T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞEY BİR PLAKA YÜZEYİNDE DOĞAL TAŞINIM ŞARTLARINDA YOĞUŞMANIN İNCELENMESİ

ALİİHSAN KOCA

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK VE ISI TEKNİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. ŞEVKET ÖZGÜR ATAYILMAZ

İSTANBUL, 2015

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞEY BİR PLAKA YÜZEYİNDE DOĞAL TAŞINIM ŞARTLARINDA YOĞUŞMANIN İNCELENMESİ

Aliihsan KOCA tarafından hazırlanan tez çalışması 22.06.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Özgür ATAYILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Doç. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İsmail TEKE
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ali PINARBAŞI
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ
İstanbul Ticaret Üniversitesi _____

Doç. Dr. Y. Erhan BÖKE
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Bu çalışmadaki deneysel ve sayısal çalışmalar Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK-BİDEB 2211 – Sanayiye Yönelik Doktora Burs Programı kapsamında seçilen beş doktora tezinden birisi olmuştur.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda, engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle çalışmalarımın her aşamasında destek olan, daha lisans öğrencisiyken beni sanayiye kazandırarak Ar-Ge mühendisi olmama vesilen olan kıymetli hocam Prof. Dr. İsmail Teke'ye teşekkürlerimi ve minnetlerimi âcizane arz ederim.

Tez danışmanım olan, bilgi birikimi ve tecrübelerini tezimin her aşamasında paylaşan Doç. Dr. Şevket Özgür Atayılmaz'a teşekkürlerimi arz ederim.

Çalışmalarımın farklı aşamalarındaki katkılarıyla destek olan Doç. Dr. Özden Ağra'ya ve Doç. Dr Hakan Demir'e teşekkürlerimi arz ederim.

Tezimin izleyicisi olan, sadece izleyici olmaktan öte tezimin her aşamasında katkı sağlayan Prof. Dr. Seyhan Uygur Onbaşıoğlu'na da teşekkürlerimi arz ederim.

Tez çalışmamda firma imkânlarını kullanma fırsatı veren kıymetli üst yöneticilerim Sn. Adil Mirmahmutoğulları ve Sn. İbrahim Mirmahmutoğulları'na teşekkürlerimi arz ederim.

Doktora eğitimimi teşvik eden, iyi bir mühendis ve iyi bir yönetici olarak bizlere hep örnek olan Ar-Ge koordinatörüm Dr. Zafer Gemici Bey'e teşekkürlerimi arz ederim.

Deneysel çalışmalarımda bana destek olan Sn. Gürsel Çetin'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, eğitimim boyunca hoşgörüsü ve muhabbetiyle bana motivasyon sağlayan, benle beraber büyük özveride bulunan, manevi desteklerini üzerimden esirgemeyen, bu süreçteki en büyük destekçim olan, kıymetli zevcem Sn. Yasemin Koca'ya en içten şükranlarımı ve muhabbetlerimi sunar, aşk-ı niyaz ederim.

Aliihsan KOCA

Haziran, 2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ ix

KISALTMA LİSTESİ xiii

ŞEKİL LİSTESİ xiv

ÇİZELGE LİSTESİ xviii

ÖZET xx

ABSTRACT xxii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.1.1 Işınım Esaslı Sistemler ve Avantajları: Termal konfor Enerji tasarrufu 1
1.1.1.1 Termal Konfor 2
1.1.1.2 Enerji Tasarrufu 6
1.1.2 Işınımsal Sistemlerin Diğer Sistemlerle Kıyaslanması 10
1.1.3 Işınımsal Sistemlerin Isıl kapasite ve Isı Transfer Katsayıları İle İlgili Çalışmalar 10
1.1.4 Işınımsal Soğutma Sistemleri ve Nem Kontrolü 15
1.1.5 Düşey Levhada Su Buharı Film Yoğuşması ve Eşzamanlı Isı ve Kütle Geçişi Problemini Konu Alan Çalışmalar 20
1.2 Tezin Amacı 31
1.3 Hipotez 31

BÖLÜM 2

SAYISAL ÇALIŞMALAR 34

2.1 Teorik analiz 34
2.1.1 Korunum Eşitlikleri 34
2.1.2 Kütle transfer eşitliklerinin çözümleri 36

2.1.3 Duyulur ve gizli ısı transferi 38
2.2 Duvar Yüzeyinde Film Yoğuşmanın Sayısal Olarak Modellenmesi 39
2.2.1 Süreklilik ve Bileşen Eşitlikleri Kaynak Terimleri 40
2.2.2 Enerji ve Momentum Eşitlikleri Kaynak Terimleri 43
2.2.3 Yoğuşmanın Gerçekleşmesi 44
2.3 Sayısal Model ve Çözüm Ağının Oluşturulması 46
2.3.1 Sayısal Model ve Geometri 47
2.3.2 Sayısal Çözüm Ağı 47
2.3.2.1 Çözüm Ağı Bağımsızlığı Çalışmaları 47
2.3.2.2 Nihai Çözüm Ağı 52
2.3.3 Sayısal Model ve Çözüm Tekniği 54
2.3.3.1 Sayısal Çalışmalarda Kullanılan Programda Kullanılan Eşitlikler 54
2.3.3.2 Sayısal Model ve Sınır Şartları 57
2.4 Sayısal Analiz Bulguları 62
2.4.1 Yoğuşan Su Buharı Debisi ve Toplam Yoğuşma 63
2.4.2 Oda İçerisindeki Su Buharı Kütle Oranı Dağılımı 69
2.4.3 Mahal İçerisindeki Hava Hızları 71

BÖLÜM 3

DENEY SİSTEMİ VE DENEYSEL YÖNTEM 74

3.1 Deney Odası Tanıtımı 74
3.1.1 Deney Odası Konstrüksiyonu 75
3.1.2 Çevre Hacimler 76
3.1.2.1 Hacim-2 76
3.1.2.2 Hacim-3 77
3.1.2.3 Hacim-4 78
3.1.3 Deneylerin Yapıldığı Hacim (Hacim-1) 79
3.1.4 Yoğuşturucu Plaka (Hibrid Panel) 81
3.1.5 Su Şartlandırma Sistemi 84
3.1.6 Deney Odası Ölçüm Sistemi 88
3.1.6.1 Hava Sıcaklık Sensörleri 89
3.1.6.2 Yüzey Sıcaklık Sensörü 90
3.1.6.3 Su Sıcaklık Ölçüm Sensörleri 91
3.1.6.4 Hava Bağıl Nem Ölçüm Sensörü 92
3.1.6.5 Hassas Terazi 92
3.1.6.6 Termal Kamera 93
3.1.7 Veri toplama ve kontrol sistemleri 94
3.1.7.1 PLC Kontrol Sistemi 95
3.1.7.2 PLD Kontrol Algoritması 96
3.1.7.3 Parametre Ölçüm ve Kontrol Sistemi (PXI) 96
3.1.7.4 Haberleşme 97
3.2 Deneysel Ölçümler Öncesi Yapılan Çalışmalar 98
3.2.1 Kalibrasyon Çalışmaları 98
3.2.1.1 Isıl Çiftlerin Kalibrasyonu 99
3.2.1.2 Nem Sensörlerinin Kalibrasyonu 101

3.2.1.3 Işınım Termometresi Kalibrasyonu 102
3.2.2 Deney Odası Sızdırmazlık Deneyleri 102
3.2.3 Yoğuşturucu Plaka ve Yüzey Kaplama Malzemesinin Yayma Oranı Değerlerinin Belirlenmesi 104
3.2.4 Deney Odasındaki Sınır Şartlarının Sürekliliği 105
3.2.5 Deneylerin Tekrarlanabilirliği 107
3.2.6 Belirsizlik Analizi 107
3.2.6.1 Belirsizliklerin Tespiti 108
3.3 Deneysel Yöntem 114
3.4 Ölçümler ve Hesaplamalar 117
3.4.1 Mahal içerisindeki enerji dengesi 117
3.4.2 Yoğuşturucu Plaka Isı Akıları ve Isı Transfer Katsayıları Hesabı 121
3.4.2.1 Işınım ısı transfer katsayısı hesabı 121
3.4.2.2 Toplam duyulur ısı transfer katsayısı hesabı 123
3.4.2.3 Taşınımla olan ısı transferi katsayısı hesabı 123
3.4.2.4 Yoğuşma ısı transferi katsayısı hesabı 123
3.4.3 Eş zamanlı Isı ve Kütle Geçişi, Isı ve Kütle Taşınım Katsayıları Hesa . 124
3.4.3.1 Doğal Taşınım ve Kaldırma Kuvveti Etkili Akışlar 124
3.4.3.2 Isı ve Kütle Taşınım Katsayıları 126
3.4.3.3 İdeal Gaz Karışımları 127
3.4.3.4 Kullanılan Hesap Yöntemi 129

