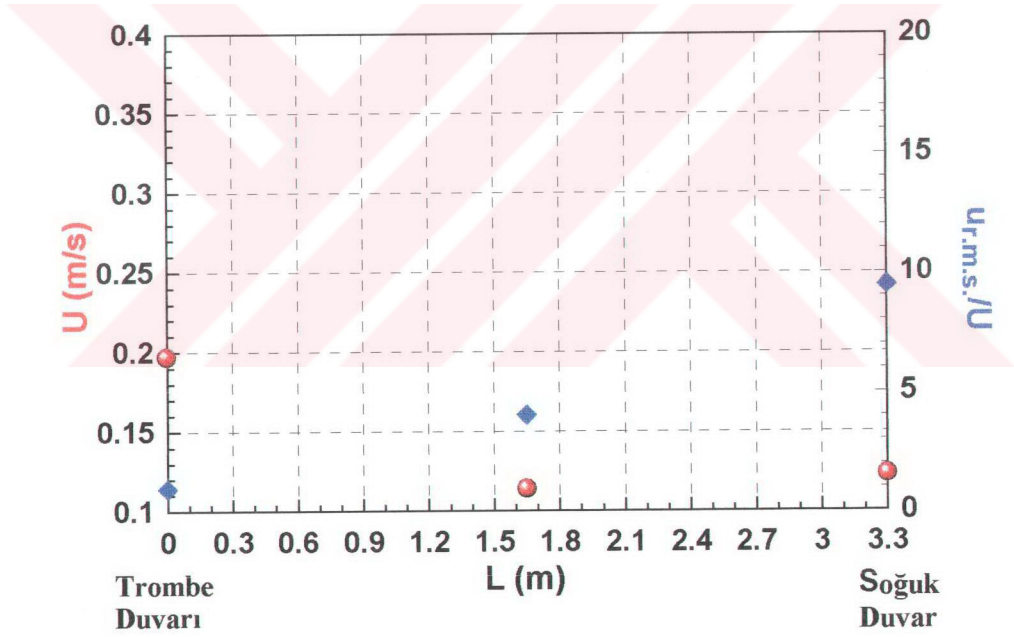


Şekil 4.73 Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki Skewness değerleri

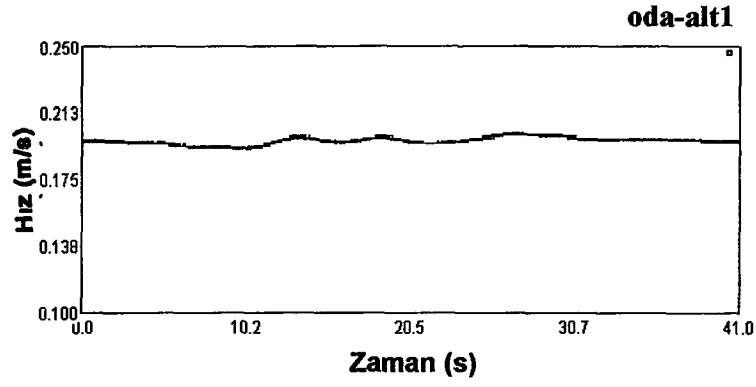


Şekil 4.74 Tavan ile üst ventilasyon deliğinin alt sınırı arasında kalan bölgede beş farklı konumdaki Kurtosis değerleri

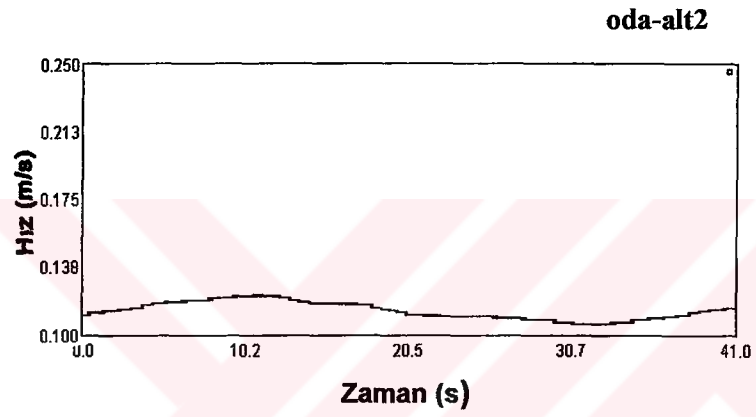
Tavana yakın bölgede üst ventilasyon deliklerinden odaya giren sıcak hava jetinin etkisiyle oluşan, yüksek hızlara ve türbülans değerlerine sahip akış alanına karşın, odanın alt bölümünde tabana yakın bölgede ise çok düşük hızlara sahip ve tamamen laminar bir akış görülmektedir (Şekil 4.75). En yüksek hız değeri, odadan kanal bölgesine hava akışının gerçekleştiği alt ventilasyon deliklerinde oluşmaktadır. En düşük hız değeri ise soğuk duvar yakınında elde edilmiştir. Türbülans yoğunlukları ise, ventilasyon deliğinde sıfıra yakın bir değerde, soğuk duvar yakınında ise dengesiz sıcaklık katmanlaşmaları sebebiyle biraz daha yüksek bir değerdedir. Bu durum, Şekil 4.76 'daki hızların zaman serisi grafiklerinde daha belirgin bir şekilde gözlemlenebilir.



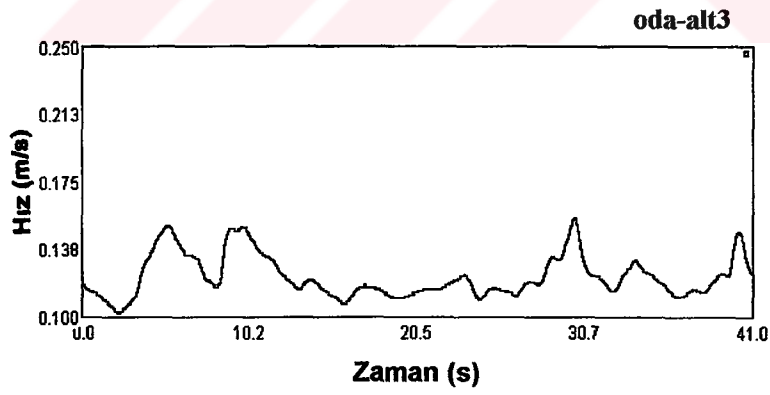
Şekil 4.75 Oda alt bölümünde, alt ventilasyon delikleri seviyesinde, ventilasyon deliğinde, odanın ortasında ve soğuk duvar yakınındaki ortalama hızlar ve türbülans yoğunlukları



(a)



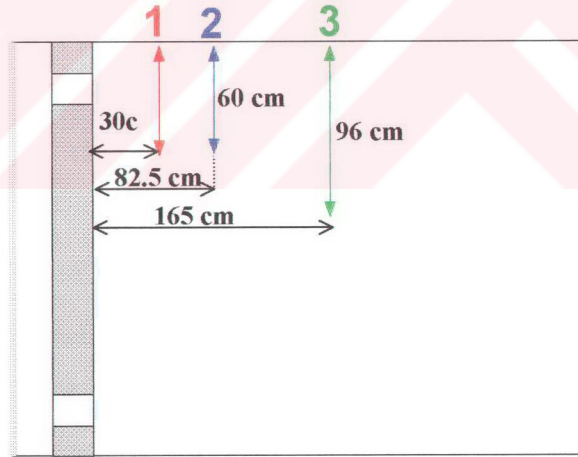
(b)



(c)

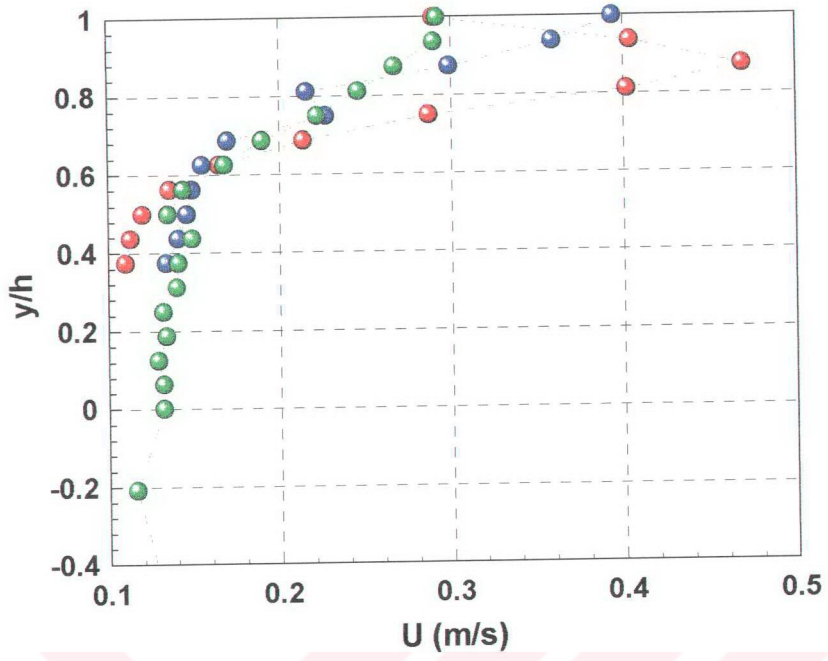
Şekil 4.76 Odanın alt bölümünde, alt ventilasyon delikleri seviyesindeki hızların zaman serileri; a) ventilasyon deliği , b) odanın ortası,c) soğuk duvar yanı

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, üst ventilasyon deliklerinden odaya giren sıcak hava jetinin tavana yapışık bir şekilde soğuk duvara kadar ilerlediği görölmüştür. Bu sonuç, Calvet v.d [10], Warrington v.d. [2] tarafından modeller üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile Ormiston v.d. [5] tarafından yapılan sayısal çalışmalarda da elde edilmiştir. Bu çalışmalarda, ayrıca, jetin alt kısmında, büyük ölçekli fakat basık bir döngü oluştuğu sonucu elde edilmiştir. Söz konusu çalışmalarda, kullanılan geometrilerde, ventilasyon deliklerinin tavan ve tabana bitişik oldukları ve oda yüksekliğinin oda genişliğine oranını veren *Kenar Oranının* (Aspect Ratio, A) 1'e eşit olduğu; bu tez çalışmasındaki geometride ise ventilasyon deliklerinin tavan ve tabandan 15 'er cm mesafede bulundukları ve oda için $A = 0.9$ olduğu gözönünde bulundurulmalıdır. Buna göre, jetin, bu tür etkilerinin bulunup bulunmadığını anlayabilmek amacıyla, 2 Mayıs 1998 tarihinde, Trombe duvarından 30 cm, 52.5 cm ve 165 cm 'lik konumlarda, tavandan itibaren 60 cm mesafe boyunca STA ile ölçümler alınmıştır (Şekil 4.77). Sadece 3 konumunda 96 cm boyunca ölçümler alınmıştır.

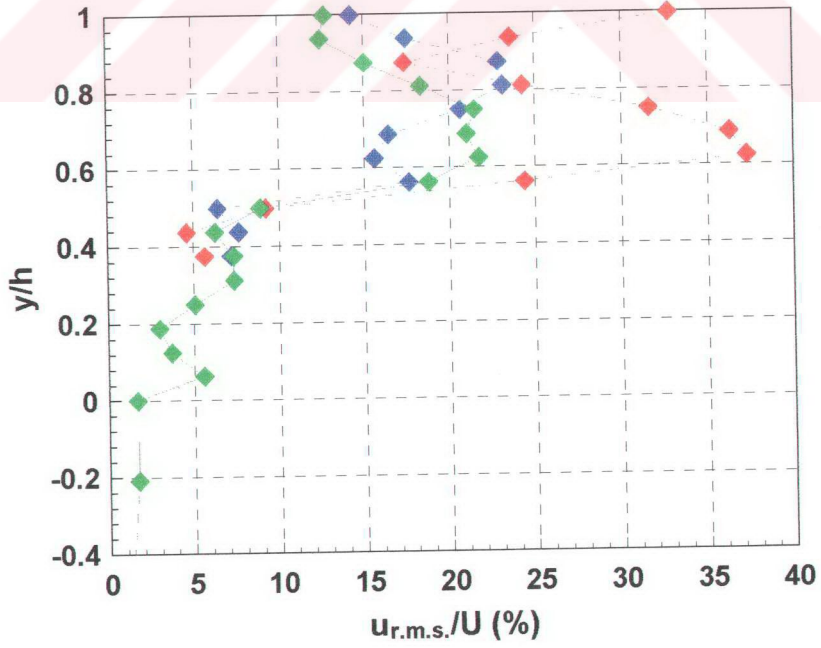


Şekil 4.77 Odada ölçüm yapılan aralıklar

Ölçümler sonucu elde edilen ortalama hız eğrileri Şekil 4.78 'de görölmektedir. Burada da jetin ventilasyon deliğinden çıkıştan hemen sonra tavana yöneldiğı ve tavana yapışık bir şekilde ilerlediğı anlaşılmaktadır. Hız profilleri, türbülans yoğunluğu profilleriyle (Şekil 4.79) birlikte ele alınacak olursa, 1 konumunda, tavana yakın noktada ve ventilasyon deliği hizasında, türbülans yoğunluğunun yüksek



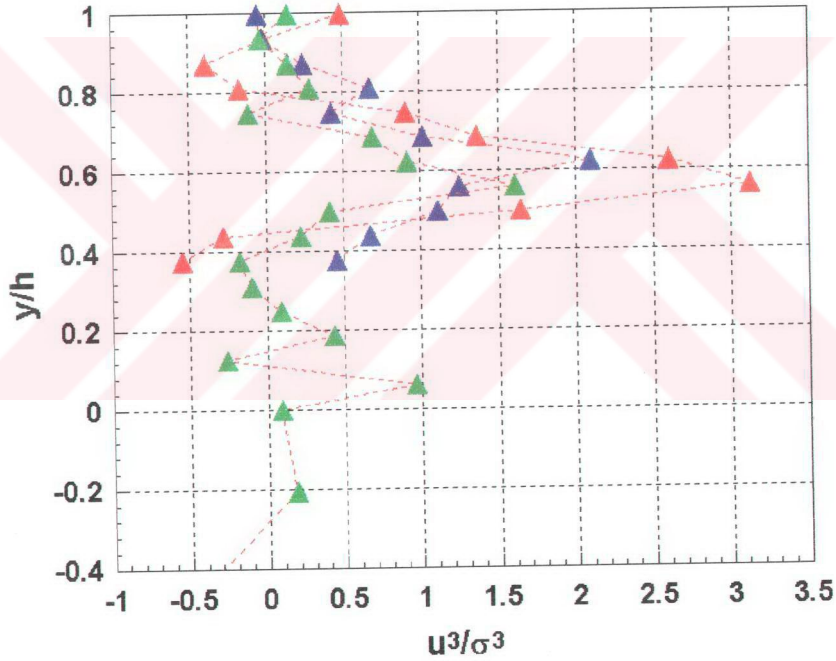
Şekil 4.78 Trombe duvarından, 30cm , 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki hız profilleri



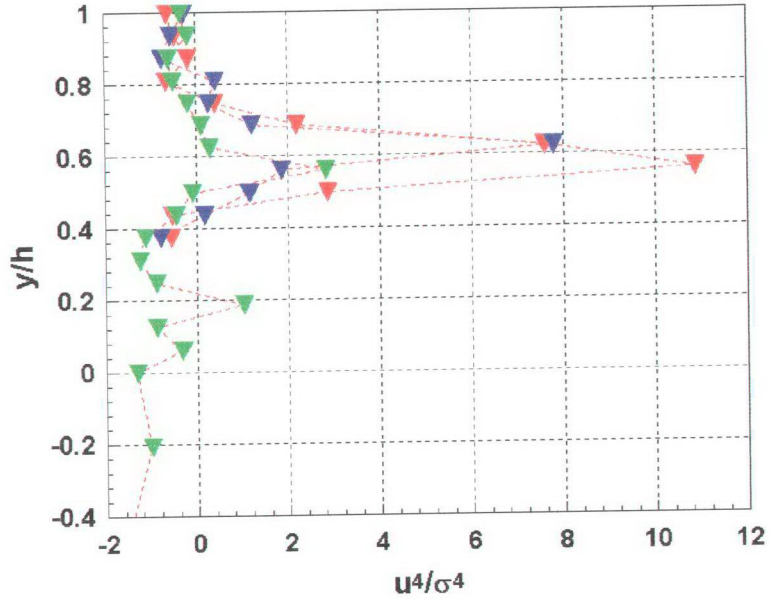
Şekil 4.79 Trombe duvarından, 30cm , 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki türbülans yoğunlukları

değerlere sahip olması, jetin üst ve alt sınırlarından kaynaklanmaktadır. 2 ve 3 konumlarındaki yüksek türbülans değerleri de tavandan aşağıya doğru büyük hız gradyanları nedeniyle oluşan döngülerden kaynaklanmaktadır.