BÖLÜM 4

DENEYSEL BULGULAR 133

4.1 Yoğuşma Deney Bulguları 134
4.1.1 Zamana Bağlı Yoğuşma Debilerinin İncelenmesi 142
4.1.2 Toplam Yoğuşma Miktarların Kıyaslanması 153
4.1.3 Yoğuşma Akılarının Su Buharı Kısmi Basınç Farklarına Göre İfadesi 155
4.2 Sayısal Modelin Doğrulanması 157
4.3 Serbest Taşınım Şartlarında Düşey Plakada Sadece Isı Geçişinin İncelenmesi 161
4.4 Serbest Taşınım Şartlarında Düşey Plakada Eş Zamanlı Isı ve Kütle Geçişinin İncelenmesi 162
4.4.1 Zamana Bağlı Duyulur ve Gizli Isı Akıları Değişimi 163
4.4.2 Zamana Bağlı Duyulur, Taşınım ve Işınım ısı akıları değişimi 167
4.4.3 Sürekli Rejim İçin Deneysel Duyulur ve Gizli Isı Transfer Katsayıları 171
4.4.4 Serbest Taşınım Şartlarında Düşey Plakada Eş Zamanlı Taşınımla Gerçekleşen Isı ve Kütle Geçişi İçin Oluşturulan Korelasyonlar 174

BÖLÜM 5

BULGU VE ÖNERİLER 178

5.1 Bulgular 179
5.2 Öneriler 182

EK-A

KALİBRASYON BULGULARI 196

A.1 Isıl Çift Kalibrasyon Bulguları 196
A.1.1 Su Sıcaklık Sensörlerinin Kalibrasyon Bulguları 196
A.1.2 Yüzey Sıcaklık Sensörlerinin Kalibrasyonu 198
A.1.3 Yatay Yöndeki Hava Sıcaklık Sensörlerinin Kalibrasyonu-1 200
A.1.4 Yatay Yöndeki Hava Sıcaklık Sensörlerinin Kalibrasyonu-2 202
A.2 Deney Odası Çevre Hacimlerinde Kullanılan Sıcaklık Nem Sensörlerinin Kalibrasyon Sertifikası 204
A.3 Deney odası iç hacimde kullanılan nem sensörlerinin kalibrasyon dokümanları 205
A.4 Işınım Termometresi Kalibrasyon Dokümanı 211

EK-B

ÇEVRE HACİMLER KARARLILIK GRAFİKERİ 214

EK-C

ISI TRANSFERİ YAPILAN ÖLÇÜMLER VE HESAPLAMA BULGULARI 220

ÖZGEÇMİŞ 232

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
B_m	Kuvvet potansiyeli
C	Derişiklik
c_p	Isı kapasitesi
D	Karışım kütle difüzyon katsayısı
D_{AB}	İkili kütle yayılım katsayısı
F	Kaldırma kuvveti
F_{cl}	Giysili vücut yüzeyinin giysisiz vücut yüzeyine oranı
F_{s-j}	Görme faktörü
g	Yerçekimi ivmesi
Gr	Grashof sayısı
Gr^*	Geliştirilmiş Grashof sayısı
H	Bağıl Nem
h	Ortalama ısı taşınım katsayısı
h_m	Ortalama kütle taşınım katsayısı
h_{fg}	Buharlaşma gizli ısısı
h_r	Işınım ısı transfer katsayısı
h_c	Taşınım ısı transfer katsayısı
h_{top}	Toplam ısı transfer katsayısı
$h_{yoğ}$	Yoğuşma ısı transfer katsayısı
I_{cl}	Giysilerin termal direnci
J	Difüzyon akısı
k	Isı iletim kasayısı
L	Uzunluk
M	Metebolizma hızı
M_i	Mol kütlesi
$\dot{m}$	Debi
$\dot{m}''$	Kütle akısı
$\dot{m}'''$	Hacimsel debi
$\dot{m}_{yoğ}$	Yoğuşma debisi
$\dot{m}_{yoğ,akı}$	Yoğuşma akısı
$m_{top,yoğ}$	Toplam yoğuşan miktar
Nu	Nusselt sayısı
P	Basınç

P_v	Su buharı kısmi basıncı
P_a	Kuru hava kısmi basıncı
P_{vd}	Su buharı doyma basıncı
Pr	Prandtl sayısı
Q	Isı transfer miktarı
$\dot{q}$	Isı akısı
$\dot{q}_{duy}$	Duyulur ısı akısı
$\dot{q}_{giz}$	Gizli ısı akısı
$\dot{q}_{kay}$	Isı kaybı akısı
$\dot{q}_{rad}$	Işınım ısı akısı
$\dot{q}_{net}$	Net ısı akısı
$\dot{q}_{top}$	Toplam ısı akısı
q_k	İletimle olan ısı transferi
Ra	Rayleigh sayısı
Ra'	Kütle geçişi için Rayleigh sayısı
Ra_L	Geliştirilmiş Rayleigh sayısı
Ru	Üniversal gaz sabiti
Re	Reynold sayısı
S	Hacimsel kaynak terimi
Sc	Schmidt sayısı
Sh	Sherwood sayısı
T	Sıcaklık
T_a	Hava sıcaklığı
T_{cl}	Giysilerin yüzey sıcaklığı
T_d	Doyma sıcaklığı
T_{op}	Operative hava sıcaklığı
T_s	Yüzey sıcaklığı
T_w	Su sıcaklığı
t	Zaman
U	Duvar toplam ısı transfer katsayısı
U_τ	Sürtünme hızı
u^+	Boyutsuz hız
x	x yönündeki uzaklık
V	Hacim
v	Hava hızı
W	Dış İş
w	Su buharı kütle oranı
y^+	Boyutsuz uzunluk

Yunan Harfleri

α	Isı yayılma katsayısı
β	Sıcaklık farkına bağlı hacimsel ısıl genleşme katsayısı
β^*	Derişiklik farkına bağlı hacimsel genleşme katsayısı
δ	Hidrodinamik sınır tabaka kalınlığı
δ'	Isıl sınır tabaka kalınlığı
δ''	Derişiklik sınır tabaka kalınlığı
ε	Yayma oranı
φ	Bağıl nem
ρ	Kütle yoğunluğu
$\Delta\rho_T$	Sıcaklık gradyanına bağlı yoğunluk farkı
$\Delta\rho_C$	Derişiklik gradyanına bağlı yoğunluk farkı
μ	Dinamik vizkosite
τ	Kayma gerilmesi
ν	Kinematik viskosite
$\dot{\vartheta}$	Hacimsel debi
w_p	Hata oranı
x_n	Bağımsız değişken

Alt İndisler

a	Kuru hava
aa	Hava adveksiyon
av	Su buharı adveksiyon
anl	Analitik hesap
c	Taşınım
ç	Çıkan
d	Doyma
da	Hava difüzyon
dv	Su buharı difüzyon
den	Deneysel
duy	Duyulur
f	Film tabakası
g	Giren
giz	Gizli
i	i yönü
ins	Yalıtım
j	j yönü
kay	Kayıp
kh	Kuru hava
L	Düşey levha için ortalama değer
n	Normal
ort	Ortalama
r	Işınım

ref	Referans
s	Yüzey
sat	Doyma
sb	Su buharı
sw	Deney odası duvar yüzeyleri
T	Teğet
top	Toplam
v	Su buharı
w	Duvar
yoğ	Yoğuşma
o	Deney başlangıç şartları
∞	Ortam

KISALTMA LİSTESİ

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
COP	Coefficient of Performance
D	Deney
DIN	Deutsches Institut für Normung
HAMP	Novel heat and moisture transfer panel
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
ISO	International Organization for Standardization
KDD	Kısmi Diferansiyel Eşitlik
KE	Kinetik Enerji
MCSM	Modified Critical Saturation Model
MET	Metebolic Rate
MRT	Mean Radiant Temperature
OS	Orta Sıcaklık
PDD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PE	Potansiyel Enerji
PLC	Programmable logic controller
PLD	Programmable Logic Devices
PMV	Predicted Mean Vote
RH	Relative Humidity
RTD	Resistance Temperature Detectors
UDF	User Defined Function
YS	Yüksek Sıcaklık