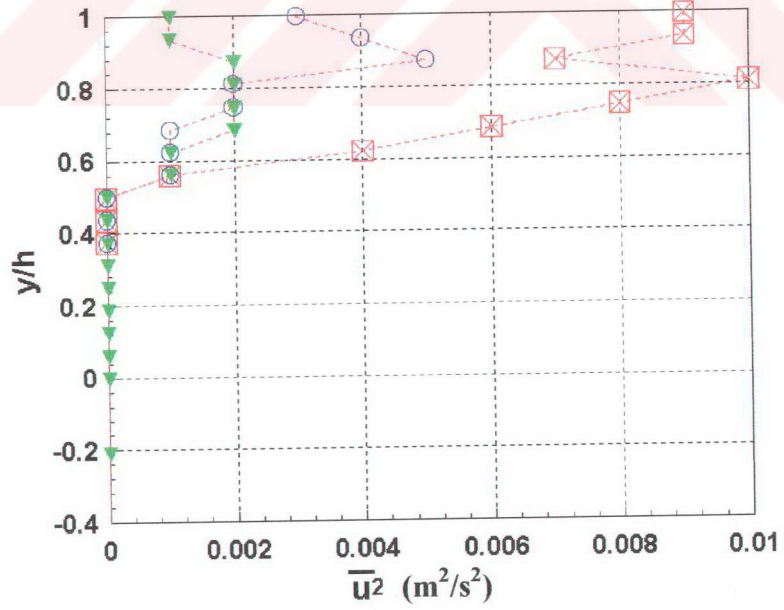
Şekil (4.80) ve (4.81) 'de, jetin her üç konumda da alt sınırı Skewness ve Kurtosis değerlerinin maksimuma ulaştığı noktalarla kendini göstermektedir. 3 no'lu konumda alt bölgelerde, her iki şekilde de küçük bir sıçrama dikkati çekmektedir. Bunun, jetin etkisiyle, büyük çaplı olası bir döngüden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Bu tür ikincil akışlar, Calvet v.d [10] ve Warrington v.d. [2] tarafından da tespit edilmiştir. Her üç konumdaki varyans değerleri ise Şekil (4.82) 'de görülebilir.



Şekil 4.80 Trombe duvarından, 30cm , 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki Skewness değerleri



Şekil 4.81 Trombe duvarından, 30cm , 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki Kurtosis değerleri

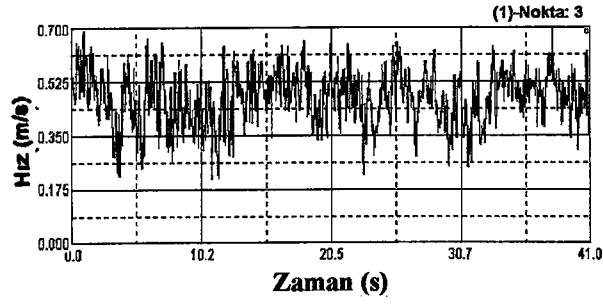


Şekil 4.82 Trombe duvarından, 30cm , 82.5cm ve 165cm mesafelerdeki varyans değerleri

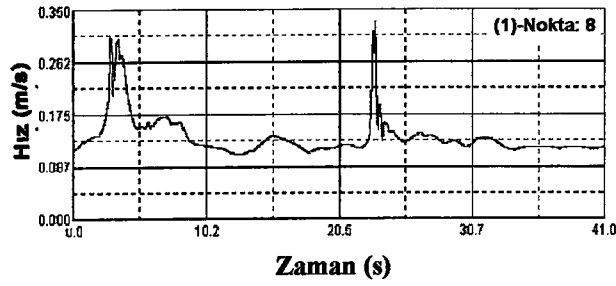
Ventilasyon deliğine en yakın konum olan 1 konumunda alınan ölçümlerde, hızın en yüksek değere sahip olduğu 3 noktası ile jetin alt sınırını belirten 8 noktasındaki türbülans özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, Şekil 4.83'de hız zaman serileri ile Şekil 4.84'de Otokorelasyon ve Spektral Güç Yoğunlukları verilmiştir. İki noktanın Zaman Ölçekleri arasındaki fark Otokorelasyon eğrilerinden açıkça görülebilir. Güç Spektrumu grafiklerinden ise 3 noktasındaki türbülans enerjisinin 8 noktasındakine göre yüksek olduğu ve ayrıca, 3 noktasında dissipasyonun 100 Hz civarında, 8 noktasında ise 20 Hz civarında gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

Benzer şekilde, 2 konumundaki kritik noktalar olan 3 ve 7 noktalarındaki hız zaman serileri Şekil 4.85 'de, Otokorelasyon ve Güç Spektrumları ise Şekil 4.86'da görülebilmektedir. Burada, 3 noktasındaki büyük ölçekli eddilerin 7 noktasındakilerle hemen hemen aynı enerjiye sahip oldukları, 1 konumundaki 3 noktasıyla karşılaştırıldığında da aynı durumun söz konusu olduğu görülmektedir. Buna karşın 2 konumundaki 3 noktasında 40 Hz civarında, 7 noktasında ise 10Hz civarında dissipasyon görülmektedir.

Odanın ortasında bulunan 3 konumu için de aynı değerlendirmeleri yapabilmek amacıyla yine, Şekil 4.87 'deki hız zaman serileri ile Şekil 4.88'deki Otokorelasyon ve Güç Spektrumu grafiklerini incelemek gerekir. Burada dikkati çeken önemli bir husus, 3 noktasında, büyük ölçekli eddilerin 8 noktasındaki büyük ölçekli eddilerle aynı enerjiye sahip olması fakat daha yüksek frekanslarda, enerji içerikleri arasında önemli bir farkın bulunmasıdır. Buna göre, jet oda içerisinde ilerledikçe toplam enerjisi azalmakla beraber, jetin sınırları dahilinde, türbülanslı enerjinin dağılımı göreceli olarak homojenleşmektedir.

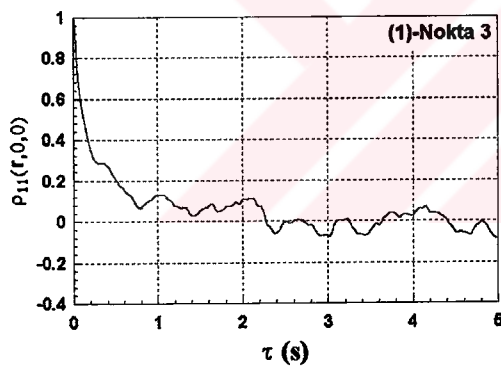


(a)

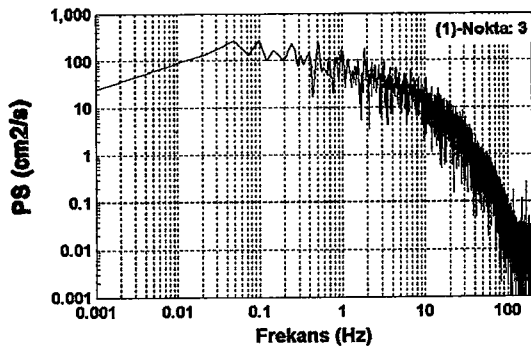
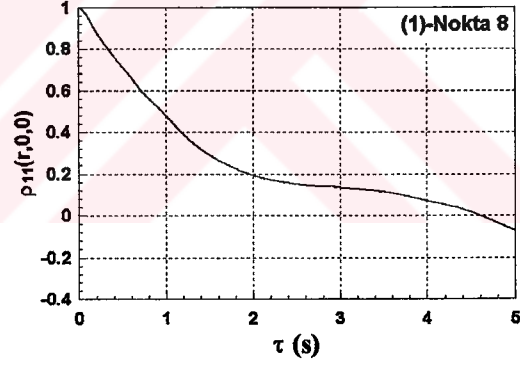


(b)

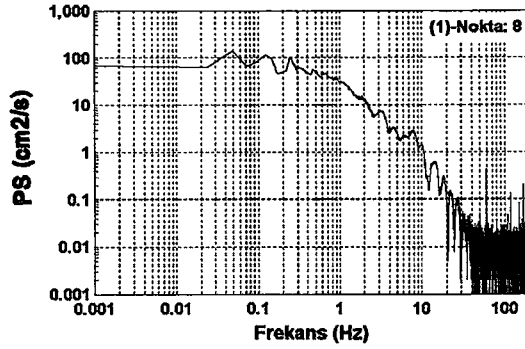
Şekil 4.83 1- konumunda, (a): 3 ve (b): 8 noktalarındaki hızların zaman serileri



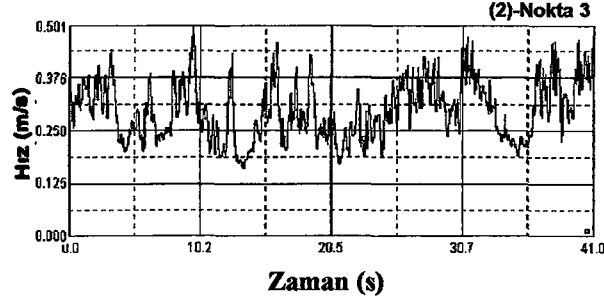
(a)



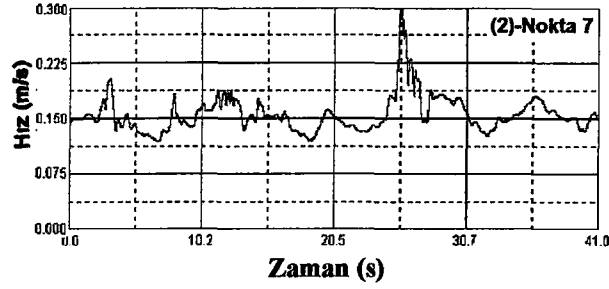
(b)



Şekil 4.84 1- konumunda; a) Otokorelasyon eğrileri ve b) Güç Spektrumları

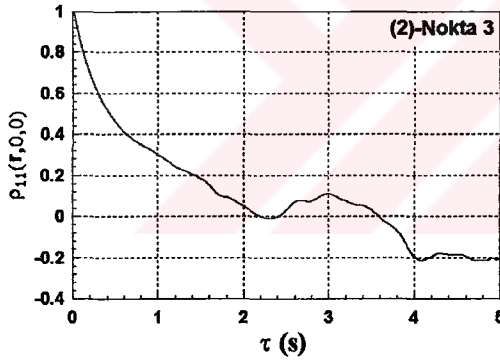


(a)

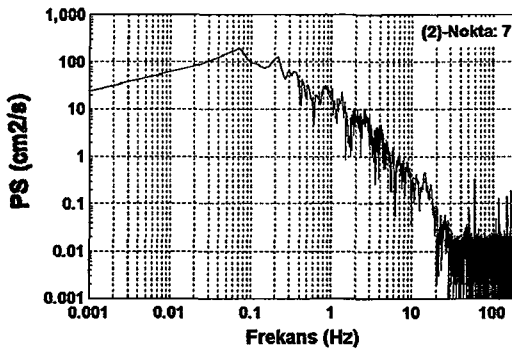
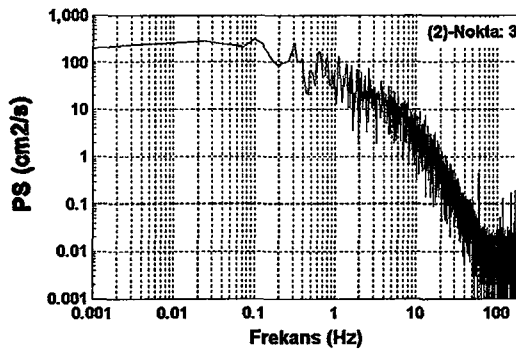
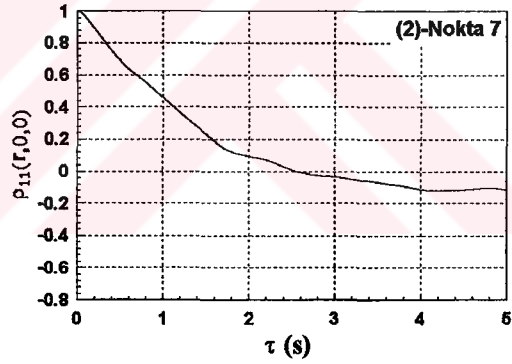


(b)

Şekil 4.85 2- konumunda, (a) 3 ve (b) 7 noktalarındaki hızların zaman serileri

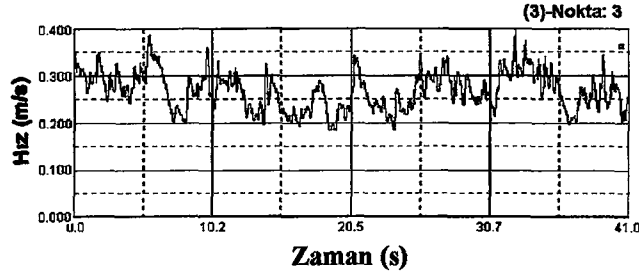


(a)

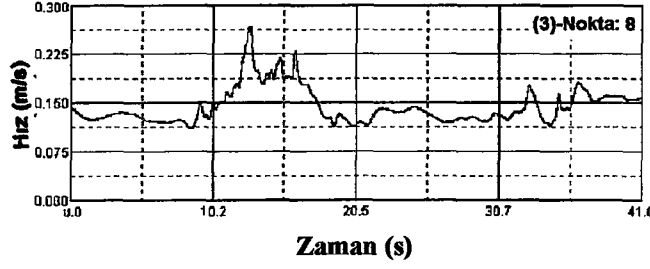


(b)

Şekil 4.86 2- konumunda; a) Otokorelasyon eğrileri ve b) Güç Spektrumları

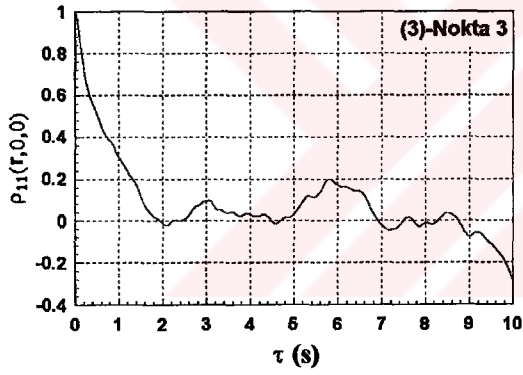


(a)

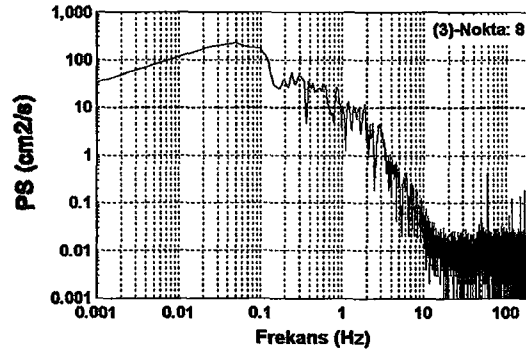
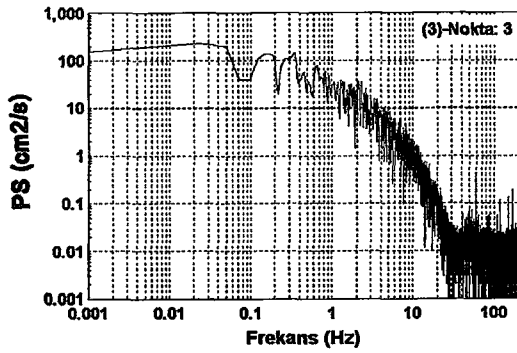
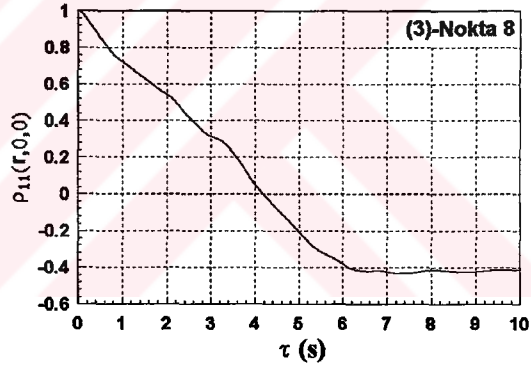


(b)

Şekil 4.87 3- konumunda, (a) 3 ve (b) 8 noktalarındaki hızların zaman serileri



(a)



(b)

Şekil 4.88 3- konumunda; a) Otokorelasyon eğrileri ve b) Güç Spektrumları

BÖLÜM 5

MODELLEME VE SAYISAL ÇÖZÜM

Fiziksel olayların çözümlenmesi için karakteristiklerinin bilinmesi gerekir. Isının ve akışkanın hareketi söz konusu olduğunda bu karakteristikler sıcaklık ve hız alanlarıdır. Dolayısıyla bir ısı transferi probleminin çözülmesi, aslında, bu problemin verilerini oluşturan hacımdaki sıcaklık ve hız dağılımının bulunmasıdır. Bu çalışma üç şekilde gerçekleştirilebilir: Ölçüm yapılması (deneysel yöntem), hareketi temsil eden diferansiyel denklemlerin matematiksel yöntemlerin sınırı içerisinde çözülmesi (analitik yöntem), bu denklemlerin cebirsel hale dönüştürülerek ağ halindeki problem alanının her bir ağ gözünde çözüm yapılması (sayısal yöntem). Momentum ve enerji denklemlerinin çözümünü içeren sayısal yöntemler, genel olarak, Sayısal Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) başlığı altında incelenirler.

Bu tezin konusunun, problemin deneysel yöntemlerle analiz edilmesi olduğu açıktır. Ancak; sayısal bir yöntem kullanılarak çözümlerin karşılaştırılması problemin yorumu açısından önemlidir. Öte yandan; burada *Türbülanslı Doğal Taşınım* problemi söz konusu olduğu için analitik yöntemleri kullanmak imkansızdır. Çünkü; her şeyden önce, denklemler birbirlerine bağımlıdır (coupled equations). Bir doğal taşınım probleminde hız alanı sıcaklık alanından bağımsız düşünülemez. Ayrıca; türbülanslı akışta Reynolds Gerilmeleri'nden dolayı, daha önce sözü edilen kapatma problemi vardır. Dolayısı ile bu tezin konusu olan problemde ancak deneysel ve sayısal yöntemler uygulanarak sonuçlar karşılaştırılabilir.

Deneysel yöntemlerin de sayısal yöntemlerin de birbirlerine göre üstünlükleri ve eksiklikleri söz konusudur. Deneysel yöntemlerdeki en önemli problem bu tezde analizi yapılan *belirsizlik*'dir (Bakınız Ek B). Sayısal yöntemler ise çözüm alanını ağlara ayırma yöntemine (sonlu hacim, sonlu eleman), koordinat sistemine,

denklemlerdeki her terimin çözümünde kullanılan yöntemle göre ayrı bir tezin konusu olabilecek ayrıntılarda gizli olan üstünlüklere ve yetersizliklere sahiptir. Fakat; çok kısa olarak özetlemek gerekirse, bir sayısal yöntemdeki problemler yakınsamama ve gerçekçi çözüm vermeme başlıkları altında incelenebilir.

Yakınsama problemlerinde grid sayısı, sınır şartları, grid büyüklüklerinin değişimi, bağımlı değişken sayısı önemlidir. Sayısal yöntemle çözülmüş bir problem yakınsayarak sonuç verse bile, doğru sonuç olduğundan emin olabilmek için yöntemi *geçerli kılmak* (validation); yani bu yöntemi deneysel sonucu alınmış bir probleme uygulayıp sonuçları karşılaştırmak gerekir.

Sayısal yöntemle problemin çözümünde, *genel denklem* olarak adlandırılan denklem yapısı kartezyen koordinatlarda şöyledir:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) + S_\phi \quad (5.1)$$

Burada, ϕ , bağımlı değişkeni (yoğunluk, hız, sıcaklık, konsantrasyon, türbülans kinetik enerjisi, dissipasyon gibi), sol taraftaki ilk terim bağımlı değişkenin zamana bağlı değişimini, sol taraftaki diğer terimler bağımlı değişkenin taşınımıyla hareketini, sağ taraftaki ilk üç terim bağımlı değişkenin difüzyonunu temsil eder. Son terim ise kaynak terimidir (Örneğin ısı üretimi). Γ ise difüzyon katsayısıdır (viskozite veya ısı yayılım katsayısı gibi).

5.1 Modelleme

Bu çalışmada kullanılan CFD2000® Paket Programı, türbülanslı akışların *standart k-ε* modeli ile çözülmesine imkan tanımaktadır. Bu tezin konusu olan ısı transferi ve akışkan hareketi gözönüne alındığında, söz konusu modeli doğal taşınımı da içerecek şekilde düzenlemek gerekmektedir. Bu düzenleme (5.1) denklemindeki kaynak terimleri değiştirilerek yapılmıştır.

Standart k - ε modelinde hız ölçeği olarak k büyüklüğü kabul edilir:

$$k = \frac{1}{2} u_i u_i \quad (5.2)$$

l_m uzunluk ölçeği olmak üzere, türbülanslı viskozite ile uzunluk ölçeği arasında

$$\nu_t \approx \sqrt{k} l_m \quad (5.3)$$

bağıntısı kurulur ve türbülans kinetik enerjisinin dissipasyonu olarak

$$\varepsilon \approx k^{3/2} / l_m \quad (5.4)$$

kabul edilerek türbülanslı viskozite

$$\nu_t = k^{3/2} / \varepsilon = c_\mu k^2 / \varepsilon \quad (5.5)$$

şeklinde tanımlanır.

Bu modelde Reynolds Gerilmeleri için *eddi viskozitesi* yaklaşımı,

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (5.6)$$

Türbülanslı ısı akısı için ise eddi difüzyonu yaklaşımı

$$-\overline{u_i T} = \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5.7)$$

kullanılmıştır.

İki denklemlili bir türbülans modeli olan standart k - ε modeli doğal taşınım terimleri ile birlikte ele alındığında hareketi temsil eden yönetici denklemler, vektörel formda, şu şekilde olmaktadır:

Süreklilik:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.8)$$

Momentum:

$$\frac{DU_i}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i \quad (5.9)$$

Enerji:

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{u_i T'} \right] \quad (5.10)$$

Türbülans kinetik enerjisinin transportu:

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v_l \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \varepsilon \quad (5.11)$$

Türbülans kinetik enerjisinin dissipasyonunun transportu:

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + v_l \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + c_{\varepsilon 3} G_k) - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.12)$$

Burada; P_k , kayma gerilmesinden dolayı türbülansın üretimi, şu şekilde tarif edilmiştir:

$$P_k = -\overline{u_i u_j} (\partial U_i / \partial x_j) = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.13)$$

G_k ise buoyant kuvvetten dolayı türbülansın üretimi veya tüketimidir:

$$G_k = -\beta g_i \overline{u_i T'} = \beta g_i \frac{v_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5.14)$$

(5.14) denkleminde görülebileceği gibi, sıcaklık katmanlaşması dengesiz olduğunda bu terim türbülans üretmektedir.

Modeldeki sabitlerin ve katsayıların değerleri, bu çalışmada Tablo 5.1 'de gösterildiği gibi alınmıştır:

Tablo 5.1 Modelde kullanılan sabitler ve katsayılar

c_μ	c_{e1}	c_{e2}	C_{e3}	σ_k	σ_ϵ	σ_θ
0.09	1.44	1.92	0.6	1.0	1.0	0.8

5.2 Sayısal Çözüm

CFD2000® Paket Programı, (5.1) denklemini Sonlu Hacim Yöntemi [34] ile çözmektedir. Yani, bu denklemi sonlu bir kontrol hacminde integre ederek cebirsel hale dönüştürmektedir:

$$\left[\frac{\Delta V}{\Delta t} + \frac{a_P}{\rho} \right] \rho \phi_P^{n+1} = \sum a_{nb} \phi_{nb}^{n+1} + S_\phi \Delta V + \frac{\rho^n \Delta V}{\Delta t} \phi_P^n \quad (5.15)$$

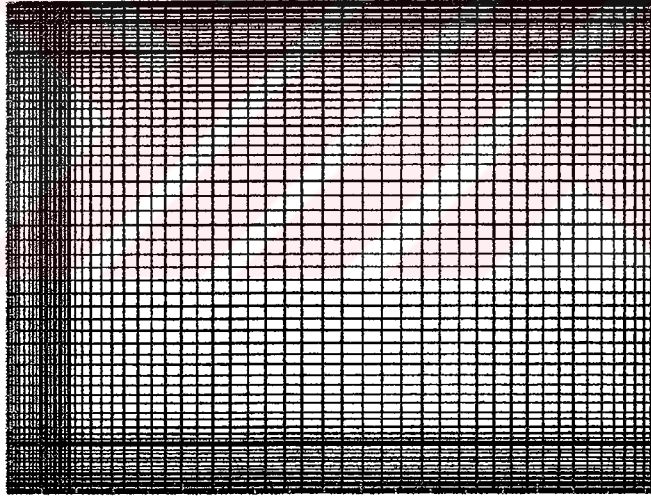
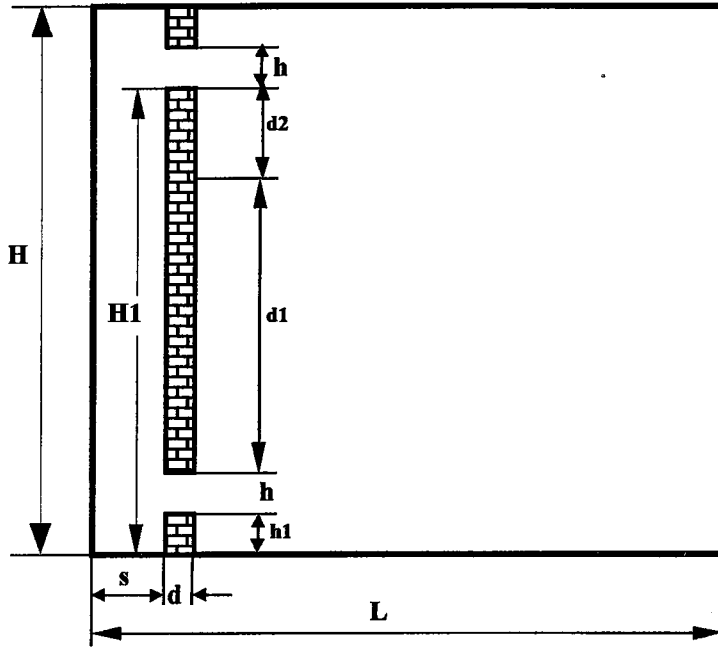
Burada (n+1) yeni zaman adımını, (n) ise eski zaman adımını temsil etmektedir. a_{nb} ve a_n katsayıları problemin geometrisine ve terimlerin integrasyon yöntemine göre belirlenir. Bu yöntemler taşınım terimleri için, Hybrid Scheme, First-Order Upwind Scheme ve Higher Order Upwind Scheme başlıkları altında paket programda seçenek olarak sunulmuşlardır.

Difüzyon terimleri için aritmetik veya harmonik ortalamalar kullanılabilir. CFD2000® paket programı, karmaşık geometrilerde de çözüm yapılabilmesi için, koordinat sistemini çözüm alanının geometrisine göre düzenlenmesine olanak vermektedir. Ancak; bu tezin konusu olan geometri için kartezyen koordinat sistemi kullanıldığından, paketin sunduğu bu olanağın ayrıntılarından söz edilmeyecektir.

Bu çalışmada CFD2000® kodu, taşınım terimlerini hibrid, difüzyon terimlerini aritmetik ortalama teknikleri ile çözecek şekilde düzenlenmiştir. Programın çözüm algoritması *Pressure Implicit with Splitting of Operators* (PISO) [35] adı verilen yöntemle göre düzenlenmiştir. Bu algoritmanın SIMPLER algoritmasından farkı tam implisit bir yöntem olmasıdır. Hem doğrudan, hem de iteratif çözümlere imkan tanıyan paket program basınç dışındaki tüm yönetici denklemleri *Alternating Direction Implicit* (ADI) yöntemine göre çözecek şekilde kullanılmıştır. Kendisi bir bağımlı değişken olmasına rağmen, bir yönetici denkleme sahip olmaması nedeni ile basınç alanının eldesi tüm sayısal problemlerde zordur. Bu çalışmada basınç alanı *Incomplete Factorization* yöntemi ile çözülmüştür [36].

Paket programda, *eş konumlu* (collocated), yani hem vektörel, hem de skaler bağımlı değişkenlerin grid noktalarının üzerinde alındığı bir ağ düzeni kullanılmıştır.

Çalışmada (5.8-5.12) denklemleri, iki boyutlu kartezyenler koordinatlarına uygulanarak, sürekli rejimdeki hız ve sıcaklık alanları elde edilmiştir. Sayısal yöntemin yakınsamasının sağlanması, çözümün gerçekçi olması ve programın çalışma zamanının kısılması amaçları gözetilerek Şekil 5.1'de gösterilen ağ düzeni kullanılmıştır. Bu modelde duvara çok yakın olan bölgelerde (viskoz sınır tabakanın hemen dışında) logaritmik kanun ve yerel dengenin geçerli olduğu kabülüne dayanan duvar fonksiyonları kullanılır [37]. Dolayısıyla; ağ düzeni yapılırken katı yüzeylerin hemen yakınında çok ince bir grid düzeni alınmıştır. Ancak grid sayısının fazlalığı çözümleme zamanını arttıracığından katı yüzeylerden içeriye doğru genişleyen gridler düzenlenmiştir. Bu arada; gridlerin kenar oranları; her iki yöndeki gradyan etkilerini gözönüne alarak belirlenmelidir. Şekil 5.1'de verilen grid düzenindeki kontrol hacmi sayısından (60 x 80) daha fazla grid kullanılması çözümü etkilememektedir.



Şekil 5.1 Problemin çözüm alanı ve ağ düzeni

Hareketi yöneten denklemlerdeki ve türbülans modeline ait ilave denklemlerdeki terimlerin (5.1) ile verilen genel denklemle karşılaştırılmaları Tablo 5.2'de görülmektedir. Bu tablodan anlaşılabacağı gibi, y momentum denklemindeki buoyant etkiyi temsil eden terime Boussinesq yaklaşımı ile ulaşılmıştır.

Tablo 5.2 Yönetici denklemlerin yapısı

	Bağımlı Değişken, ϕ	Difüzyon katsayısı, Γ	Kaynak terimi, S
Süreklilik	1	0	0
x Momentum	U	$\nu_1 + \nu_t$	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\nu_1 + \nu_t) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\nu_1 + \nu_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right]$
y Momentum	V	$\nu_1 + \nu_t$	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\nu_1 + \nu_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\nu_1 + \nu_t) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + g\beta(T - T_{ref})$
Enerji	T	$\frac{\nu_t}{\sigma_\theta}$	0
Türbülans kinetik enerjisi	k	$\frac{\nu_t}{\sigma_k}$	$P_k + G_k - \epsilon$
Türbülans kinetik enerjisinin dissipasyonu	ϵ	$\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}$	$c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (P_k + c_{\epsilon 3} G_k) - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}$

5.3 Sayısal Sonuçlar

Sınır Şartları

Şekil 5.1'deki notasyona göre sınır şartları paket programa şu şekilde verilmiştir:

Duvarlar:

$0 < y < (h_1 + h + d_1); \quad x = 0$ (Gölgelenmeyen cam yüzey)

$$u = v = 0$$

$$T = T_1$$

$(h_1+h+d_1) < y < H;$ $x = 0$ (Gölgelenen cam yüzey)

$$u = v = 0$$

$$T = T_2$$

$0 < y < H;$ $x=L$ (Soğuk duvar)

$$u = v = 0$$

$$T = T_3$$

$0 < x < L;$ $y=0$ (Taban)

$$u = v = 0$$

$$\partial T / \partial y = 0$$

$0 < x < L;$ $y=H$ (Tavan)

$$u = v = 0$$

$$\partial T / \partial y = 0$$

Yukarıda verilen sınır şartlarında gölgelenme nedeni ile $T_2 < T_1$ dir. T_3 ise soğuk duvarın sıcaklığıdır.

Blokaj (Trombe duvarı)

Akış üzerine konulmuş bir engeli temsil eden blokaj sınır şartı ise Trombe duvarının etkisini incelemek üzere kullanılmıştır. Koordinatları;

$$s \leq x \leq s+d; \quad 0 \leq y \leq h_1;$$

$$(h_1+h) \leq y \leq H_1;$$

$$(H_1+h) \leq y \leq H;$$

şeklinde verilen blokaj bölgesinde yönetici denklemler çözülmemektedir. Ancak; bu engelleri temsil eden bölgelerin yüzeylerinde sınır şartlarının verilmesi gerekir. Deneysel çalışmanın yapıldığı gerçek sistemde Trombe duvarın porozitesi ve bu duvarın içerisinden iletimle ısı geçişi ihmal edildiği için, sayısal çözümde de Trombe duvarı blokaj sınır şartı ile temsil edilmiştir. Trombe duvarının cam yüzeye bakan yüzeylerinde sabit ısı akısı sınır şartı vardır. Bu ısı akısının değeri gölgelenen kısımlarda sıfırdır.

Blokaj Yüzeyleri:

$$\begin{aligned}
0 \leq y \leq h_1; \quad & x = s+d \quad (\text{Gölgelenmeyen kısım}): \\
& u = v = 0; \quad T = T_4 \\
& x = s \quad : \\
& u = v = 0; \quad -k(\partial T / \partial x) = \dot{Q}_1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_1 + h \leq y \leq h_1 + h + d_1; \quad & x = s+d \quad (\text{Gölgelenmeyen kısım}) \quad : \\
& u = v = 0; \quad T = T_5 \\
& x = s \quad : \\
& u = v = 0; \quad -k(\partial T / \partial x) = \dot{Q}_2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_1 - d_2 \leq y \leq H_1; \quad & x = s+d \quad (\text{Gölgelenen kısım}) \quad : \\
& u = v = 0; \quad T = T_6 \\
& x = s \quad : \\
& u = v = 0; \quad -k(\partial T / \partial x) = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_1 + h \leq y \leq H; \quad & x = s+d \quad (\text{Gölgelenen kısım}) \quad : \\
& u = v = 0; \quad T = T_7 \\
& x = s \quad : \\
& u = v = 0; \quad -k(\partial T / \partial x) = 0
\end{aligned}$$

İncelenen bir çok durumda Trombe duvarının odaya bakan yüzeyindeki sıcaklık değerleri düşey boyunca sabit alınmıştır ($T_4 = T_5 = T_6 = T_7$).