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Gerçek fiziksel model [139] 40
Şekil 2.2 Basitleştirilmiş fiziksel model 40
Şekil 2.3 İlk hücrede gerçekleşen yoğuşma [162] 44
Şekil 2.4 Fluent çözüm şematiği [162] 45
Şekil 2.5 Ara yüzeyden ısı ve kütle geçişi 46
Şekil 2.6 HAD Modelleme 46
Şekil 2.7 Üç boyutlu sayısal model 47
Şekil 2.8 Çözüm ağı sayısının yoğuşma kütle akısı üzerindeki etkisi 49
Şekil 2.9 İlk hücre kalınlığının yoğuşma kütle akısı üzerindeki etkisi 49
Şekil 2.10 Duvara yakın bölgelerdeki akış bölgeleri [163] 50
Şekil 2.11 Duvara yakın bölgede gerçekleşen akışın sınır tabakası yapısı [163] 51
Şekil 2.12 Üç boyutlu sayısal model çözüm ağı 53
Şekil 2.13 Sayısal model x-y düzlemindeki çözüm ağı 54
Şekil 2.14 Sınır şartları 58
Şekil 2.15 Farklı zaman adımları için zamana bağlı yoğuşan miktar 60
Şekil 2.16 Farklı zaman adımları için zamana bağlı yoğuşan miktar 61
Şekil 2.17 Gerçekleşen hava sıcaklığı ve doyma sıcaklığı verilerinin kıyaslaması 62
Şekil 2.18 Gerçekleşen hava sıcaklığı ve doyma sıcaklığı verilerinin kıyaslaması 63
Şekil 2.19 Yoğuşturucu plaka üzerinde gerçekleşen yoğuşma (CFD-5) 64
Şekil 2.20 Plaka yüzey sıcaklığına göre zaman bağlı yoğuşma debisi değişimi 65
Şekil 2.21 Plaka yüzey sıcaklığına göre zaman bağlı toplam yoğuşan miktar değişimi 66
Şekil 2.22 Plaka yüzey sıcaklığına göre zaman bağlı yoğuşma akısı eğilim eşitlikleri ... 66
Şekil 2.23 Başlangıç bağıl nem oranına göre zaman bağlı yoğuşma akısı değişimi 68
Şekil 2.24 Başlangıç bağıl nem oranına göre zaman bağlı yoğuşan miktar değişimi ... 68
Şekil 2.25 Farklı bağıl nem değerlerine göre zaman bağlı yoğuşma akısı eğilim eşitlikleri 69
Şekil 2.26 Oda içerisindeki su buharı kütle oranı dağılımı (x-y düzlemi) 69
Şekil 2.27 Eksen-1 üzerindeki su buharı kütle oranı dağılımı: a) 0-5 cm, b) 0-50 cm ... 70
Şekil 2.28 Oda içerisindeki hava hız dağılımı 71
Şekil 2.29 Oda içerisindeki hava hız vektörleri 71
Şekil 2.30 Hava hız dağılımları a) Ortalama hava hızları b) Yatay yöndeki hava hızları c) Düşey yöndeki hava hızları 73
Şekil 3.1 Deney odasını üç boyutlu şematik görüntüsü 75
Şekil 3.2 Deney odasının yandan ve üstten görünümü 75

Şekil 3.3 Dış hacimlerde kullanılan prefabrik paneller 76
Şekil 3.4 Hacim-2' deki (a) iklimlendirme cihazı (b) iklimlendirme cihazı ve kanalların görünümü..... 77
Şekil 3.5 Hacim-2' deki (a) kurutucular (b) nemlendirici ünite 77
Şekil 3.6 Hacim-3' de kullanılan çelik kafesler..... 78
Şekil 3.7 Hacim-3' de kullanılan klima..... 78
Şekil 3.8 Hacim-3' de kullanılan klima..... 79
Şekil 3.9 a) Klima cihazı montajı, b) Havalandırma kanalı..... 79
Şekil 3.10 Hacimlerde kullanılan klimaların dış üniteleri 79
Şekil 3.11 Mekanik Kurutucu ve ultrasonik nemlendirici..... 80
Şekil 3.12 Hacim-1 üç boyutlu görünümü 80
Şekil 3.13 Hacim-1 içerisindeki deney ekipmanları..... 81
Şekil 3.14 Yoğuşturucu plaka a) bakır borular b) ön yüzey 82
Şekil 3.15 Yoğuşturucu plaka ölçüleri..... 82
Şekil 3.16 Yoğuşturucu plakanın duvardaki konumu 83
Şekil 3.17 Yoğuşma toplama kabı..... 83
Şekil 3.18 Yoğuşan suyu toplandığı alın 84
Şekil 3.19 Hidrolik sistemin iki boyutlu şematiği..... 85
Şekil 3.20 Hidrolik sistemin üç boyutlu şematiği..... 85
Şekil 3.21 Genleşme tankı ve karıştırıcı tank..... 86
Şekil 3.22 Paket tipi su soğutma grubu 86
Şekil 3.23 Tank çıkışından sonraki dört yollu vana..... 86
Şekil 3.24 Tesisattaki sirkülasyon Pompası ve üç yollu Vana 87
Şekil 3.25 Tesisattaki elektromanyetik debimetre..... 87
Şekil 3.26 Tesisattaki gidiş ve dönüş kolektörü..... 88
Şekil 3.27 Mahal içerisindeki sıcaklık ve nem sensör dizilimleri 89
Şekil 3.28 Hava sıcaklık sensörü 90
Şekil 3.29 Yoğuşturucu plaka yüzeyine yakın konumlandırılan ısıl çiftler (Ta1-Ta5).... 90
Şekil 3.30 Yoğuşturucu plaka yüzeyine konumlandırılan ısıl çift (Ta0) 91
Şekil 3.31 Soğutulmayan duvarlara konumlandırılan ısıl çift (Ts1 - Ts6)..... 91
Şekil 3.32 Yoğuşturucu plaka gidiş ve dönüş hattı su sıcaklık sensörleri (Tw1 – Tw2). 92
Şekil 3.33 Nem ölçümlerinde kullanılan bağıl nem transmitteri..... 92
Şekil 3.34 Hassas terazi 93
Şekil 3.35 Termal kamera..... 94
Şekil 3.36 Termal kamera..... 95
Şekil 3.37 Elektrik panosu..... 95
Şekil 3.38 PXI cihazının görünümü 97
Şekil 3.39 PLC cihazının ve ara yüzünün görünümü 98
Şekil 3.40 Sıcaklık sensörlerinin kalibre edildiği sistem..... 99
Şekil 3.41 Sıcak su banyosu ve kalibre edilen sensörler..... 100
Şekil 3.42 Veri toplama cihazı..... 100
Şekil 3.43 Deney odasının buhar kesici ile kaplanması 103
Şekil 3.44 Hacim-1 ve Hacim-2 zamana bağlı bağıl nem değişimi..... 104
Şekil 3.45 Malzemelerin yayma oranı değerlerinin ölçümü..... 105
Şekil 3.46 Oda yüzeylerindeki sıcaklık dağılımı 105
Şekil 3.47 Yoğuşturucu plaka üzerindeki sıcaklık dağılımı..... 106