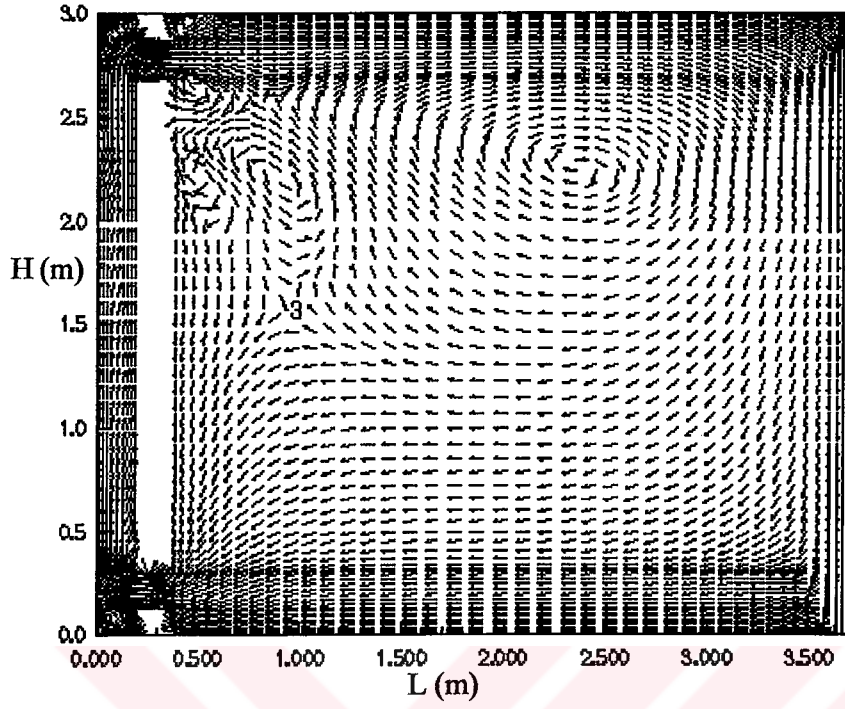
Kurulan matematiksel modelin, gerçek olayı ne derece temsil ettiğinin, anlaşılabilmesi amacıyla, sayısal çözüm yöntemi sonucunda elde edilen verilerin, deneysel verilerle karşılaştırılması gerekmektedir. Burada, Trombe duvarlı pasif sistemde yapılan deneylerden bazıları için türbülanslı doğal taşınım modellenmiş ve CFD2000® paket programıyla sayısal çözümler yapılmıştır. Bu amaçla, 9 Nisan 1998 tarihinde ventilasyon deliklerinin tam açık hali, 18 Nisan 1998 'de, ventilasyon deliklerinin %60 kapalı olması hali ve 2 Mayıs 1998 tarihli deneyde ise, sıcak jetin,

akışa etkilerinin belirlenmesi için yapılan deneyler ile kurulan modellerin sayısal çözümleri yapılmış ve aşağıda verilmiştir:

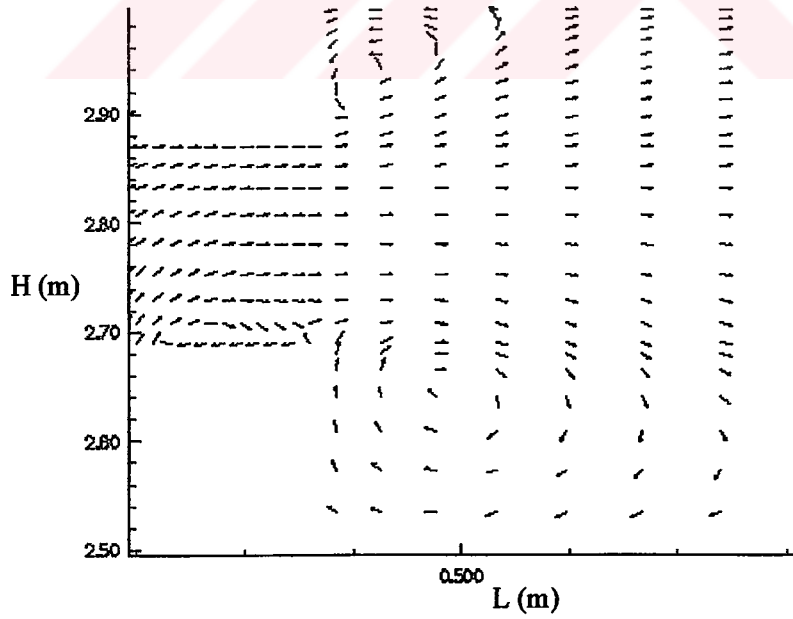
Üst Ventilasyon Deliği - Tam Açık

İlk olarak, 9 Nisan 1998 tarihinde, ventilasyon deliklerinin tam açık konumları (Bakınız Bölüm 4.4) için yapılan deneyin öğle ölçümünde, elde edilen yüzey sıcaklıkları, programa sayısal modelin sınır şartları olarak verilmiştir. Yapılan çözüm sonucunda, tüm sistem için sıcaklık ve hız alanlarının yanısıra, spesifik olarak, üst ventilasyon deliğindeki hız dağılımı çıkartılmıştır.

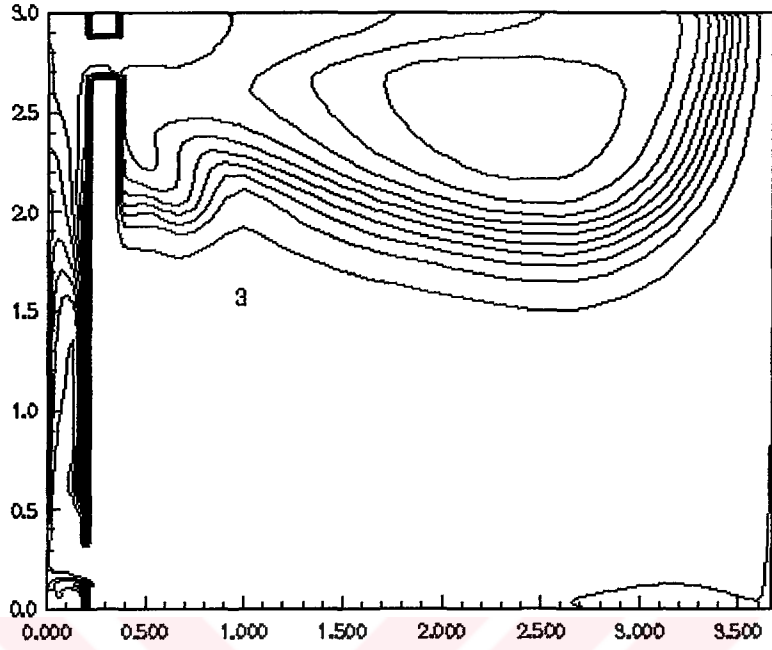
Sayısal çözüm sonucunda, ventilasyon deliklerinin tam açık konumu için elde edilen genel hız dağılımı Şekil 5.2 'de görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, ventilasyon deliği çıkışında küçük; deliğin çıkışından sonra biraz daha aşağıda, daha büyük ölçekli bir döngü oluşmaktadır. Küçük ölçekli döngü, ventilasyon deliğinden çıkan jetin etkisiyle oluşmaktadır (Şekil 5.3). Alttaki , biraz daha büyük ölçekli döngü ise, ventilasyon deliğinden soğuk duvara kadar uzanan akışın etkisiyle, odanın orta kısmında oluşan büyük ve küçük ölçekli döngülerle duvar arasında sıkışan bölgede oluşmaktadır. Hacim içerisindeki sıcaklık alanına bakılacak olursa (Şekil 5.4), hız dağılımıyla uyumlu bir sıcaklık dağılımının olduğu, özellikle, odanın ortasında oluşan büyük döngünün sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Buna göre, döngünün etkisiyle, 2.5 m yükseklikte dengesiz katmanlaşmış bir sıcak bölge oluşmuştur. Bunun yanında, tavan ile taban arasında bir sıcaklık farkının olduğu ve 1.5 m ile 2.5 m arasında sıcaklık gradyanının yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Buna karşın yatay yöndeki sıcaklık gradyanı düşüktür. Sayısal çözümle elde edilen bu sıcaklık alanı, Şekil 4.23 ve 4.27 'deki ölçümlerle uyumludur.



Şekil 5.2 Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi

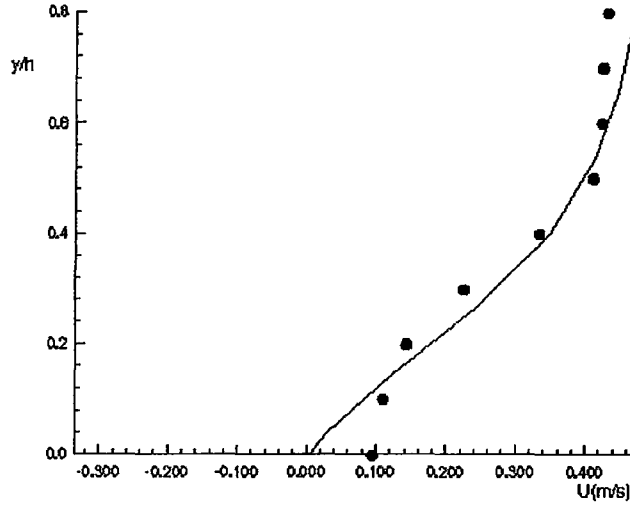


Şekil 5.3 Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda, üst ventilasyon deliğinde, CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi



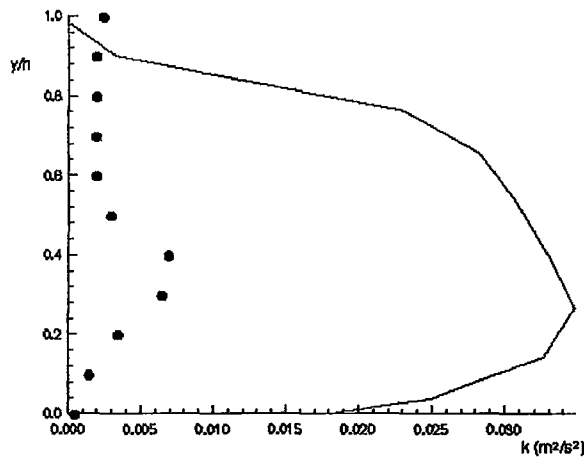
Şekil 5.4 Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda CFD çözümü sonucunda elde edilen eş sıcaklık eğrileri

Üst ventilasyon deliğindeki ve çıkışındaki akış ile bu çıkışın etkisiyle oluşan döngüler Şekil 5.3 'te daha ayrıntılı olarak görülmektedir. Burada, ayrıca, deliğin alt cidarında ve delik sınırları dahilinde küçük bir döngünün de oluştuğu göze çarpmaktadır. Bu döngü, akışın, ventilasyon deliğine girişte, köşe etkisiyle cidardan ayrılması sonucu oluşmaktadır. Bunun yanında, ventilasyon deliğinin tam çıkışında, deliğin üst sınırı ile alt sınırı arasında, hızın yatay bileşeninin profili çıkartılmış ve 9 Nisan 1998 tarihinde yapılan ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 5.5). Şekilden de görülebileceği gibi, deneysel ve sayısal veriler merteye olarak iyi bir uyum içinde bulunmaktadır. Diğer yandan, deliğin alt kısmında, deneysel veriler bir ters akış izlenimi yaratmakta, buna karşın, sayısal sonuca göre, burada pozitif bir hız gradyanı bulunmaktadır. Bu farkın nedeni, deliğin alt cidarına yakın oluşan küçük döngünün, deneysel modelde, çıkış kesitinden odaya doğru taşması, sayısal modelde ise deliğin sınırları dahilinde oluşmasıdır.



Şekil 5.5 Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda yapılan deneyde (9 Nisan 1998 - öğle ölçümü - Şekil 4.39), üst ventilasyon deliğinde elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)

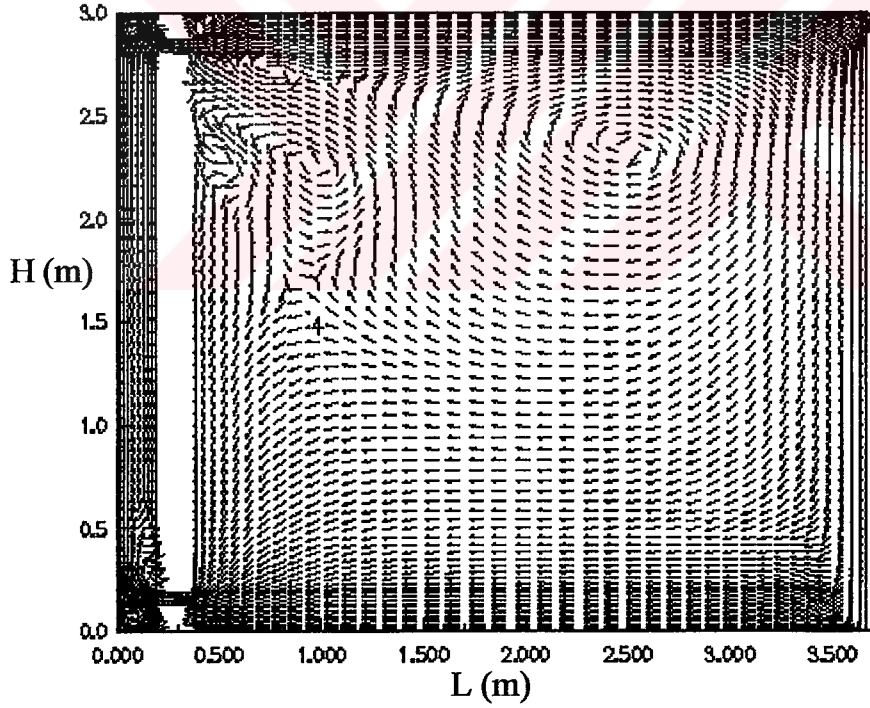
Aynı kesitteki Türbülans Kinetik Enerjisinin deneysel ve sayısal sonuçlara göre verilen eğrileri Şekil 5.6 'da görülebilmektedir. Burada, sayısal mertebeler arasında fark bulunmasının nedeni, sayısal modelin çözümünde Standart k- ϵ Türbülans Modeli'nin kullanılması ve Sıcak Tel Anenometresi'nin tek boyutlu ölçüm yapmasıdır.



Şekil 5.6 Ventilasyon deliklerinin tam açık konumunda yapılan deneyde (9 Nisan 1998 - öğle ölçümü - Şekil 4.39), üst ventilasyon deliğinde elde edilen Türbülans Kinetik Enerjisi profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD çözümü.)

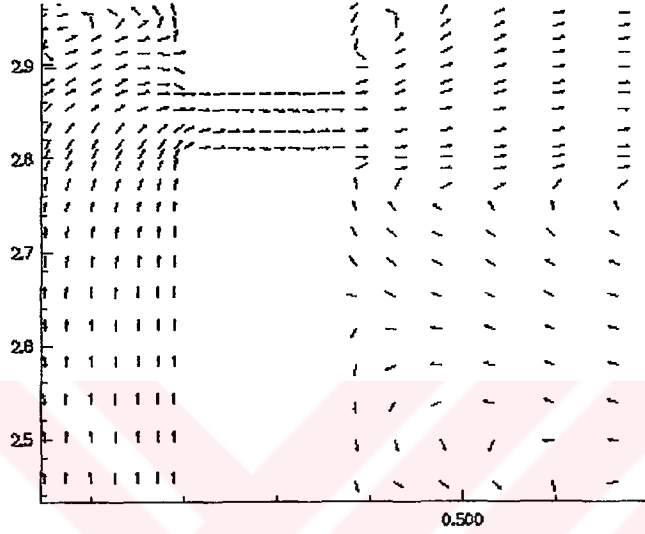
Üst Ventilasyon Deliği - %40 Açık

Ventilasyon deliklerinin, kesit alanlarının %60 'ının kapatılması halinde (yani normal kesit alanının %40 'ının açık olması hali: $h=8$ cm), 18 Nisan 1998 tarihinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen sıcaklıklar, sayısal modele sınır şartları olarak verilmiş ve sayısal çözüm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen hız alanı Şekil 5.7'de görülmektedir. Bu hız alanı, bazı küçük farklılıklar dışında, deliklerin tam açık konumu için yapılan çözümdeki hız alanıyla benzerlik göstermektedir. Tam açık konumda, jetin etkisiyle deliğin hemen çıkışında oluşan küçük döngü (Şekil 5.3); %60 kapalı konumda, merkezi, ventilasyon deliğinin biraz ötesinde olmak üzere daha basık ve geniş bir yapıda ortaya çıkmaktadır. Bunun başlıca nedeni ise kesitin daralması sonucu jet akışının hızının artmasıdır.



Şekil 5.7 Ventilasyon deliklerinin %60 kapalı konumunda CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi

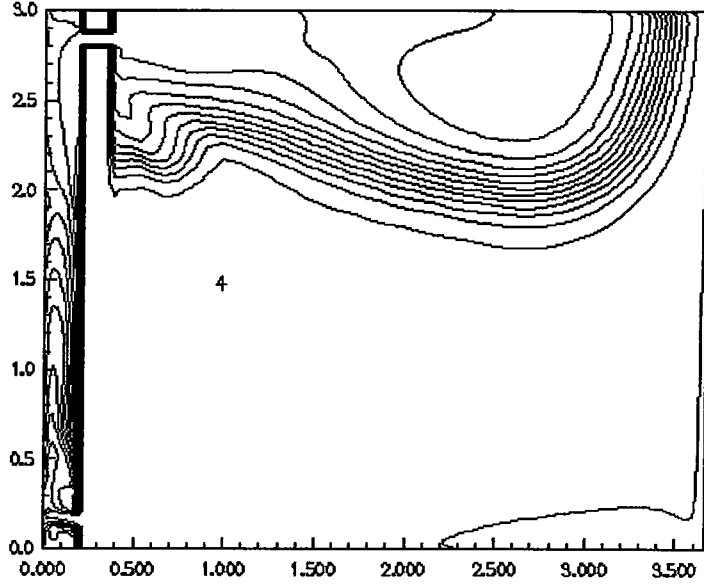
Şekil 5.8'de ise ventilasyon deliklerinin %60 kapalı durumu için üst ventilasyon deliğindeki akışın hız dağılımı görülmektedir. Delik kesitindeki akışın, tam açık durumdaki akışa (Şekil 5.3) göre daha düzgün olduğu görülmektedir. Deliğin hemen çıkışında, üst kısımda, köşe etkisiyle bir döngü oluşmakta, alt kısımda ise Şekil 5.3'de, deliğin hemen çıkışında oluşan döngü daha ileriye kaymaktadır.