Şekil 3.48 Yoğuşturucu plaka sıcaklığının zamana bağlı değişimi: a) t = 0 dk, a) t = 10 dk, a) t = 20 dk, a) t = 30 dk, a) t = 40 dk, a) t = 60 dk 107
Şekil 3.49 Enerji dengesi 117
Şekil 3.50 Matlab ışınım hesap programı 122
Şekil 4.1 Plaka üzerinde yoğuşma 30. dakika 136
Şekil 4.2 Plaka üzerinde yoğuşma 60. dakika 136
Şekil 4.3 Plaka üzerinde yoğuşma 75. dakika 137
Şekil 4.4 Plaka üzerinde yoğuşma 90. dakika 137
Şekil 4.5 Plaka üzerinde yoğuşma 120. dakika 138
Şekil 4.6 Plaka üzerinde yoğuşma 150. dakika 139
Şekil 4.7 Plaka üzerinde yoğuşma 180. dakika 139
Şekil 4.8 Plaka üzerinde yoğuşma 210. dakika 140
Şekil 4.9 Plaka üzerinde yoğuşma 240. dakika 140
Şekil 4.10 Plaka üzerinde yoğuşma 300. dakika 141
Şekil 4.11 Plaka üzerinde yoğuşma 480. dakika 141
Şekil 4.12 Plaka üzerinde genel yoğuşma görünümü 142
Şekil 4.13 Plaka üzerinde yoğuşan suyun toplanması 142
Şekil 4.14 Deney-1 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 147
Şekil 4.15 Deney-2 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 147
Şekil 4.16 Deney-3 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 148
Şekil 4.17 Deney-4 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 149
Şekil 4.18 Deney-5 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 149
Şekil 4.19 Deney-6 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 150
Şekil 4.20 Deney-7 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 151
Şekil 4.21 Deney-7 zamana bağlı yoğuşma debisinin değişimi 151
Şekil 4.22 Deney-8 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 152
Şekil 4.23 Deney-9 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 153
Şekil 4.24 Deney-10 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması 153
Şekil 4.25 Farklı yüzey sıcaklıkları için zamana bağlı yoğuşan buhar miktar değişimi 154
Şekil 4.26 Doyma sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı farkının toplam yoğuşma miktarına olan etkisi 154
Şekil 4.27 Farklı başlangıç nem değerlerine göre zamana bağlı toplam yoğuşma miktarı 155
Şekil 4.28 Su buharı kısmi buhar basınç farkına bağlı yoğuşan miktar değişimi 157
Şekil 4.29 Su buharı kısmi buhar basınç farkına bağlı yoğuşma akısı değişimi 157
Şekil 4.30 Sayısal ve deneysel toplam yoğuşan miktarların karşılaştırılması 160
Şekil 4.31 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı geçişinin olduğu hal için Ra – Nu değişimi 162
Şekil 4.32 Deney-1 (Ts=10,5 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi 164
Şekil 4.33 Deney-2 (Ts=10,9 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi 164
Şekil 4.34 Deney-3 (Ts=11,4 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi 165
Şekil 4.35 Deney-4 (Ts=12,3 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi 166
Şekil 4.36 Deney-5 (Ts=13 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi 166
Şekil 4.37 Deney-6 (Ts=14 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi 167
Şekil 4.38 Deney-1 (Ts=10,5 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları .. 168
Şekil 4.39 Deney-2 (Ts=10,9 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları .. 168

Şekil 4.40 Deney-3 (Ts=11,4 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları .. 169
Şekil 4.41 Deney-4 (Ts=12,3 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları .. 169
Şekil 4.42 Deney-5 (Ts=13 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları 170
Şekil 4.43 Deney-6 (Ts=14 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları 170
Şekil 4.44 Işınım ısı transfer katsayısı korelasyonu 172
Şekil 4.45 Duyulur ısı transfer katsayısı korelasyonu 172
Şekil 4.46 Gizli ısı transfer katsayısı korelasyonu 173
Şekil 4.47 Toplam ısı transfer katsayısı korelasyonu 173
Şekil 4.48 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu haliçin deneysel değerler ve kütle geçişi için oluşturulan korelasyon..... 175
Şekil 4.49 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için deneysel değerler ve ısı geçişi için oluşturulan korelasyon 176
Şekil 4.50 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için Raı – hm değişimi..... 176
Şekil 4.51 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için Ra – htaş değişimi 177
Şekil A.1 Su sıcaklık sensörleri kalibrasyon grafikleri a) Yoğuşturucu gidiş b) Yoğuşturucu dönüş c) Vana gidiş d) Vana dönüş 197
Şekil A.2 Düşey hava sıcaklık sensörleri kalibrasyon grafikleri a) Tavan yüzey sıcaklığı b) Taban yüzey sıcaklığı c) Kuzey yüzey sıcaklığı d) Güney yüzey sıcaklığı e) Doğu yüzey sıcaklığı f) Batı yüzey sıcaklığı 199
Şekil A.3 Yatay yönde sıcaklık sensörleri kalibrasyon grafikleri a) Yatay 0 cm hava sıcaklığı b) Yatay 1 cm hava sıcaklığı c) Yatay 2 cm hava sıcaklığı d) Yatay 3 cm hava sıcaklığı..... 201
Şekil A.4 Yatay yönde sıcaklık sensörleri kalibrasyon grafikleri a) Yatay 5 cm hava sıcaklığı b) Yatay 50 cm hava sıcaklığı c) Yatay 100 cm hava sıcaklığı d) Yatay 200 cm hava sıcaklığı..... 203
Şekil B.1 Deney-1 kararlılık grafikleri 214
Şekil B.2 Deney-2 kararlılık grafikleri 215
Şekil B.3 Deney-3 kararlılık grafikleri 215
Şekil B.4 Deney-4 kararlılık grafikleri 216
Şekil B.5 Deney-5 kararlılık grafikleri 216
Şekil B.6 Deney-6 kararlılık grafikleri 217
Şekil B.7 Deney-7 kararlılık grafikleri 217
Şekil B.8 Deney-8 kararlılık grafikleri 218
Şekil B.9 Deney-9 kararlılık grafikleri 218
Şekil B.10 Deney-10 kararlılık grafikleri 219

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Farklı çözüm ağı sayıları için bulguların karşılaştırılması.....48
Çizelge 2.2 Kullanılan sayısal çözüm yöntemleri 57
Çizelge 2.3 Sınır şartları 58
Çizelge 2.4 Kullanılan ayrıklaştırma çözüm yöntemleri..... 59
Çizelge 2.5 Gerçekleşen hava sıcaklığı ve doyma sıcaklığı verilerinin kıyaslaması.... 61
Çizelge 2.6 Gerçekleşen hava sıcaklığı ve doyma sıcaklığı verilerinin kıyaslaması.... 62
Çizelge 2.7 Farklı yoğuşturucu yüzey sıcaklıkları için CFD bulguları 64
Çizelge 2.8 Farklı başlangıç bağıl nem değerleri için CFD bulguları..... 67
Çizelge 3.1 Sıcaklık ve nem sensörlerinin konumları..... 89
Çizelge 3.2 Sızdırmazlık deneyi bulguları..... 103
Çizelge 3.3 Hata parametreleri-1..... 112
Çizelge 3.4 Hata parametreleri-2..... 113
Çizelge 3.5 Hata analizi bulguları..... 113
Çizelge 3.6 Yüzeyler arasındaki görme faktörleri 122
Çizelge 3.7 Gr sayılarının kıyaslanması 131
Çizelge 4.1 Yürütülen yoğuşma deneyleri 133
Çizelge 4.2 Yürütülen kuru deneyler 134
Çizelge 4.3 Ortalama değerlere göre yoğuşma deney bulguları 135
Çizelge 4.4 Ortalama yoğuşma akısı ve yoğuşma debisi kıyaslaması 144
Çizelge 4.5 Su buharı kısmi basınç farklarının yoğuşmaya etkisi..... 156
Çizelge 4.6 Sayısal ve deneysel toplam yoğuşan miktarların karşılaştırılması 159
Çizelge 4.7 Termodinamik hesaplar ile deneysel ölçümlerin kıyaslanması..... 160
Çizelge 4.8 Sadece ısı geçişi deneyleri için hesap özeti tablosu 161
Çizelge 4.9 Sürekli hal ısı transfer hesap bulguları 171
Çizelge 4.10 Eş zamanlı ısı ve kütle geçişi hesap tablosu 174
Çizelge A.1 Su sıcaklık sensörlerinden alınan ölçümler.....196
Çizelge A.2 Su sıcaklık sensörleri kalibrasyon değerleri.....196
Çizelge A.3 Yüzey sıcaklık sensörleri kalibrasyon değerleri.....198
Çizelge A.4 Yatay yönde sıcaklık sensörlerinden alınan ölçümler..... 200
Çizelge A.5 Yatay yönde sıcaklık sensörleri kalibrasyon değerleri.....200
Çizelge A.6 Yatay yönde sıcaklık sensörlerinden alınan ölçümler-2.....202
Çizelge A.7 Yatay yönde sıcaklık sensörleri kalibrasyon değerleri-2 202
Çizelge C. 1 Deney-1 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1 220

Çizelge C.2 Deney-1 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2 ……221
Çizelge C.3 Deney-2 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1 ……222
Çizelge C.4 Deney-2 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2 ……223
Çizelge C.5 Deney-3 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1 ……224
Çizelge C.6 Deney-3 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2 ……225
Çizelge C.7 Deney-4 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1 ……226
Çizelge C.8 Deney-4 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2 ……227
Çizelge C.9 Deney-5 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1 ……228
Çizelge C.10 Deney-5 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2 ……229
Çizelge C.11 Deney-6 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1 ……230
Çizelge C.12 Deney-6 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2 ……231

ÖZET

DÜŞEY BİR PLAKA YÜZEYİNDE DOĞAL TAŞINIM ŞARTLARINDA YOĞUŞMANIN İNCELENMESİ

Aliihsan KOCA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özgür ATAYILMAZ

Eş Danışman: Doç. Dr. Özden AĞRA

Bu tezde, ışınımsal soğutma sistemlerine entegre çalışabilecek nem alıcı hibrid panel üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Bu bağlamda kapalı bir hacim içerisinde su buharı-hava karşımı içerisindeki su buharının düşey bir levhada doğal taşınım şartlarında yoğuşması sonucu gerçekleşen eş zamanlı ısı ve kütle geçişi sayısal ve deneysel olarak detaylı incelenmiştir.

Tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde detaylı kaynak araştırması, tezin amaçları ve orijinal katkı genel olarak açıklanarak konuya giriş yapılmıştır.

İkinci bölümdeki sayısal çalışmada; kullanılan sayısal çözüm kodu yardımıyla, kapalı bir hacimde hava içerisindeki su buharının düşey bir plaka üzerinde yoğuşması ile gerçekleşen doğal taşınım şartlarında eş zamanlı ısı ve kütle geçişi incelenmiştir. Deneysel şartlar ile aynı sınır koşullara sahip analizler yapılarak, yoğuşan miktar ve zamana bağlı yoğuşma akıları incelenmiştir. Sayısal çalışmalar için Ansys Fluent 15.0 CFD programı kullanılmıştır.

Üçüncü bölümde; bu tez çalışması için özel olarak geliştirilen deney odasının detaylı tanıtımı, deney öncesi yapılan hazırlıklar ve deneysel yöntem detaylı olarak anlatılmıştır. Yine bu bölümde deneysel ölçüm bulgularının kullanıldığı; enerji dengesi,

yoğuşturucu plaka ısı akıları ve ısı transfer katsayıları ve eş zamanlı ısı ve kütle geçişi, ısı ve kütle taşınım katsayıları hesaplama yöntemleri açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde; Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. şirketi bünyesinde kurulan hassas iklimlendirme deney odasında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların bulguları verilmiştir. Deneysel çalışmalar yoğuşmanın olduğu ıslak durum ve yoğuşmanın olmadığı durumdan oluşmaktadır. Yoğuşmanın olduğu durumda altı farklı plaka yüzey sıcaklığı (10,5-10,9-11,3-12,4-13-14 °C) ve beş farklı başlangıç bağıl nem değerine (% 65-70-75-80-85) göre deneyler yürütülmüştür. Kuru durum için ise beş farklı plaka yüzey sıcaklığı (11,5-11,7-14,3-14,9-17,5°C) çalışılmıştr.

Deneysel çalışmalar dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; her bir deney için zamana bağlı yoğuşma debileri ve toplam yoğuşma miktarları incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen yoğuşma akıları, sayısal çalışmaların bulguları ve analitik hesaplama bulgularıyla karşılaştırılmıştır. Yoğuşma su buharı kısmi basınç farklarına göre ifade edilmiştir. Plaka yüzeyi ile sınır tabaka dışındaki bağıl nem ve sıcaklık değerleri kullanılarak yoğuşma akılarının su buharı kısmi buhar basıncı farkına göre ifadesiyle tüm yoğuşma deneyleri tek bir grafiğe indirgenerek genelleştirilmiştir. İkinci bölümde; Yürütülen sayısal çalışmalardan hesaplanan yoğuşma miktarı ile aynı şartlarda deneysel çalışmalardan elde edilen toplam yoğuşma miktarı karşılaştırılmıştır. Tüm bulgular irdelendiğinde de sayısal çalışmalarla hesaplanan toplam yoğuşan miktarın deneysel olarak ölçülen toplam yoğuşma miktarından ortalama %8,9 oranında fazla çıktığı görülmüştür. Üçüncü bölümde sadece ısı geçişinin olduğu kuru deney bulguları kullanılarak, her deney için hesaplanan Nu ve Ra değerleri ile serbest taşınım şartlarında düşey plakaya ısı geçişi için $7{,}78x10^{7}<Ra<1{,}55x10^{8}$ aralığı için $Nu_L=9{,}709xRa^{0{,}1854}$ korelasyonu önerilmiştir. Dördüncü bölümde , serbest taşınım şartlarında düşey plakada eş zamanlı ısı ve kütle geçişi incelenmiştir. Bu bağlamda farklı yüzey sıcaklıklarının çalışıldığı deneyler için zamana bağlı duyulur ve gizli ısı akılarının değişimi incelenmiştir. Deneysel ölçümlerin sürekli hale geldiği durumdaki bulguların ortalamaları kullanılarak duyulur ve gizli ısı transfer miktarları ve ısı transfer katsayıları karekteristik sıcaklık farklarına bağlı olarak elde edilmiştir: Toplam ısı transfer katsayısı 8,19 ($W/m^2.K$) toplam duyulur ısı transfer katsayısı 6,69 ($W/m^2.K$), ışınım ısı transfer katsayısı 2,21 ($W/m^2.K$) yoğuşma ısı transfer katsayısı 3,24 ($W/m^2.K$)

Deneysel çalışmanın dördüncü kısmında elde edilen deneysel bulgular kullanılarak Nu,Ra ve Sh, $Ra^{'}$ değerleri ile serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eşzamanlı ısı ve kütle taşınım şartlarında kütle geçişi için $1{,}20x10^{8} < Ra^{'} < 1{,}62x10^{8}$ aralığında $Sh_L = 4{,}52xRa^{' 0{,}3598}$ ve ısı geçişi için $1{,}39x10^{8} < Ra < 1{,}87x10^{8}$ aralığında $Nu_L = 78{,}22xRa^{0{,}082}$ korelasyonları elde edilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde çalışmanın bulguları özet olarak değerlendirilerek öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yoğuşma, hibrid panel, eş zamanlı ısı ve kütle geçişi, kapalı atmosferik hacim

ABSTRACT

INVESTIGATION OF NATURAL CONVECTION CONDENSATION OVER THE VERTICAL PLATE

Aliihsan KOCA

Department of Mechanical Engineering

Ph.D. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Özgür ATAYILMAZ

Co-Adviser: Assoc. Prof. Özden AĞRA

In this study we propose a novel cooling and dehumidification strategy with hybrid panel, in which a hybrid panel can be hydronically connected in series with the radiant cooling system. For this purpose, simultaneous heat and mass transfer during the natural free convective condensation of water vapor over the vertical in the presence of non-condensation in real scaled closed room has been investigated numerically and experimentally.

Thesis consists of five chapters. In the first chapter, studies that are related to our subject in the literature have been reviewed. Furthermore the purpose and the goals of the study has been explained.

In the second chapter, numerical study of heat and mass transfer in free convection has been carried out. In these CFD model which has same boundary conditions with experimental studies, vapour condensation in the presence of non-condensable gas were simulated and simultaneous heat and mass transfer during the natural free convective condensation of water vapor calculated. Condensation amounts and condensation rates have been obtained numerically. In this work, a numerical model was developed using the commercial CFD package ANSYS-FLUENT version 15.

In the fourth chapter, experiments have been performed in a conditioned room in Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. Experiments were conducted for wet conditions (condensation) and dry conditions (non-condensation). Multiple deneys were conducted by varying the temperature of the cold plate average surface temperatures of 10,5, 10,9, 11,3, 12,3 and 14 °C were set on the condensing plate for an initial humidity of 75 % and varying relative humidity ratios of 65 %, 70 %, 75 %, 80 % and 85 % were set to air. For dry cases, average surface temperatures were studied of 11,5-11,7-14,3-14,9 and 17,5°C were set on the plate.

Experiments consist of four main parts. In the first part; For each cases condensation rates condensation amounts were evaluated. Obtained transient condensation rates from experiments were compared with the numerical results and analitical calculations. Condesation rates were expressed according to the partial pressure difference of water vapor using the temperatures and humidity ratios of plate surface and outside of boundary layer.

In the second part; numerically calculated and measured condensation amounts have been compared. According to the results, the average deviation between numerical calculations and experimental results were avarage %8,9.

In the thirth part; using the abtained results of the dry experiments, free convection heat transfer over the vertical plate have been successfully correlated by the equation $Nu_L=9,709xRa^{0,1854}$ for the range of $7,78x10^7<Ra<1,55x10^8$.