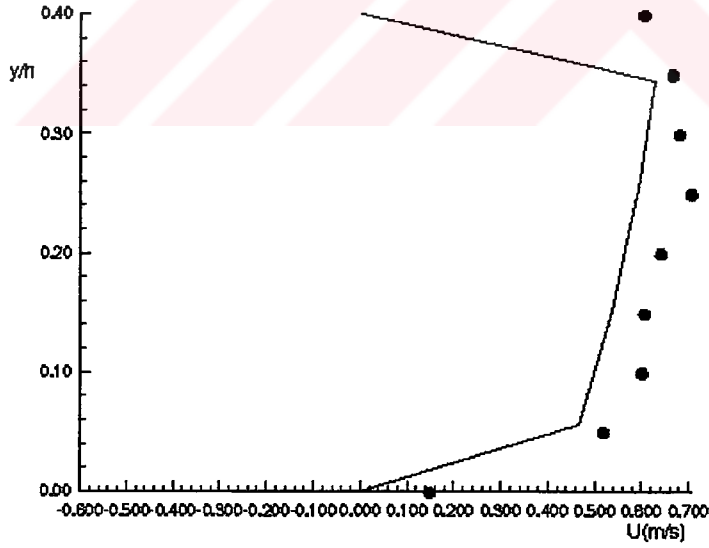
Şekil 5.8 Ventilasyon deliklerinin %60 kapalı konumunda, üst ventilasyon deliğinde, CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi

Şekil 5.9'da, hız dağılımıyla uyumlu bir sıcaklık dağılımının bulunduğu, ve oda içerisinde, bir sıcaklık katmanlaşmasının olduğu görülmektedir. Deliklerin tam açık durumunda elde edilen eş sıcaklık eğrileriyle (Şekil 5.4) karşılaştırılması, döngü nedeniyle oluşan sıcak bölgenin ve yüksek sıcaklık gradyanı oluşan aralığın 30 cm kadar yukarıya kaydığını göstermektedir.

Ventilasyon deliğinin çıkış kesiti boyunca, 18 Nisan 1998 tarihinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen hız profili ve bunun CFD sonucuyla karşılaştırılması Şekil 5.10'da verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, deneysel ve sayısal çözümler arasında hem değersel hem de şekilsel olarak, iyi bir uyum bulunmaktadır. Yalnızca, üst cidarda, probun yüzeye pek fazla yaklaştırılamamasından dolayı elde edilen hatalı ölçüm sonucu bir uyumsuzluk göze çarpmaktadır.



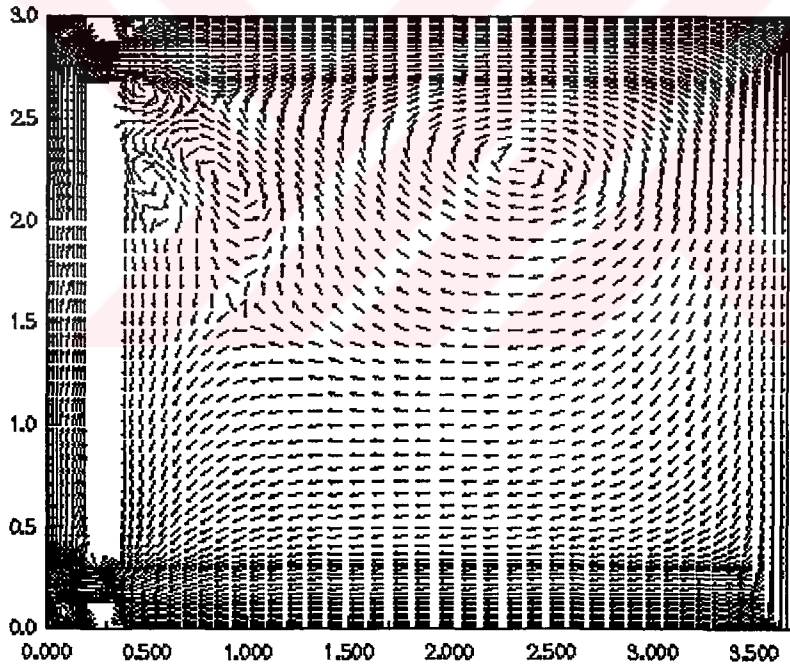
Şekil 5.9 Ventilasyon deliklerinin %60 kapalı konumunda CFD çözümü sonucunda elde edilen eş sıcaklık eğrileri



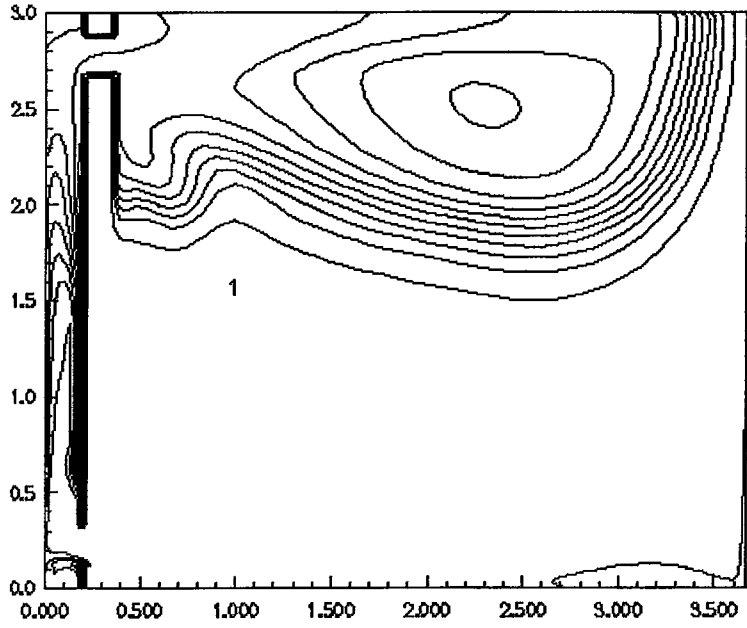
Şekil 5.10 Ventilasyon deliklerinin %60 kapalı konumunda yapılan deneyde (18 Nisan 1998 - öğle ölçümü - Şekil 4.60), üst ventilasyon deliğinde elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması
(• : Deneysel, — : CFD)

Oda İçindeki Akış

Bu bölümde, 2 Mayıs 1998 tarihinde, tavana yakın bölgede, hız ölçümlerinin yapıldığı andaki şartlar sayısal modele sınır şartları olarak verilmiş ve çözüm yapılmıştır. Sayısal çözüm sonucunda elde edilen hız ve sıcaklık alanları sırasıyla Şekil 5.11 ve 5.12 'de verilmiştir. Şekillerden, hız ve sıcaklık alanlarının, yukarıda, ventilasyon deliklerinin tam açık konumları için (buradaki modelde de ventilasyon deliklerinin tamamen açık olduğuna dikkat edilmelidir) elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdiği görülmektedir. Özellikle, ventilasyon deliğinden çıkan jetin etkisiyle, deliğin hemen altında oluşan küçük döngü ile diğer döngüler, her iki modelde benzer karakterler taşımaktadırlar.



Şekil 5.11 CFD çözümü sonucunda elde edilen hız dağılımının vektörel gösterimi

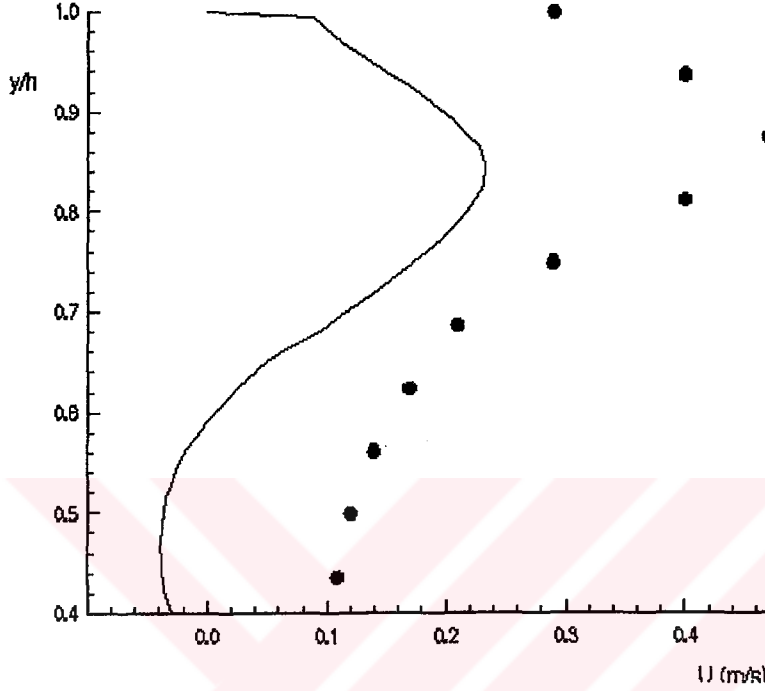


Şekil 5.12 CFD çözümü sonucunda elde edilen eş sıcaklık eğrileri

Trombe duvarından, (ventilasyon deliğinden), 30 cm mesafede, tavandan itibaren 60cm düşey boyunca, sayısal çözüm sonucunda elde edilen hız profili (Şekil 5.13) ve türbülans kinetik enerjisi (Şekil 5.14) eğrisi, deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, hız profilinin deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmektedir. Ancak; mertebe olarak belirgin bir fark göze çarpmaktadır. Özellikle, profilin alt kısımlarında, sayısal sonuçlarda bir ters akış görüldüğü halde, deneysel sonuçlarda, negatif hız değerleri görülmemektedir. Bu farklılık, Sıcak Tel Anemometresi tekniğinden kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, sayısal çözümde kullanılan türbülans modelinin doğal taşınımı tam yansıtamamasından ve Sıcak Tel Anemometresi ile yapılan ölçümlerle elde edilen türbülans yoğunluğu değerinin tek boyutlu olmasından dolayı, türbülans kinetik enerjisi eğrileri, değer olarak, uyum göstermemektedirler. Fakat, bu eğrilerin deneysel ve sayısal profilleri benzerdir.

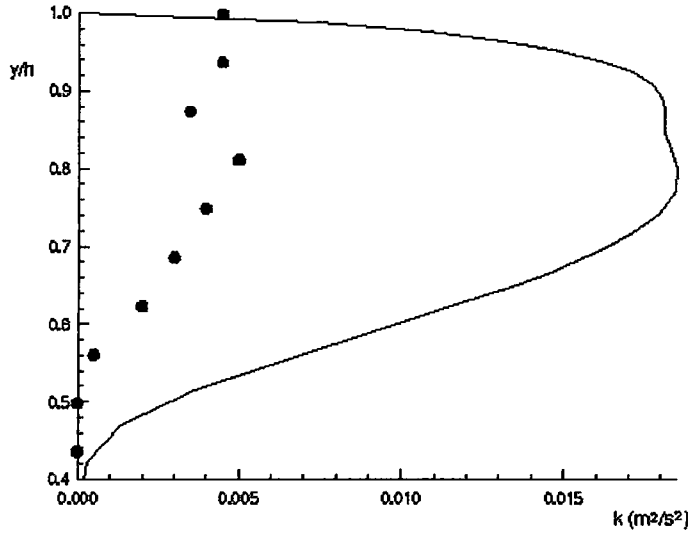
Trombe duvarından 82 cm uzaklıkta, yine tavandan itibaren 60 cm düşey boyunca sayısal ve deneysel verilerden elde edilen hız profili ve türbülans kinetik enerjisi eğrisi, sırasıyla, Şekil 5.15 ve 5.16 'da görülmektedirler. Daha önceki ölçümlerde

olduğu gibi, hız profillerinin belirli bir uyum içinde olduğu söylenebilir. Hız profillerinin alt kısımlarındaki farklılık ve türbülans enerjisi eğrilerinin uyumsuzluğu (Şekil 5.16) yine dikkati çekmektedir.

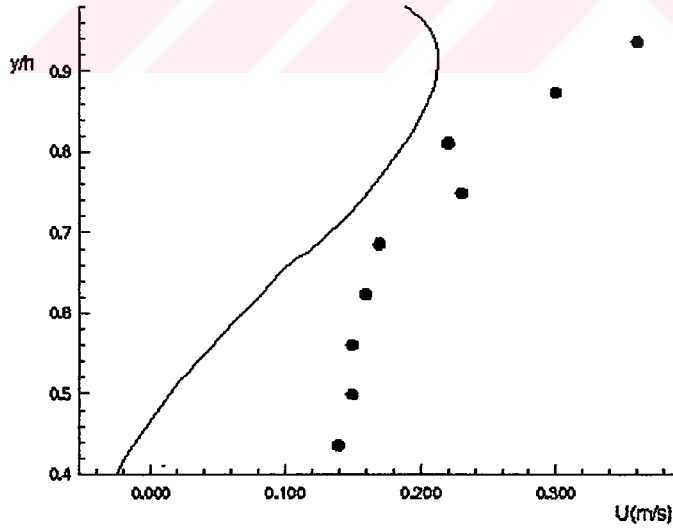


Şekil 5.13 Oda nın üst kısmında, Trombe duvarından 30cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998 - Şekil 4.78), elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)

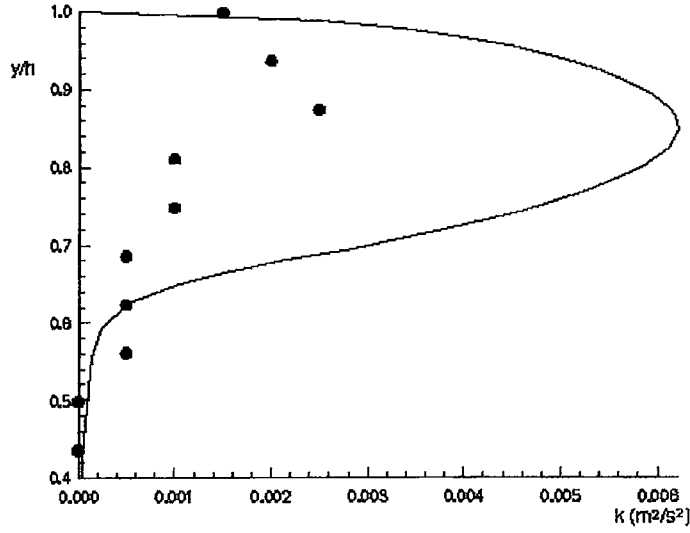
Trombe duvarından, 165 cm uzaklıkta ve tavandan, düşey olarak 1 m boyunca deneysel ve sayısal verilerden elde edilen hız profilleri Şekil 5.17 'deki gibidir. Profilin üst yarısında deneysel ve sayısal sonuçlar arasında çok iyi bir uyum bulunmasına karşın, alt kısımda, önceki profillerde de olduğu şekilde bir farklılaşma görülmektedir. Sayısal hız dağılımına göre, bu kesitteki profil, oda içerisinde oluşan büyük döngünün orta kısımlarına kadar uzanmakta ve alt kesimlerde ters akışların olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlarda ise gerek Sıcak Tel Anemometresi'nin ters akışlara verdiği reaksiyon, gerekse gerçek geometride bu oluşumun daha farklı gerçekleşme ihtimali sebebiyle, alt kesimlerde profil farklılık gösterebilmektedir.



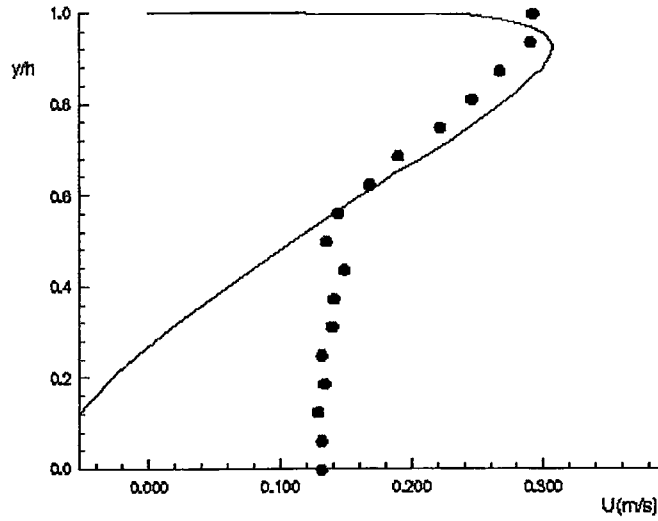
Şekil 5.14 Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 30cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998, Şekil 4.79), elde edilen Türbülans Kinetik Enerjisi profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)



Şekil 5.15 Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 82cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998 - Şekil 4.78), elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)

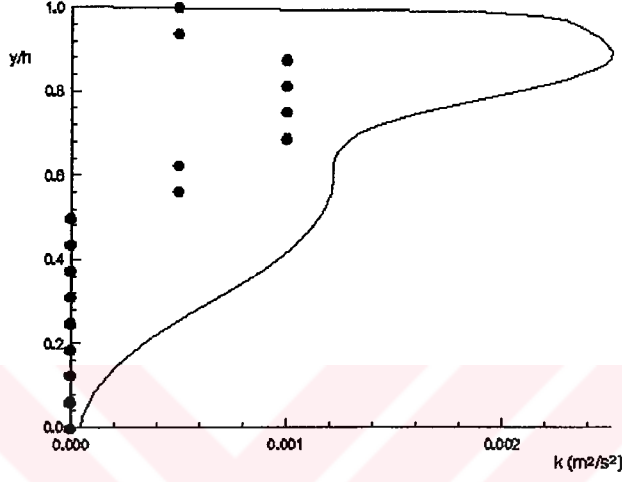


Şekil 5.16 Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 82cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998, Şekil 4.79), elde edilen Türbülans Kinetik Enerjisi profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)



Şekil 5.17 Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 165 cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998 - Şekil 4.78), elde edilen hız profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması (• : Deneysel, — : CFD)

Türbülans kinetik enerjisi eğrileri Şekil 5.18'de görülmektedir. $y/h=0.7$ civarında, hem deneysel hem de sayısal sonuçlarda, kinetik enerji gradyanının sıfır olması, jetin alt sınırının etkisiyle gerçekleşmiştir. Buna göre, her iki eğri arasında bir karakteristik benzerlikten sözedilebilir.