In the fourt part; simultaneous heat and mass transfer during the natural free convective condensation have been investigated. On the basis of archived measurements in steady state, the sensible and latent heat transfer rates and heat transfer coefficients depending on the characteristic temperature differences have been obtained: Total heat transfer coefficient 8,19 ($W/m^2.K$), total sensible heat transfer coefficient 6,69($W/m^2.K$), radiation heat transfer coefficient 2,21 ($W/m^2.K$), condensation heat transfer coefficient 3,24 ($W/m^2.K$),

Using the results obtained from the experiments, Nu, Ra and Sh, Ra' number values have been calculated. Results have been successfully correlated by the equation $Sh_L = 4,52xRa'^{0,3598}$ ($1,39x10^8 < Ra < 1,87x10^8$) for simultaneously heat and mass transfer in free convection on the vertical plate for mass transfer. However heat transfer correlated by the equation $Nu_L = 78,22xRa^{0,082}$ ($1,39x10^8 < Ra < 1,87x10^8$) for free convection heat transfer over the vertical plate.

In the fifth chapter, conclusions and advices have been presented.

Keywords: Condensation, hbyrid panel, simultaneously heat and mass transfer, closed atmosferic room

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kaynak araştırması beş ana başlık altında gruplandırılmıştır:

- Işınımsal sistemler ve avantajları: Termal konfor, Enerji tasarrufu
- Işınımsal sistemlerin diğer sistemlerle kıyaslanması
- Işınımsal sistemlerin ısıl kapasite ve ısı transfer katsayıları ile ilgili çalışmalar
- Işınımsal soğutma sistemleri ve nem kontrolü
- Su buharı film yoğuşması ve düşey levhada eşzamanlı ısı ve kütle geçişini problemini konu alan çalışmalar

1.1.1 Işınım Esaslı Sistemler ve Avantajları: Termal konfor, Enerji tasarrufu

Duvardan, yerden, tavandan ısıtma-soğutma yapabilecek ışınımsal panellerinde ısı transferi modelleri, termal konfor ve enerji verimliliği ile ilgili birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada yararlanılan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Bilim adamları ve mühendisler, klasik iklimlendirme sistemlerinin çok fazla enerji tüketmesinden dolayı binalarda ısıl konfor sağlayabilecek daha ekonomik sistemleri keşfetmeye yönelik çalışmalar ile her zaman ilgilenmektedirler. Bu çalışmalar ışığında klasik sistemlere göre mahal içerisinde daha yüksek ısıl konfor sağlayarak enerji tasarrufu sağlayabilecek ışınımsal ısıtma ve soğutma sistemleri geliştirilmiştir. Işınımsal ısıtma sistemleri bir mahalde yerde, duvarda ya da tavanda sıcaklığı su, hava veya elektrik rezistansı ile kontrol edilebilen, ısı transferinin en az % 50'sinin ışınımla gerçekleştiği ışınım paneli adı verilen düzlemsel yüzeyler oluşturulması temeline

dayanır. Bunlardan su ile çalışan hidronik ışınım sistemlerin çalışma prensibi; içerisinden sıcak veya soğuk su geçirilmesi suretiyle ısıtılan veya soğutulan panellerin çevredeki katı yüzeyler ile ışınım, hava ile ise doğal taşınımla ısı transferi gerçekleştirmesine dayanır. Isıtma durumunda panel yüzeyinden ışınımla gerçekleşen ısı transferi, toplam ısı transferinin %70-80 arasında olabilmekte iken soğutma durumunda ise bu oran %60 mertebesindedir [1].

Mahal içerisine sıcak veya soğuk hava sağlayarak oda hava sıcaklığını kontrol eden zorlanmış taşınım esasına dayalı klasik sistemlerle karşılaştırıldığı zaman ışınımsal sistemlerde daha homojen sıcaklık dağılımı ve daha yüksek ısıl konfor elde edilebilmektedir ve aynı ısıl konfor durumu için daha az enerji tüketimi mümkün olabilmektedir [1].

1.1.1.1 Termal Konfor

Zorlanmış taşınım sistemlerinde sık karşılaşılan konfrsuzluk durumu, mahal içerisinde hava akımlarının neden olduğu, insanın ayağı ile başı arasındaki yüksek sıcaklık farkıdır [2]. Işınımsal sistemlerde düşey hava sıcaklık farkının daha az olduğu ve hava hareketinin hemen hemen hiç olmadığı bir iç ortam yaratılmasıyla bu yerel ısıl konforsuzluk ortadan kaldırılabilmektedir [3].

Işınım esaslı sistemlerde ısıtma durumunda daha düşük, soğutma durumunda ise daha yüksek hava sıcaklığında ısıl konfor sağlanabildiğinden konfor durumundaki sıcaklığı kış sezonunda daha düşük ve yaz sezonunda daha yüksek değerlere ayarlanabilir. Bu da ısıtma ve soğutma durumunda %30'dan fazla bir oranda enerji tasarrufu sağlamaktadır [4]. Kullanımı son yıllarda artan ışınımsa ısıtma ve soğutma sistemlerinin Avrupa ülkelerindeki yeni yapılan binalarda kullanım oranı %50'den daha fazladır ve bu sistemler giderek klasik sistemlerin yerini almaktadır [5].

Işınımsa panellerle ısıtmada panelden yayılan ışınımla ısı enerjisi doğrudan ortamdaki cisimlere aktarılır ve panel yüzey sıcaklığının yüksek olması sebebiyle ortalama ışınımsal sıcaklık artar. Böylece konvektif ısıtma sistemlerine göre ışınımsal panellerle daha düşük hava sıcaklığında ısıtma yaparak aynı konfor şartları sağlanabilmektedir [6]. Dudkiewicz ve Jezowiecki yaptıkları çalışmada ışınımsal sistem kullanılarak hava

sıcaklığının klasik yöntemlerde olduğundan 5°C daha düşük tutularak aynı ısıl konfor düzeyinin yakalanabileceğini göstermişlerdir [7].

Imanari vd. [2], tavana yerleştirilmiş ışınımsal panellerle geleneksel hava şartlandırma sisteminin ısıl konfor, enerji tüketimi ve maliyet açısından bir karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmada Tokyo'da küçük boyutlarda bir toplantı odasının soğutma durumu incelenmiştir. Toplantı odası tavandan soğutma sistemi ve klasik iklimlendirme sistemi ayrı ayrı uygulanarak oda içerisinde insanlar bulunduğu halde deney edilmiştir. İnsanların %80'inin tavandan soğutma sisteminin iklimlendirdiği ortamı konforlu buldukları ortaya çıkmıştır. Tavandan soğutma sistemi ile düşey yöndeki sıcaklık farkının daha az olduğu daha konforlu bir ortam sağlandığı görülmüştür. Duyulur ısı yükünün bir kısmı ışınımsal paneller tarafından karşılandığından mahalin taze hava ihtiyacı ve buna bağlı olarak fan gücünde azalma sağlanmıştır. Böylece tavandan soğutma yapıldığında az miktarda taze hava çekilmesi durumunda zemine yakın bölgede soğuk hava yığılması olayı ortadan kalkmıştır. Işınımsal panelle tavandan soğutma yapıldığında enerji tüketiminin %10 azaldığı görülmüştür.

Işınım esaslı sistemlerde hava haraketine olan bağlılık azaltılmaktadır ve bu durum iç ortam hava kalitesini arttırmaktadır [8], [9], [10], [11]. Bu sayede ısınan hava haraketi ile taşınan hastalık oluşturan alerjilerin oluşturduğu rahatsızlık riskleri azaltılır. Bunun sonucunda ışınımsal sistemler iç hava kalitesi beklentisinin yüksek olduğu yerlerde daha geniş bir uygulama alanında kullanılabilmektedir.

Yanli Ren ve Deying Li [12], çalışmalarında yaptıkları sayısal (CFD) çalışmasında örnek bir mahal modellemişlerdir. Mahal içerisinde 2 adet insan vücudu modellenmiş, hava sıcaklığı, ortalama ışınımsal sıcaklık ve PMV değerleri sadece sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca hava hız dağılımı ve sıcaklık dağılımı da incelenmiştir.

Richard Holz vd. [13], DOE programı kullanılarak örnek bir mahalde sayısal olarak hava hızı, nem, ortalama ışınımsal sıcaklıklar ve hava sıcaklıkları hesaplamıştır. Farklı şehirlere ve aylara göre genel konfor parametrelerinin değişimi ile PMV, PDD değerlerinin değişimini incelemiştir. Mahallerde set hava sıcaklığının değişimi ile termal konfor seviyesinin değişimi ve enerji tüketimleri incelenmiştir.