Şekil 5.18 Odanın üst kısmında, Trombe duvarından 165 cm mesafede yapılan ölçümde (2 Mayıs 1998 - Şekil 4.79), elde edilen Türbülans Kinetik Enerjisi profilinin CFD çözümü ile karşılaştırılması
(• : Deneysel, — : CFD)

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Binalarda, güneş enerjisinden faydalanılarak ısıtma yapmanın bir yolu olan Trombe Duvarlı Pasif Güneş Sistemlerinin, bir benzeri İTÜ Makina Fakültesi Gümüşsuyu Kampüsü'nde inşa edilmiş ve bu sistemdeki türbülanslı doğal ısı taşınımı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma sırasında, bir piranometre yardımıyla anlık güneş ışınım şiddeti, termoelemanlar yardımıyla sıcaklık, Düşük Hız Analizörü ve Sıcak Tel Anemometresi ile de akış ölçümleri yapılmıştır.

Çalışmanın başlangıcında yapılan gölge hesabına göre, ölçümlerin yapıldığı Nisan ve Mayıs aylarında, Trombe duvarı önündeki cam yüzeyi korumak amacıyla konulan kepenk kasasının, Trombe duvarının hemen üzerinde yatay bir çıkıntı teşkil etmesiyle duvarın, ventilasyon deliklerinin bulunduğu üst kısmı gölgelenmektedir. Yapılan hesaplamalara göre, Nisan ayının başlarında, Trombe duvarı yüzeyinin, %30 'luk bir kısmının gölgelendiği, Mayıs ayı sonlarında ise %70 gibi önemli bir, kısmının gölge altında kaldığı görülmüştür. Yıl içinde en yüksek gölgelenme oranının (%75) Haziran ayı içinde, en düşük gölgelenme oranının (%10) ise Aralık ayında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kış aylarında düşük, yaz aylarında ise yüksek gölgelenme oranları istenen bir durum olsa bile, güneşin bol olduğu fakat sıcaklıkların düşük seyrettiği ilkbahar aylarında gölgelenme olması uygun değildir. Bu durumda, gölgelenme elemanı kullanılacaksa, boyutları ve konumu optimize edilmiş sabit bir eleman veya açısı istenilen şekilde ayarlanabilen hareketli bir gölgeleme elemanı, ya da direk aç kapa yapılabilen bir kepenk sistemi kullanılmalıdır.

Trombe duvarının ısı davranışını görebilmek amacıyla yapılan günlük sıcaklık ölçümleri sonucunda, duvarın üst kısmındaki gölgelenmelerin etkisi belirgin bir

şekilde ortaya çıkmaktadır. Buna göre, gölgelenmeyen bölgeyle, gölgelenen bölge sıcaklıkları arasında 10-15 °C 'lik bir fark olduğu görülmüştür. Bunun yanında, cam yüzeyde, cam tabakalarının yerleştirildiği plastik çerçevelerin (Pimapen®), Trombe duvarı üzerinde neden olduğu gölgelenmelerin de yerel olarak etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, cam örtünün konstrüksiyonunda çerçeve kalınlıklarının olabildiğince küçük tutulması gerekmektedir.

Çeşitli karakteristik noktalarda yapılan sıcaklık ölçümleri ve bunlara paralel olarak yapılan güneş ışıınımı ölçümleri birlikte değerlendirildiklerinde, Trombe duvarı siyah yüzeyinin, cam yüzeyin, kanal bölgesinin ve üst ventilasyon deliklerinin güneş ışıınımındaki değişimlere çok hızlı reaksiyon gösterdikleri; buna karşın, alt ventilasyon delikleri ile oda içi ve soğuk duvar sıcaklıklarının gösterdikleri reaksiyonun çok yavaş olduğu belirlenmiştir.

Ölçülen sıcaklık değerlerinden, kanal ile oda arasındaki akışı (Termosirkülasyon) ve dolayısıyla ısı taşınımını karakterize eden Dışsal Rayleigh Sayısı, Ra_E , ile kanal içerisindeki akışı karakterize eden İçsel Rayleigh sayısı, Ra_I , yanında Nusselt boyutsuz sayısı da hesaplanmıştır (Bakınız Bölüm 4.3). Elde edilen sonuçlara göre, odanın ısı kazancının, Ra_E ile doğru, Ra_I ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Ra_I , kanal içindeki sirkülasyonu karakterize ettiğinden, kanaldaki bu sirkülasyon ise ısı taşınımını artırıcı bir etkiye sahip olduğu için, Nusselt, Ra_I ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Fakat, Ra_I 'nin pozitif değerlerde artması, taşınım ile ısı kazancının yanısıra, camdan olan ısı kaybının da artmasına neden olmaktadır. Bu değer, negatif yönde azalması durumunda ise taşınım ile ısı kazancı yine artmakta, fakat camdan ısı kaybı söz konusu olmamaktadır. Yapılan ölçümlerde, Ra_I değerinin, genellikle pozitif değerlerde bulunduğu, gözönüne alınırsa, saydam örtü olarak çift cam veya saydam yalıtkan malzemeler kullanılması sistem performansı açısından avantaj sağlayacaktır. Diğer taraftan, yapılan genel değerlendirmeler sonucunda, düşey duvara gelen günlük toplam güneş ışıınımı ve odanın toplam ısı kazancı bazında, sistemin %10-15 civarında bir verime sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun başlıca nedenleri arasında, camın güneş ışıınımının bir kısmını yansıtması, camdan gerçekleşen ısı kaybı ve ısıtılan hacmin (odanın) küçük olmasından (9 m²) dolayı, ortam sıcaklığının kısa sürede yükselmesi sonucu, taşınım ile ısı transferinin azalması

sayılabilir. Buradan hareketle, Trombe duvarının güneşlenme süresi dışındaki zamanlarda mutlak suretle bir örtüyle yalıtılması, cam yerine saydam yalıtkan malzemelerin uygulanabilirliğinin araştırılması ve ısıtılan ortam taban alanının Trombe duvarı yüzey alanına oranının 1 'den büyük tutulması gereklidir.

Yapılan akış ölçümleri sonucunda ise, özellikle üst ventilasyon deliklerindeki akışın türbülanslı ve gün içinde değişik hız değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın alt ventilasyon deliklerinde ise tamamen laminar bir akış söz konusudur. Üst ventilasyon deliklerinde türbülansın en önemli sebebi, akışkanın ventilasyon deliğine girerken yaptığı doksan derecelik dönüş nedeniyle yüzeyden ayrılması sonucu oluşan döngüdür. Bundan dolayı ventilasyon deliğinin alt cidarında bir ters akış ortaya çıkmaktadır. Deliklerin kesit alanları küçültüldüğünde bu etki azalmakta ve deliğin alan olarak %60 kapatılması halinde hemen hemen ortadan kalkmaktadır. Bu sonuçlar yapılan sayısal modellemelerin çözüm sonuçlarıyla da çok iyi bir uyum içinde bulunmaktadır. Ventilasyon deliğinde oluşan bu döngülerin ortadan kaldırılması amacıyla yapılan diğer bir denemede, akışkanın deliğe girerken yüzeyden ayrılmasını engellemek amacıyla aerodinamik profile sahip bir yönlendirici yerleştirilmek suretiyle düzgün bir akış elde edilmiştir. Bu nedenle, ventilasyon delikleri için optimum bir delik alanı tespit edildikten sonra, bu delik bir aerodinamik yönlendiriciyle de desteklenmelidir. Böylece, akışı olumsuz etkileyebilecek döngüler ve ters akışlar bertaraf edilmiş olur. Akışkanın delikten çıkıp odaya geçişi sırasında bir sıcak hava jeti oluşmaktadır. Bundan dolayı, odanın üst kısmındaki akışta, türbülans yoğunluklarının yüksek olduğu görülmüştür.

Sayısal çözümler sonucu elde edilen hız profillerinin deneysel sonuçlarla iyi uyum sağladıkları; fakat türbülans kinetik enerjisi eğrilerinin, kullanılan türbülans modelinin düşük Reynolds sayıları için uygun olmamasından ve bu çalışmada kullanılan Sıcak Tel Anemometresi ile ancak tek boyutlu ölçüm yapılabilmesinden dolayı, deneysel ve sayısal olarak farklı karakteristikler gösterdikleri görülmüştür. Sayısal sonuçlardan elde edilen hız alanına göre delik çıkışında ve yaklaşık 80 cm ötesine kadar akışın karmaşık olduğu görülmektedir. Odanın orta kısmında, büyük bir döngünün oluştuğu sayısal verilerden anlaşılmakta ve bu oluşum deneysel sonuçlarla desteklenmektedir. Sayısal sonuçlardan elde edilen sıcaklık alanına göre,

bu büyük döngü, tavana yakın bölgede dengesiz olarak katmanlaşmış bir sıcak bölge oluşmasına neden olmaktadır. Böylece, oda içerisinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmesi için bu döngünün alt sınırının tabana temas edeceği optimum kenar oranı tespit edilmelidir. Ayrıca, üst ventilasyon deliklerinin iyi dizayn edilmeleri ve çıkışlarına, aşırı basınç düşümüne sebep olmayacak yönlendiricilerin yerleştirilmesi ile odaya giren sıcak havanın hacim içerisinde daha homojen bir şekilde dağılımı sağlanabilir.

Kanal bölgesindeki ısı transferi ve akışın, sistemin genel performansı üzerinde önemli etkiye sahip olması; fakat, bu bölgenin güneş ışınlamına maruz kalması ve yüksek sıcaklık salınımlarının bulunması direkt akış ölçümü yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, bu geometrinin laboratuvar modelleri kurularak, bu bölgedeki akış daha ayrıntılı olarak incelenmelidir. Ayrıca, kanal bölgesindeki havanın ışınlama ısı kazancı ve siyah yüzeyden ışınlama olan ısı kayıpları da gözönüne alınmalıdır.

Bu çalışmada yapılan ölçümler ve sayısal analizin değerlendirilmesi sonucunda, yalnızca Trombe duvarlı değil , diğer pasif sistem tasarımları ve ayrıca kapalı hacimlerin klima sistemleriyle ısıtma, havalandırma konularında (zorlanmış taşınım) yapılan araştırmalar açısından önemli bilgiler elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] DUFFIE, J., BECKMAN, W., Solar Energy Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, New York , (1991)
- [2] WARRINGTON, R.O., AMEEL T.A., Experimental Studies of Natural Convection in Partitioned Enclosures With a Trombe Wall Geometry, Journal of Solar Energy, ASME, Vol. 117, pp. 16-21, February (1995)
- [3] AKBARZADEH, A., CHARTERS, W.W.S., LESSLIE, D.A., Thermocirculation Characteristics of a Trombe Wall Passive Test Cell, Solar Energy, Vol. 28, No.6, pp. 461-468, (1982)
- [4] CHURCHILL, S.W., CHU, H.H.S., Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection From a Vertical Plate, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1323-1329, (1995)
- [5] ORMISTON, S.J., RAITHBY, G.D., HOLLANDS, K.G.T., Numerical Predictions of Natural Convection in a Trombe Wall System, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, No.6, pp. 869-877, (1986)
- [6] UYGUR, S., Pasif Sistemlerde Türbülanslı Doğal Taşınım, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (1993)
- [7] UTZINGER, D.M., KLEIN, S.A., MITCHELL, J.W., The Effect of Air Flow Rate in Collector-Storage Walls, Solar Energy, Vol.25, pp. 511-519, (1980)
- [8] AKBARI, H., BORGERES, T.R., Free Convective Laminar Flow Within the Trombe Wall Channel, Solar Energy, Vol.22, pp. 165-174, (1979)
- [9] FEDOROV, A.G., VISKANTA, R., Turbulent Natural Convection Heat Transfer in an Asymmetrically Heated Vertical Parallel- Plate Channel, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No.16, pp.3849-3860, (1997)
- [10] CALVET, P., MILLAN, P., Experimental Study of Free Convection in a Room Model Using a Collector Storage Wall, Recent Development in Heat and Mass Transfer measurement, (1976)
- [11] OHANESSIAN, P., CHARTERS., W.W.S., Thermal Simulation of a Passive Solar House Using a Trombe-Michel Wall Structure, Solar Energy, Vol.20, pp.275-281, (1978)

- [12] LA PICA, A., RODONO, G., VOLPES, R., An Experimental Investigation on Natural Convection of Air in a Vertical Channel, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.36, No.3, pp. 611-616, (1993)
- [13] U.S. Department of Energy, FEMP: Federal Energy Management Program, <http://www.eren.doe.gov/femp/passive.html> ,(1997)
- [14] North Carolina Solar Center, North Carolina State University Solar House, <http://www.ncsc.ncsu.edu/sh.htm>, (1996)
- [15] Enertia Building systems Inc., Enertia Buildings Systems, <http://www.enertia.com/science.htm>, (1996)
- [16] GÖKGÖZ, E ., Modifiye Michel-Trombe Duvarı Uygulamasında Çift Amaçlı (Konut Isıtması + Sıcak Su Üretimi) Yeni Bir Sistemin Teorik ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir (1990)
- [17] TAN, M., Ankara Solar House: Simulation of A New Passive Solar Heating System for Multistory Buildings, Ankara (1993)
- [18] ÖZİŞİK, M.N., Heat Transfer, McGraw Hill, New York,(1985)
- [19] BEJAN, A., Convection Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York, (1984)
- [20] HINZE, J.O., Turbulence, McGraw Hill, New York, (1959)
- [21] LESIEUR, M., Turbulence in Fluids, Kluwer Academic Pub., Dordrecht, (1997)
- [22] JANINE, A.H., The Small-Scale Structure of Turbulence, PhD.Thesis, Eindhoven University of Technology, <http://www.tnh.phys.tue.nl/scaling/janine/thesis/node1.html>, (1995)
- [23] BRADSHAW, P., An Introduction to Turbulence and Its Measurement, Pergamon Press, New York, (1971)
- [24] BRUUN, H.H., Hot wire Anemometry, Oxford Science Publications, Oxford,(1995)
- [25] ADVANTEC, Data Acquisition Catalogue
- [26] KITHLEY-METRABYTE, Data Acquisition Catalogue
- [27] BENEDICT, R.P., Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements, John Wiley & Sons, New York, (1984)
- [28] DANTEC MEASUREMENT TECHNOLOGY, Probes for Hot Wire Anemometry, Skovlunde, (1996)

- [29] BENDAT, J.S., PIERSON, A.G., Random data, John Wiley & Sons, New York, (1986)
- [30] KIPP&ZONEN Katalogları.
- [31] ONBAŞIOĞLU, H., Pasif Sistemlerde Masif Duvarın Isıl Analizi, Yüksek Lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (1993)
- [32] ATAGÜNDÜZ, G., Güneş Enerjisi Temelleri ve Uygulamaları, Ege Üniversitesi, İzmir (1989)
- [33] TOWNSEND, A.A., The Structure of Turbulent Shear Flow, Cambridge University Press, Cambridge, (1980)
- [34] PERIC, M., KESSLER, R., SCHEUERER, G., Comparison of Finite Volume Numerical Methods With Staggered and Collocated Grids, Computers and Fluids, Vol.16, pp.389-403, (1988)
- [35] ISSA R.I., Solution of the Implicit Discretized fluid Flow Equations by Operator Splitting, J. of Computational Physics, Vol.62, pp.40-65, (1985)
- [36] CFD2000 Users Manual (1995)
- [37] MURAKAMI, S., KATO, S., Numerical and Experimental Study on Room Air Flow - 3 D Predictions Using the k- ϵ Turbulence Model, Building and Environment, Vol.24, pp.85-97, (1989)

Ek A

TERMoeLEMANLARIN KALİBRASYONU VE BELİRSİZLİK ANALİZİ

A.1 Kalibrasyon

Ölçümlerde kullanılan Cromel-Alumel (K-Tipi) Termoelemanlar, bir dijital termometre (*Testo*) referans alınarak kalibre edilmişlerdir. Termoelemanlar, iki farklı çapta ve yapıda kullanılmışlardır. Akışkan sıcaklığı ölçümlerinde, uçları noktasal bir şekilde kaynaklanmış 0.2 mm çapında Teflon izolasyonlu elemanlar, duvar yüzey sıcaklığı ölçümlerinde ise, uçları sarmal şeklinde sarılmış 0.2 çapında Teflon izolasyonlu ve 0.4 çapında Elyaf izolasyonlu elemanlar kullanılmıştır. Buna göre farklı uç yapısı ve çaplar için üç farklı kalibrasyon yapılmış ve regresyon yoluyla elde edilen dört farklı kalibrasyon eğrisi bilgisayar programında kullanılmıştır.