Suya Wanga [14], çalışmasında düşük ekserji ışınımsal soğutma sistemlerinin klima ve

nem cihazlarıyla beraber çalışma durumları incelenmiştir. Soğutma yükü, termal konfor index (PMV) değerlerinin, nem, kullanılan panel alanı sıcaklık, mahal içerisine gönderilen taze hava miktarı gibi parametrelerin panellere gönderilen suyun ekserjisine olan etkisi incelenmiştir. Soğutma yükü %100'den %57'ye ve %27'ye düşmesiyle gönderilen suyun ekserjisi de sırasıyla %47 ve %67 oranında azalır. Çalışmada CFD programı ile analizler ve deneysel doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Deneyler 10 x 6 x 2,7 m boyutlarında bir deney odasında yapılmıştır. Tavandan soğutma durumunda farklı su sıcaklıklarıyla PMV değerinin değişimini, panelden sağlanan ısı akısı ve oda sıcaklıkları incelenmiştir. PMV değeri 0,5'den 0'a yükseldiğide ve 0'dam -0,5 'düşürüldüğünde gönderilecek suyun ekserjisi de sırasıyla %13,5 ve %13,1 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

Suya vd. [15], termal konforun dış hava sıcaklığına bağlı olarak değişimini incelenmişlerdir. Bina enerji tüketim görüntüleme yazılımı kullanılarak evin farklı mahalleri (banyo, oturma odası, v.s.) için kabul edilebilir konfor sıcaklıkları ve dış hava sıcaklıklarına göre konfor sıcaklığı bantları oluşturmuştur. Dış hava sıcaklığına bağlı olarak temal denge sıcaklık ifadeleri oluşturmuşlardır.

Daha düşük enerji harcayarak, termal konfor parametrelerinin kontrol sistemi içerisine alınması ve konfor şartlarının sağlanması konusudan birçok çalışma yapılmıştır. Bu konuda iki ana konsept yer almaktadır: PMV kontrol ve operatif kontrol.

PMV Kontrol: PMV değeri insanın kendini ortalama konforda hissetme indexidir. Fanger [16] geliştirdiği PMV değerinin matametiksel idadesi kontrol sistemlerinde (Konforstat) kullanılabilecektir. Aynı termostta olduğu gibi konforstat da ortam şartlarını kabul edilebilir aralıklarda tutabilemektedir. Konforstat'da farklı olarak hava sıcaklığının dışında 6 parametre daha ölçülüp kontrol edilmektedir. Bu yüzden hava sıcaklık sensörünün dışında ışınımsal sıcaklıklarının, hava haraketleri ve nemin ölçüldüğü cihazlar gerekmektedir [17].

Lin vd. [18], PMV ve PDD değerine göre çalışan çoklu sensörlü HVAC kontrol sistemi geliştirmiş olup bu sistem termal konfor şartlarını anlık olarak arttırmıştır (PDD değerini %30'dan %20'ye düşürmüştür.) ve enerji tüketimini %17 azaltmıştır.

Bir diğer PMV kontrolör ise *'model-based predictive control system'* Freire vd. [19],

tarafından geliştirilmiş konfor parametrelerinin kontrol sistemine adapte edilmesiyle termal konfor şartlarının sağlanmasının yanında enerji tüketimleri azaltılmıştır.

'Operatif Sensör' Kontrol sistemleri sadece operatif sıcaklıklara göre de tasarlanabilir. Operatif sıcaklık hava sıcaklığına yakın bir değerdir. Bu sıcaklık değeri termal konfor değerinin en önemli iki parametresinin (hava sıcaklığı ve ortalama ışınımsal sıcaklık) etkisinin olduğu bir sıcaklık değeridir. Ortalama ışınımsal sıcaklık radyany ısıtma sistemlerinde termal konforun belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır, bu yüzden dikkatle irdelenmelidir [17].

Operatif sıcaklığın belirlenmesi için ışınımsal panel yüzey sıcaklıklarının bilinmesi gerekmektedir [20]. Işınımsal panel yüzey sıcaklığının artması durumunda odadaki hava sıcaklığı düşürülerek sürekli operatif sıcaklık ve termal konfor elde edilir [16].

Klasik hava sıcaklığı ve operatif sıcaklığa bağlı kontrol sistemlerinin performans karşılaştırmaları zamana bağlı olarak Berglund vd. [21] tarafından ve sürekli hal için Athienitis ve Shou [22] tarafından çalışılmıştır ve benzer bulgular elde edilmiştir. Operatif sıcaklığa göre kontrol yapılan sistemlerde sadece hava sıcaklığına bağlı kontrolün yapıldığı sistemlere göre fazla ısıtma (overheating) yapılmadığından ve hava sıcaklığının düşük tutulmasıyla %10-%12 enerji tasarrufu sağlanmıştır, daha konforlu ortam oluşturulmuştur ve ısı ihtiyaçlarına daha hızlı vermiştir.

Catalina [23], tavandan soğutma sistemlerin termal konfor üzerindeki etkisini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında CFD ile hesaplama ve dah sonra deneysel doğrulama ile mahal içerisindeki ortalama ışınımsal sıcaklıkları, düşey yöndeki sıcaklık farklarını, hız ve PMV dağılımlarını incelemiştir. Çalışmalarındaki sayısal ve deneysel çalışmalar uyumlu çıkmış olup, yerel konfor şartları tümüyle sağlanmıştır.

Taeyeon Kim [24], iki aşamalı genetik algoritma metodu kullanılarak radiant soğutma paneli ve hibrid havalandırma sistemini optmimum termal konfor şartlarını sağlayacak, minimum düşey yönde sıcaklık farkları oluşturacak ve minimum soğutma yükü oluşturacak şekilde optimize eden yöntem geliştirmiştir. Parametreler; 3 farklı boyutlara sahip oda konfigürasyonu, havalandırma konumu (duvar üst-alt, tavan, zemin), 8 farklı panel düzenlemesi (duvar, taban, tavan, mahal ortası), 13 farklı panel yüzey sıcaklığı (9 °C – 21 °C), sabit debide 2 farklı havalandırma kanal kesiti (0,5 m,

0,1m).

Maxime Tye-Gingras [25], çalışmalarında termal konfor değerini sağlayacak ve enerji tüketimini minimize edecek optimizasyon yöntemi geliştirmiştir. Optimizasyon parametreleri giriş suyu sıcaklığı ve panel düzenlemesidir. Toplam boru boyu verildiğinde model panelleri ideal olarak yerleştirmektedir. 8 farklı panel düzenlemesi için mahal içerisindeki PMV, sıcaklık dağılımını incelemiştir. Ayrıca 8 ayrı panel düzenlemesi için ortalama ısı akıları incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda Ansys-Fluent yazılımı kullanılmıştır.Optimum su giriş sıcaklığı toplam panel boyu ile alakalıdır, pencere yakınlarına panel konması ise termal konfor şartlarına daha rahat ulaşma imkanı vermiştir, düşük duvardan ısıtma panel yüksekliği ise daha az enerji tüketimi sağlamıştır.

Nagano ve Mochida [26], uzanma pozisyonundaki deneklerle tavandan ışınımsal soğutma sistemlerini toplam 28 deney yaparak incelemişlerdir. Edindikleri bulgular hastane odaları ve yatak odalarının tasarımı konusunda önem teşkil etmektedir.

1.1.1.2 Enerji Tasarrufu

Işınım ve taşınım esaslı ısıtma-soğutma sistemleri sağladıkları termal konfor şartları, enerji tüketimleri ve ısının transfer yöntemi aşısından farklılık göstermektedirler. Işınıma dayalı ısı transferinde mahaldeki kişi ile çevresi arasında sıcaklık farkının dördüncü kuvveti derecesinde ısı transferi olurken, taşınıma dayalı ısı transferinde mahaldeki kişi ile çevresindeki hava arasındaki sıcaklık farkının lineer etkisiyle gerçekleşir. DeWerth ve Loria [27], yaptıkları çalışmalarında radiant sistemlerin hava taşınım esaslı sistemlere göre 1950 öncesi binalarda %25, modern binalarda %10 daha düşük enerji harcadığı göstermişlerdir.

İnfiltrasyonla ısı kaybı enerji kullanımını ve konforu etkileyen önemli faktörlerden biridir ve konvektif ısıtma sisteminde ısıtılan ortamın hava sıcaklığının ortalama ışınımsal sıcaklığın üzerinde olmasının ışınımsal ısıtma sistemlerinde olduğundan daha fazla infiltrasyon ısı kaybına neden olması şeklinde istenmeyen bir sonucu vardır [7]. Bu sistemlerde hava sıcaklığının yüksek olması nedeniyle düşey yöndeki sıcaklık değişimi daha büyük olur, bunun sonucunda taban ile tavan arasında sıcaklık farkı fazla olur

[28]. Isıl ortamdaki sıcaklık dağılımının homojen olmaması mahal içerisinde toplam ısıl konfor hissinin azalmasına neden olmaktadır [29]. Klasik sistemlerin ısıtma veya soğutma yükünü karşılama kapasitesi havanın ısıl sığası ile sınırlı olduğundan bu sistemler sıcaklık değişimlerine daha yavaş cevap verir [21] ve bu yüzden hava sıcaklığı 1°C arttırılmak istendiğinde enerji tüketiminde %6 artış meydana gelir [30].