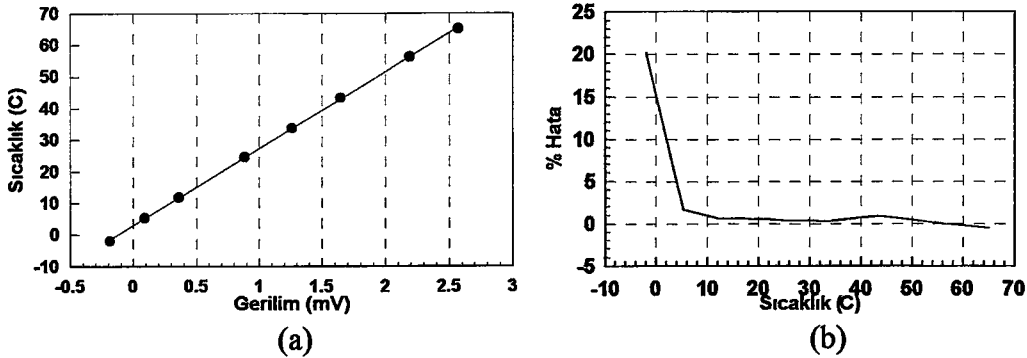
Ölçümler bilgisayarlı bir Data Acquisition Sistemi kullanılarak yapıldığından, kalibrasyonlar da bu sistem yardımıyla yapılmıştır. Sistem soğuk uç kompanzasyonu sağladığından; yani ölçüm referans sıcaklığı, sistemin bulunduğu ortam sıcaklığı olduğundan, ölçülen gerilime karşılık gelen sıcaklık değeri, kalibrasyon sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki fark olmalıdır.

Kalibrasyon sonucunda elde edilen verilerden, regresyon yoluyla,

$$y = a + b.x \quad (A.1)$$

şeklinde lineer denklemler çıkartılmıştır. Her bir termoeleman tipi için yapılan kalibrasyon ve hata eğrileri, Şekil A.1, A.2 ve A.3 'de görülebilir. Şekillerde görülen sıcaklıklar, kalibrasyon referans sıcaklığı ile ortam sıcaklığının farkıdır.

Nokta Uçlu, Teflon İzolasyonlu



Şekil A.1 Nokta uçlu , 0.2 mm çapındaki Cr-Al tipi termoelemanın, a) kalibrasyon ve b) hata sonuçları

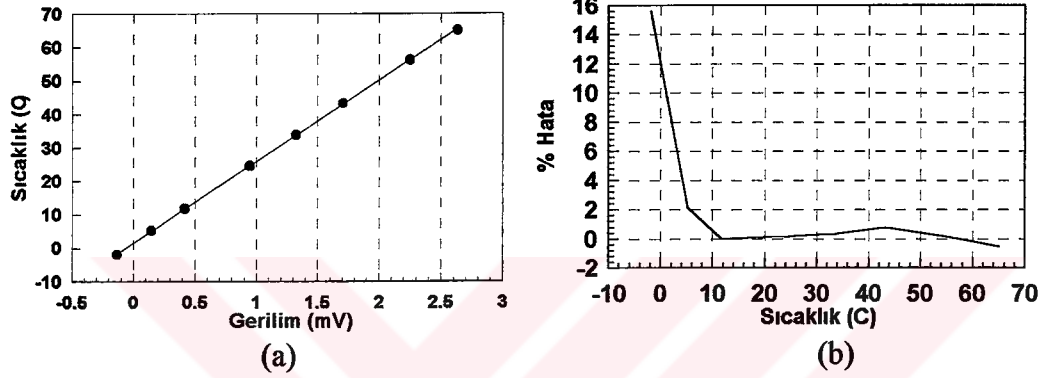
Nokta uçlu ve 0.2 mm çaplı termoelemanın kalibrasyonu sonucunda elde edilen lineer denklem,

$$y = 2.99913 + 24.2926 x \quad (A.2)$$

$$R = 0.999944$$

şeklindedir. Burada, R, denklemin gerçek verilerle uygunluğunun bir ölçütü olan korelasyon katsayısıdır. R=1 durumunda tam uyum söz konusu olmakta, R=0, değeri için herhangi bir uyum söz konusu değildir.

Sarmal Uçlu, Teflon İzolasyonlu



Şekil A.2 Sarmal uçlu , 0.2 mm çapındaki Cr-Al tipi termoelemanın, a) kalibrasyon ve b) hata sonuçları

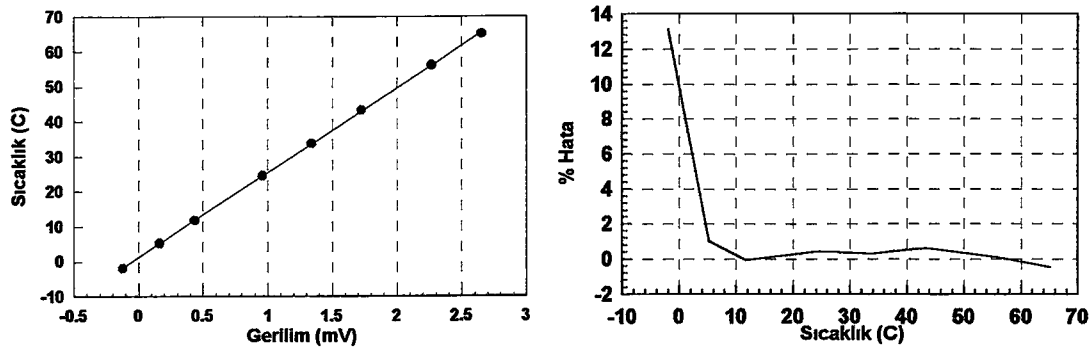
Sarmal uçlu ve 0.2 mm çaplı termoelemanın kalibrasyonu sonucunda elde edilen lineer denklem ,

$$y = 1.5998 + 24.2268 x \quad (A.3)$$

$$R = 0.999957$$

şeklindedir.

Sarmal Uçlu, Elyaf İzolasyonlu



Şekil A.3 Sarmal uçlu , 0.2 mm çapındaki Cr-Al tipi termoelemanın, a) kalibrasyon ve b) hata sonuçları

Sarmal uçlu ve 0.4 mm çaplı termoelemanın kalibrasyonu sonucunda elde edilen lineer denklem ,

$$y = 1.2793 + 24.1666 x \quad (A.4)$$

$$R = 0.999968$$

şeklinde ortaya çıkmaktadır.

A.2 Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışmalarda, yapılan ölçümlerin doğruluk derecesi her zaman bilinmesi gereken bir değerdir. Bunun tespit edilebilmesi amacıyla kalibrasyon sonuçlarının belirsizlik analizleri yapılmıştır.

Burada ilk olarak, kalibrasyon eğrisinin gerçek eğriden sapmasının bir ölçütü olan ve bir tür standart sapma olan, Standart Hata Tahmini¹, S_c , hesaplanmalıdır:

$$S_c = \left[\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^N (y_o - y_c)_i^2 \right]^{1/2} \quad (A.5)$$

Bununla birlikte, diğer kaynaklardan gelen hataların *karelerinin toplamının karekökü*² hesaplanarak toplam standart sapma tahmini (A.6) 'daki gibi elde edilebilir.

$$S_T = (S_1^2 + S_2^2 + \dots)^{1/2} \quad (A.6)$$

Buradan, (A.6) eşitliği yardımıyla , %95 güvenirlik için belirsizlik aralığı elde edilir.

$$W_{RSS} = [B^2 + (t_{95} S_T)^2]^{1/2} \quad (\%95 \text{ güvenirlik}) \quad (A.7)$$

Burada, N-k=6 için *Student's-t*³ tablolarından $t_{95}=2.447$ olarak tablodan alınır. (A.7) eşitliğinde, sistematik hatayı temsil eden B, parametresi ihmal edilebilir.

Referans Termometre olarak kullanılan dijital termometrenin (TESTO) kataloğundan, doğruluk derecesinin $\pm 0.4^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır.

Buna göre, aşağıda, her bir termoeleman yapısı için belirsizlik aralığı hesaplamaları ve sonuçları görülmektedir.

¹ Yılmaz, T., An Experimental and Numerical Investigation of Laminar and Turbulent Natural Convection In Vertical Parallel-Plate Channels, PhD. Thesis, University of Strathclyde, Glasgow (1997)

² ABERNETHY, R.B., BENEDICT, R.P., DOWDELL, R.B., ASME Measurement Uncertainty, Journal of Fluids Engineering, Vol.107, pp.161-164, (1985)

³ HOLMAN, J.P., Experimental Methods for Engineers, McGraw Hill, New York, (1994)

Nokta Uçlu, Teflon İzolasyonlu

Tablo A.1 Nokta Uçlu, 0.2 mm Çaplı Termoeleman için kalibrasyon ve hata değerleri

X	y _c	y _o	y _o -y _c	% Hata	(y _o -y _c) ²
-0.1862	-1.52414	-1.91	-0.385859	20.2021	0.148887
0.0906667	5.20166	5.29	0.08834	1.66994	0.00780396
0.3588	11.7153	11.79	0.0746958	0.633552	0.00557947
0.884	24.4738	24.59	0.116243	0.472727	0.0135125
1.26307	33.6823	33.79	0.107663	0.318624	0.0115913
1.6432	42.9167	43.29	0.373332	0.862398	0.139377
2.19	56.1998	56.19	-0.0098394	-0.0175109	9.68138E-005
2.57097	65.4546	65.09	-0.364576	-0.56011	0.132916

$$S_c = 0.2768$$

$$S_{\text{Testo}} = 0.4$$

$$S_T = [(0.4)^2 + (0.2768)^2]^{1/2} = 0.486$$

$$W_{\text{RSS}} = [(2.44 \times 0.486)^2]^{1/2} \quad (\%95 \text{ güvenirlilik})$$

$$W_{\text{RSS}} = \pm 1.18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sarmal Uçlu, Teflon İzolasyonlu

Tablo A.2 Sarmal Uçlu, 0.2 mm Çaplı Termoeleman için kalibrasyon ve hata değerleri

X	y _c	y _o	y _o -y _c	% Hata	(y _o -y _c) ²
-0.1326	-1.6126	-1.91	-0.297397	15.5705	0.0884449
0.147633	5.17654	5.29	0.113465	2.14489	0.0128743
0.4206	11.7896	11.79	0.000358248	0.00303857	1.28342E-007
0.9474	24.5523	24.59	0.0376998	0.153314	0.00142128
1.32407	33.6778	33.79	0.112205	0.332066	0.01259
1.7068	42.9501	43.29	0.339897	0.785162	0.11553
2.2518	56.1537	56.19	0.036311	0.0646219	0.00131849
2.6348	65.4325	65.09	-0.342539	-0.526254	0.117333

$$S_c = 0.2414$$

$$S_{\text{Testo}} = 0.4$$

$$S_T = [(0.4)^2 + (0.2414)^2]^{1/2} = 0.467$$

$$W_{\text{RSS}} = [(2.44 \times 0.467)^2]^{1/2} \quad (\%95 \text{ güvenirlilik})$$

$$W_{\text{RSS}} = \pm 1.14 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sarmal Uçlu, Elyaf İzolasyonlu

Tablo A.3 Sarmal Uçlu, 0.4 mm Çaplı Termoeleman için kalibrasyon ve hata değerleri

X	y_c	y_o	$y_o - y_c$	% Hata	$(y_o - y_c)^2$
-0.1216	-1.65939	-1.91	-0.250606	13.1207	0.0628035
0.163733	5.23612	5.29	0.0538781	1.01849	0.00290285
0.435233	11.7973	11.79	-0.0073416	-0.0622697	5.38991E-005
0.96	24.4792	24.59	0.110848	0.450784	0.0122872
1.3414	33.6963	33.79	0.0937238	0.277371	0.00878415
1.72702	43.0154	43.29	0.274617	0.634366	0.0754144
2.27082	56.1572	56.19	0.0328443	0.0584522	0.00107875
2.6532	65.398	65.09	-0.307963	-0.473134	0.0948412

$$S_c = 0.2074$$

$$S_{Testo} = 0.4$$

$$S_T = [(0.4)^2 + (0.2074)^2]^{1/2} = 0.450$$

$$W_{RSS} = [(2.44 \times 0.450)^2]^{1/2} \quad (\%95 \text{ güvenirlilik})$$

$$W_{RSS} = \pm 1.10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ek B

SICAK TEL ANEMOMETRESİNİN KALİBRASYONU VE BELİRSİZLİK ANALİZİ

B.1 Kalibrasyon

Sıcak Tel Anemometresinin kalibrasyonu, Bölüm 3.2 'de de bahsedildiği gibi, bir kalibrasyon ünitesi yardımıyla yapılmıştır. Kalibrasyon işlemi sistem tarafından tamamen otomatik olarak gerçekleştirildiğinden, kullanıcıya, sadece korelasyon eğrisinin türü ve derecelerini belirlemek kalıyor. Bu yüzden, kalibrasyon sonuçları, sistemin ekran düzeniyle birlikte verilmiştir.

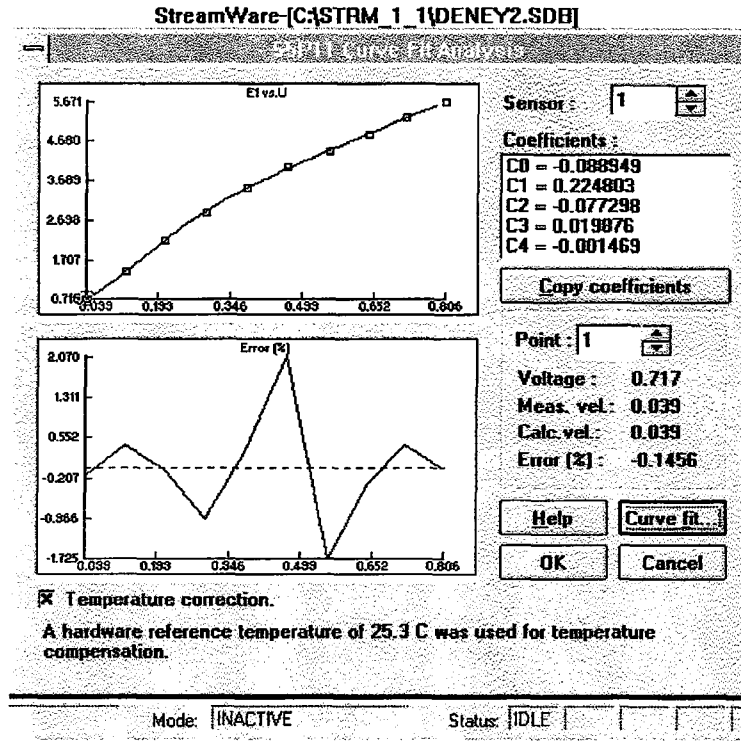
Sıcak Tel Anemometresinin bir dezavantajı olarak, tel sensörün, zamanla veya kullanım hatalarından dolayı kolayca kırılabilmesi nedeniyle, bazı deneylerde farklı kalibrasyonlar kullanılmak zorunda kalınmıştır. Fakat, bazı durumlarda, farklı bölgelerde akışkan hızları arasında büyük farklar bulunması nedeniyle (örneğin üst ve alt ventilasyon delikleri), farklı hız aralıklarındaki kalibrasyonlarla ölçüm yapılması kaçınılmazdır.

Burada, kalibrasyon sonucunda elde edilen hız ve elektriksel gerilim değerleri arasında 4. Derece polinom şeklinde bir korelasyon kurulması hata değerleri açısından uygun görülmüştür. Böylece, her bir kalibrasyon için ,

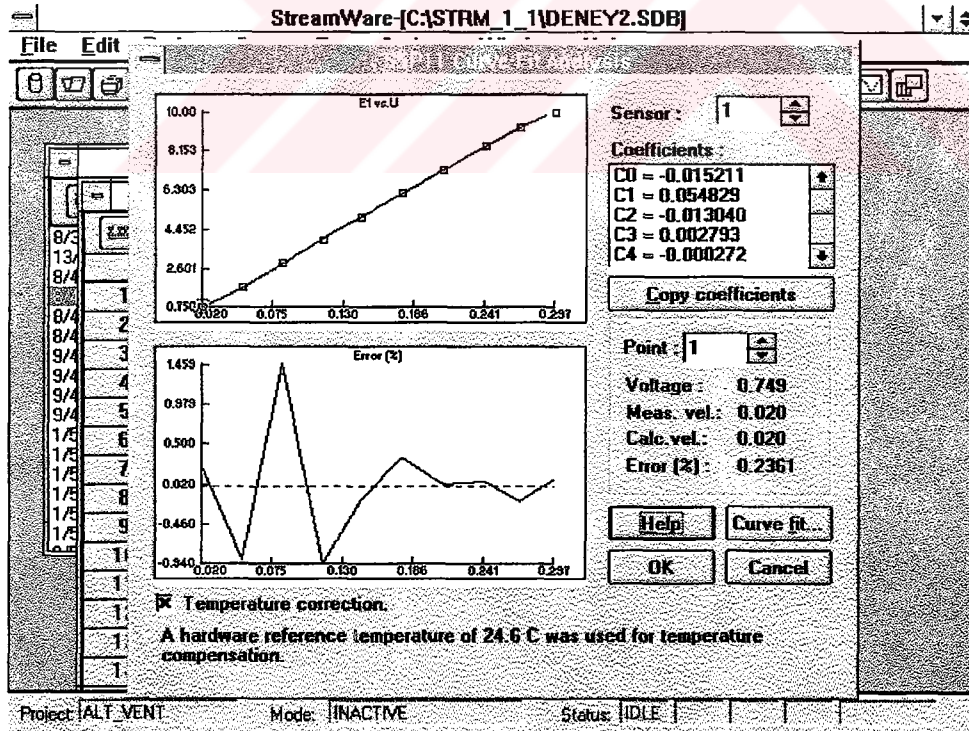
$$y = C0 + C1.x + C2.x^2 + C3.x^3 + C4.x^4 \quad (B.1)$$

Şeklinde bir denklem elde edilmekte ve ölçümlerde okunan elektriksel sinyallerin hız değerlerine dönüştürülmesinde kullanılmaktadır.

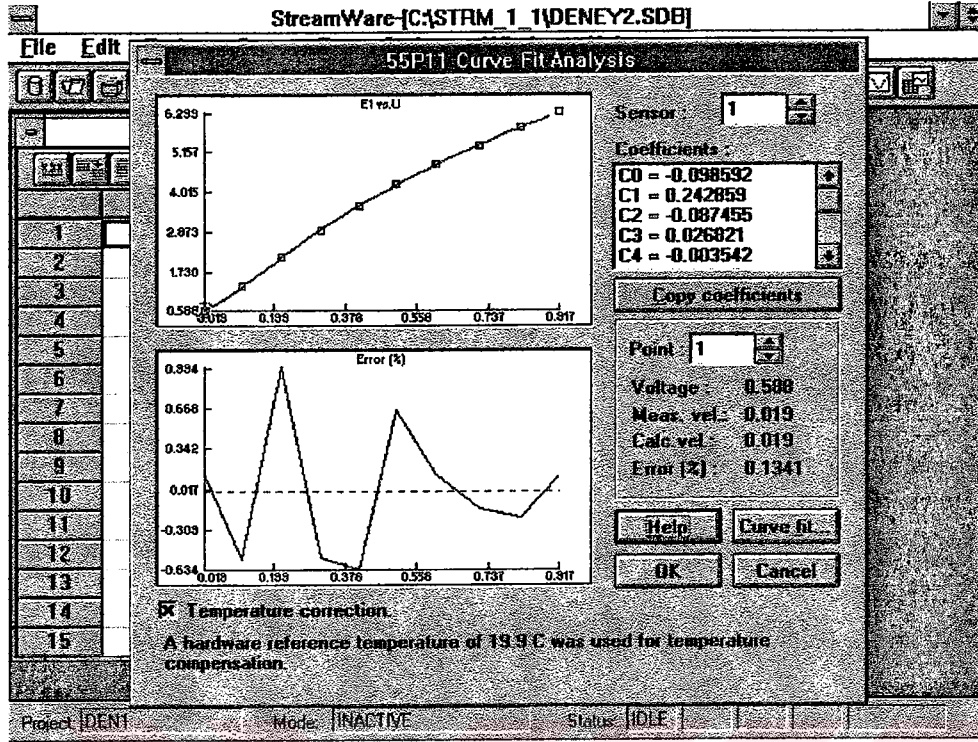
Aşağıda, ölçüm yapılan değişik günlerde hangi kalibrasyonun kullanıldığı, kalibrasyon katsayıları ve hata eğrileri verilmektedir:



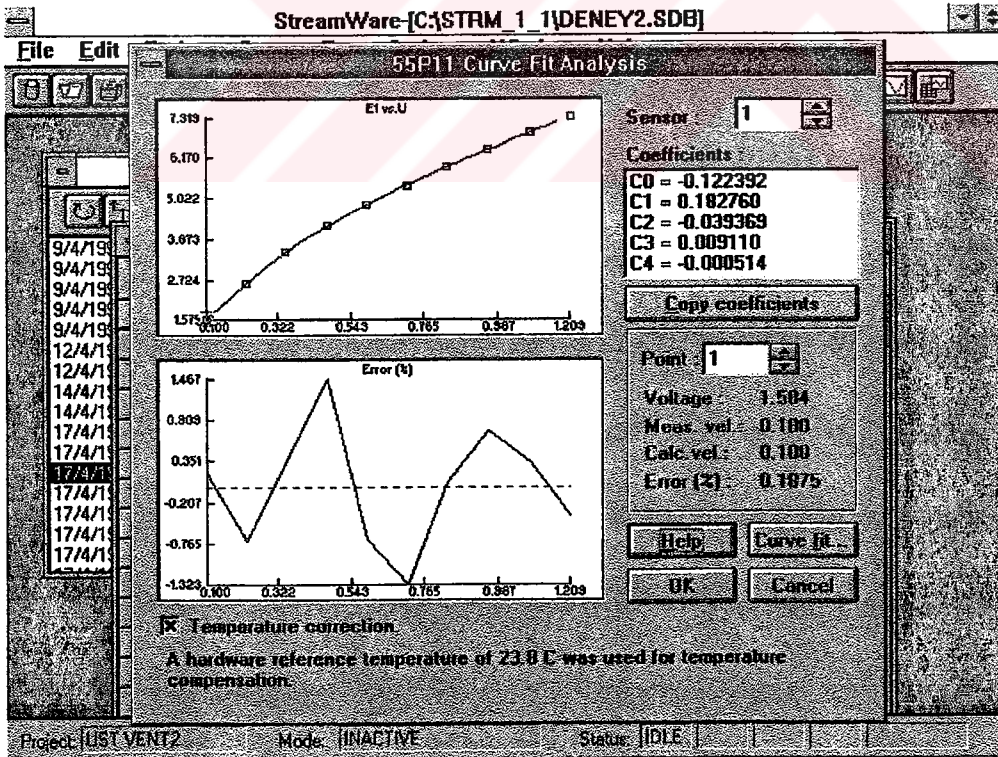
Şekil B.1 Üst ventilasyon deliklerindeki ölçümlerde kullanılan kalibrasyon sonuçları. (9 Nisan 1998)



Şekil B.2 Alt ventilasyon deliklerindeki ölçümlerde kullanılan kalibrasyon sonuçları. (9 Nisan 1998)



Şekil B.3 Üst ventilasyon deliklerinin %30 kapalı hali (29 Nisan 1998) ve oda üst kısmında (1 ve 2 Mayıs 1998) yapılan ölçümlerde kullanılan kalibrasyon sonuçları.



Şekil B.4 Üst ventilasyon deliklerinin %45 (20 Nisan) ve %60 (18 Nisan 1998) kapalı halleri için yapılan ölçümlerde kullanılan kalibrasyon sonuçları.

B.2 Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışmalarda, yapılan ölçümlerin doğruluk derecesi her zaman bilinmesi gereken bir parametredir. Bunun tespit edilebilmesi amacıyla kalibrasyon sonuçlarının belirsizlik analizleri yapılmıştır.

Burada ilk olarak, kalibrasyon eğrisinin gerçek eğriden sapmasının bir ölçütü olan ve bir tür standart sapma olan, Standart Hata Tahmini¹, S_c , hesaplanmalıdır:

$$S_c = \left[\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^N (y_o - y_c)_i^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.2})$$

Bununla birlikte, diğer kaynaklardan gelen hataların *karelerinin toplamının karekökü*² hesaplanarak toplam standart sapma tahmini (B.3) 'daki gibi elde edilebilir.

$$S_T = (S_1^2 + S_2^2 + \dots)^{1/2} \quad (\text{B.3})$$

Buradan, (B.3) eşitliği yardımıyla, %95 güvenirlik için belirsizlik aralığı elde edilir.

$$W_{RSS} = [B^2 + (t_{95} S_T)^2]^{1/2} \quad (\%95 \text{ güvenirlik}) \quad (\text{B.4})$$

Burada, $N-k=8$ için *Student's-t*³ tablolarından $t_{95}=2.306$ olarak tablodan alınır. (B.4) eşitliğinde, sistematik hatayı temsil eden B, parametresi ihmal edilebilir.

Kalibrasyon cihazının doğruluk derecesi (accuracy) katalogta verilen 0.002 m/sn olarak alınabilir.

Buna göre, aşağıda, her bir kalibrasyon için gerekli tablolar ile belirsizlik aralığı hesaplamaları ve sonuçları görülmektedir.

¹ Yılmaz, T., An Experimental and Numerical Investigation of Laminar and Turbulent Natural Convection In Vertical Parallel-Plate Channels, PhD. Thesis, University of Strathclyde, Glasgow (1997)

² ABERNETHY, R.B., BENEDICT, R.P., DOWDELL, R.B., ASME Measurement Uncertainty, Journal of Fluids Engineering, Vol.107, pp.161-164, (1985)

³ HOLMAN, J.P., Experimental Methods for Engineers, McGraw Hill, New York, (1994)

Tablo B.1. Şekil B.1 'de verilen kalibrasyonun ayrıntı tablosu.

U	E1	T(C)	P(kPa)	E1corr	U1calc
0,039	0,717	24,175	100,519	0,716	0,039
0,126	1,437	24,181	100,519	1,434	0,127
0,210	2,218	24,173	100,524	2,213	0,210
0,296	2,903	24,128	100,522	2,896	0,293
0,384	3,526	24,100	100,524	3,517	0,385
0,467	4,049	24,098	100,530	4,039	0,477
0,557	4,415	24,439	100,549	4,407	0,548
0,642	4,870	24,445	100,544	4,862	0,640
0,722	5,282	24,451	100,549	5,273	0,725
0,806	5,680	24,458	100,549	5,671	0,805

$$S_c = 0,005$$

$$S_{\text{Kalib. Ünite}} = 0.002$$

$$S_T = [(0.002)^2 + (0.005)^2]^{1/2} = 0.0053$$

$$W_{\text{RSS}} = [(2.306 \times 0.0053)^2]^{1/2} \quad (\%95 \text{ güvenirlilik})$$

$$W_{\text{RSS}} = \pm 0.0122 \text{ m/s}$$

Tablo B.2. Şekil B.2 'de verilen kalibrasyonun ayrıntı tablosu.

U	E1	T(C)	P(kPa)	E1corr	U1calc
0,02	0,749	25,607	100,771	0,75	0,02
0,052	1,685	25,611	100,773	1,689	0,052
0,083	2,873	25,572	100,754	2,88	0,085
0,115	3,965	25,576	100,743	3,974	0,114
0,145	5,037	25,577	100,748	5,048	0,145
0,177	6,151	25,577	100,76	6,164	0,177
0,21	7,245	25,579	100,76	7,261	0,21
0,242	8,37	25,579	100,76	8,388	0,242
0,27	9,239	25,579	100,762	9,259	0,27
0,297	9,982	25,581	100,76	10,004	0,297

$$S_c = 0,00079$$

$$S_{\text{Kalib. Ünite}} = 0.002$$

$$S_T = [(0.002)^2 + (0.00079)^2]^{1/2} = 0.002$$

$$W_{\text{RSS}} = [(2.306 \times 0.002)^2]^{1/2} \quad (\%95 \text{ güvenirlilik})$$

$$W_{\text{RSS}} = \pm 0.005 \text{ m/s}$$

Tablo B.3. Şekil B.3 'de verilen kalibrasyonun ayrıntı tablosu.

U	E1	T(C)	P(kPa)	E1corr	U1calc
0,019	0,588	19,811	100,63	0,588	0,019
0,119	1,297	19,823	100,638	1,297	0,118
0,219	2,171	19,823	100,635	2,171	0,221
0,317	2,925	19,818	100,632	2,925	0,315
0,414	3,606	19,816	100,635	3,605	0,411
0,505	4,224	19,445	100,605	4,22	0,508
0,607	4,8	19,466	100,607	4,796	0,607
0,716	5,371	19,473	100,61	5,367	0,715
0,818	5,864	19,497	100,613	5,86	0,817
0,917	6,304	19,502	100,613	6,299	0,918

$$S_c = 0,005$$

$$S_{\text{Kalib. Ünite}} = 0.002$$

$$S_T = [(0.002)^2 + (0.005)^2]^{1/2} = 0.0053$$

$$W_{\text{RSS}} = [(2.306 \times 0.0053)^2]^{1/2} \quad (\%95 \text{ güvenirlilik})$$

$$W_{\text{RSS}} = \pm 0.0122 \text{ m/s}$$

Tablo B.4. Şekil B.4 'de verilen kalibrasyonun ayrıntı tablosu.

U	E1	T(C)	P(kPa)	E1corr	U1calc
0,1	1,584	21,292	99,484	1,575	0,1
0,226	2,621	21,299	99,484	2,607	0,224
0,347	3,519	21,299	99,484	3,501	0,349
0,475	4,311	21,303	99,478	4,289	0,482
0,594	4,852	21,923	99,523	4,833	0,589
0,715	5,384	21,737	99,49	5,361	0,705
0,836	5,937	21,753	99,49	5,911	0,837
0,96	6,453	21,766	99,487	6,426	0,968
1,088	6,928	21,779	99,492	6,899	1,092
1,209	7,35	21,794	99,498	7,319	1,204

$$S_c = 0,006$$

$$S_{\text{Kalib. Ünite}} = 0.002$$

$$S_T = [(0.002)^2 + (0.006)^2]^{1/2} = 0.0063$$

$$W_{\text{RSS}} = [(2.306 \times 0.0063)^2]^{1/2} \quad (\%95 \text{ güvenirlilik})$$

$$W_{\text{RSS}} = \pm 0.0145 \text{ m/s}$$

Ek C

DÜŞEY DÜZLEME GELEN GÜNEŞ IŞINIMI

Yatay düzleme gelen anlık tüm güneş ışıını (W/m²) değeri ölçümler sonucunda mevcuttur. Buna göre düşey düzleme gelen tüm güneş ışıınının bulunabilmesi için, öncelikle, yatay düzlem ışıını verilerinin *direkt* ve *yayılı* ışıını bileşenlerine ayrılması, böylece, güneş ışıını bağıntıları yardımıyla düşey düzleme gelen direkt güneş ışıını miktarının hesaplanması gerekmektedir. Yayılı ışıını düzlem eğiminden bağımsız olduğundan, yatay düzlem için bulunan yayılı ışıını bileşeni, düşey düzlem için hesaplanan direkt ışıını değeri ilave edilerek düşey düzleme gelen tüm güneş ışıını miktarı bulunabilir.

Buradan hareketle, ilk olarak, atmosfer dışında (extraterrestrial), birim yatay düzleme gelen saatlik güneş ışıını, I_o (MJ/m²), şu şekilde hesaplanabilir¹;

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin w_2 - \sin w_1) + \frac{\pi(w_2 - w_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (C.1)$$

Buradaki bazı terimler şu şekilde ifade edilmektedirler,

- w_1, w_2 : başlangıç ve bitiş saat açıları (15°/saat)
 n : gün sayısı
 G_{sc} : Güneş sabiti= 1367 W/m²
 ϕ : Enlem derecesi (İstanbul için 41°)
 δ : Deklinasyon açısı ; $\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right)$

Elimizdeki verilerle, *berraklık indeksi* (clearness index), k_T , aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (C.2)$$

I : Yatay düzlemde birim yüzeye düşen saatlik tüm güneş ışıını, (MJ/m²)
(ölçülmüş verilerden)

I_o : Atmosfer dışında, yatay düzlemde birim yüzeye düşen saatlik tüm güneş ışıını, (MJ/m²)

¹ DUFFIE, J., BECKMAN, W., Solar Energy Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, new York (1991)

Böylece, berraklık indeksi kullanılarak, aşağıdaki korelasyonlardan yatay düzleme gelen saatlik tüm ışıının yayılı ışıının bileşeni elde edilebilir:

$$\frac{I_y}{I} \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & \Rightarrow k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 & \Rightarrow 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ -16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & \\ 0.165 & \Rightarrow k_T > 0.80 \end{cases} \quad (C.3)$$

Buradan, yatay düzleme direk ışıının bileşeni,

$$I_d = I - I_y \quad (C.4)$$

şeklinde elde edilir. Eğimli düzleme gelen direk ışıının, yatay düzleme gelen direk ışıına oranı, R_d , güneye bakan (güneş azimut açısı $\gamma=0$) düşey düzlem için uygulanırsa;

$$R_d = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (C.5)$$

β , eğim açısı olmak üzere (düşey trombe duvarı için 90°), Trombe duvarı yüzeyine düşen saatlik tüm ışıının ,

$$I_e = I_d R_d + I_y \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (C.6)$$

şeklinde hesaplanabilir. Buradaki son terim, çevreden (yerden, binalardan, v.s.) yansıyan ışıının katkısını temsil etmekte ve ρ_g çevrenin yansıma oranı olarak verilmektedir. Bu değer 0 ile 1 arasında olmak üzere birçok kitapta tablolar halinde verilmiştir. Burada, $\rho_g = 0.2$ olarak alınmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

ONBAŞIOĞLU Hüseyin, 1968 yılında Lefkoşa/Kıbrıs 'da doğdu. İlköğrenimini Karaoğlu -Girne 'de tamamladıktan sonra, Orta ve Lise öğrenimine Lefkoşa Türk Maarif Koleji 'nde devam etmiştir. 1986 yılında, İTÜ Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü 'ne girdi. 1990 yılında aynı fakültede lisans eğitimini tamamlayarak Makina Mühendisliği ünvanını aldı. Aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde Lisans Üstü eğitime başladı. 1993 yılında, bu eğitimini tamamlayarak Yüksek Mühendis ünvanını aldı. 1992 yılında İTÜ Makina Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı; halen bu görevine devam etmektedir.