Myhren, J., Holmberg, S. [31], yaptığı çalışmalar neticesinde; Geniş yüzeylerin ısıtma alanı olarak kullanılarak, düşük sıcaklıklıklarda yapılan ısıtma işlemlerinde, ışınım ağırlıklı bir ısı transferi meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun sonucunda daha düşük hava sıcaklıklarında termal konfor elde edilir. Bazı durumlarda aynı konfor şartlarında hava sıcaklığı 1.5 °C kadar düşürülebilir. Bu durumda önemli miktarda enerji tasarrufu elde edilir. Aynı çalışmada, ısıl konfor ve enerji tüketimini incelemek amacıyla 4.8 m x 2.4 m x 2.7 m boyutlarında bir oda modeli üzerinde sayısal ve bu sayısal analizi doğrulamak için deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmada dış hava sıcaklığı İsveç koşullarına göre Aralık-Mart arası dönem ortalaması olan -5 °C alınmıştır. Odanın ısıtılması yüksek sıcaklık (YS, 90-70°C) ve orta sıcaklıkta (OS, 55-35°C) ısıtma ünitesi olarak radyatör, çok düşük sıcaklıkta (35-25°C) ısıtma ünitesi olarak ise duvardan ve yerden ışınımsal panelleri kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma düşük sıcaklıkta ısıtma sistemleri kullanıldığında daha düşük hava hızı ve düşey sıcaklık farkı elde edilerek geleneksel yüksek sıcaklıktaki ısıtma sistemlerine göre iç ortam şartlarının iyileştirilebileceğini göstermiştir. İyi tasarlanan ısıtma sistemlerinde hava sıcaklığını 1°C düşürmek, yıllık yaklaşık %7 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Fakat düşük sıcaklıkta ısıtma sistemleri direkt olarak dış hava ile havalandırma yapıldığında aşağı yönde hareket eden soğuk hava akımını karşılamada yetersiz kalmaktadır.

Stetiu [32], ABD'deki ticari binalarda ışınımsal soğutma sistemlerinin enerji ve pik güç kazancını belirlemek için farklı bölgelerde ışınım ve zorlanmış taşınımlı soğutma sistemlerini sayısal olarak modellemiştir. ASHRAE 62R standardının gerekliliklerini esas alan bu çalışma sonucunda geleneksel sistemlere göre ışınımsal soğutma sisteminin %30 daha az enerji tükettiği ve ortam şartlandırma için ihtiyaç duyulan pik güç talebinde %27 azalma olduğu, ayrıca tüm bölgelerde yoğuşma riski olmaksızın ışınımsal soğutma sistemlerinin kullanılabileceği görülmüştür. Elde edilen bulgular ışınımsal soğutma sisteminden elde edilebilecek potansiyel enerji tasarrufunun sıcak ve kuru

iklimlerdekine göre soğuk ve nemli iklimlerde daha az olduğunu ve %17 ile %42 arasında değiştiğini göstermiştir. Işınımsal soğutma sisteminde dolaşan suyun soğutulması için kullanılan soğutma ünitesinin performans katsayısı (COP) arttırıldığında öngörülen enerji ve pik güç tasarrufu artmıştır.

Miriel vd., [8], tavandan soğutma uygulamasında kullanılan ışınımsal panellerin enerji performanslarının incelenmesi ile ilgili Fransa'da iki kış ve bir yaz mevsimi boyunca deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bulgu olarak iyi yalıtılmış binalarda tavana yerleştirilmiş sulu ışınımsal panellerin ısıtma ve soğutmada kullanılabileceği görülmüştür. Işınımsal panellerinin kapasitesi sınırlı olduğundan şartlandırılacak mahalin ısıtma ve soğutma yükü düşük olmalıdır. Çalışmanın yürütüldüğü Fransa şartları, yoğuşmayı önlemek için panel yüzey sıcaklığının minimum 17°C'de tutulmak zorunda olması nedeniyle karasal bölgelere göre ışınımsal soğutma uygulaması için daha az uygundur.

Franc Sodec [33], tavandan soğutma panelleri için ekonomik analiz çalışmalar yapmıştır. 45-55 $W.m^{-2}$ soğutma yükünün olduğu durumlarda tavandan soğutma ilk yatırım maliyeti VAV sistemlere göre %20 oranında daha az çıkmıştır. Ayrıca %40-55 oranında yerden tasarruf sağlanmıştır. Pasif soğutmayla beraber tavandan soğutma VAV sistemlere göre %10-20 daha enerji tüketmiştir.

Kilkis [34], yaptığı çalışmalarda ışınımsal ısıtma ısı pompasının verimliliğini arttırdığını görmüştür.

Zmeureanu vd. [6], ısıtma yükü ve pik yüklerin ışınımsal sistemlerin kullanıldığında aynı konfor şartları için sırasıyla %77 ve %80 oranında daha az olduğunu göstermiştir.

Hissedilir ısı yükünün tavan tipi ışınımsal sistemlerle karşılandığı sistemlerde, mahale gönderilen hava hacimlerinin daha düşük olduğu ve hava taşınması için harcanan enerjinin %20 daha az olduğu görülmüştür. Bu tasarruf ise klasik hava taşınım esasına dayalı sistemlere göre toplamda %10 enerji tasarrufu oluşturmaktadır [2], [8].

Işınımsal sistemlerin hızlı montaj özelliği ise diğer bir avantajıdır. Watson vd. [35], 150 W/m^2 ısıl güce sahip panellerin kurulumunun ve işletme-bakım giderlerinin diğer sistemlere göre daha az olduğunu tespit etmiştir.

Işınımsal sistemlerde yüzey sıcaklıkları hava sıcaklığından yüksektir ve yüzeylerden dışarıya olan ısı kayıpları daha yüksektir. Bu olumsuzluk iyi bir yalıtım yapılarak giderilebilir [36,38].

Milorad Bojic [37], Sırbistan şartlarında, yoğuşmasız kazanla ısıtılan bir binada radyatörle ve ışınımsal ısıtma sistemlerinin enerji tüketimlerini karşılaştırmıştır. Bulgularına göre radyatörle ısıtma sistemi, ışınımsal panellere göre %28 daha fazla enerji tüketmiştir.

Jeong vd. [38], ışınımsal soğutma panellerinin klasik VAV sistemlerine göre %42 daha az enerji harcadıklarını belirtmiştir.

Stefano Paolo vd. [39], yaptığı çalışmada sayısal olarak PMV ve PDD değerlerini incelemiştir. PMV'nin (+0,5) – (-0,5) olduğu durumlar için mevsimlere bağlı operatif sıcaklık değerlerini hesaplanmıştır. Farklı kontrol tiplerine göre enerji tüketimleri ve PMV değişimleri incelenmiştir. Aynı çalışmada 3,5 m x 5,5 m x 2,8 m boyutlarında tipik bir ofis binasında deneysel çalışmalar yürütmüştür. Çalışmalarda ısıtma ve soğutma için fancoil kullanılmıştır. İçeride 2 adet insanın ürettiği duyulur ve ışınımsal ısı etkisini (%60 ışıınım) de dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalarda hava sıcaklığı yerine farklı termal konfor ayar sıcaklıklarına göre farklı kontrol tipleri için enerji tüketimleri ve oda içerisindeki konfor değerleri incelenmiştir. Dinamik adaptif konfor kontrol yaklaşımı ile oda içerisindeki hava sıcaklığını 2 °C düşürmüş ve bu sayede doğalgaz tüketiminde %29 azalma görülmüştür. Yazın ise hava sıcaklığının 1,5 °C yükseltilmesiyle %17 elektrik tasarrufu sağlanmıştır.

Brunk [40], radiant tavandan soğutma sisteminin klasik VAV sistemlere gore işletme maliyetlerinin %50 daha az olduğunu bildirmiştir.

Geregor vd. [41], çalışmasında bütünleşik konfor kriterlerinin ve ısı ihtiyacı dalgalanmalarının optimal bir şekilde yönetilmediyle ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Almanya'nın Freiburg kentinde bir ofis binasında deneysel çalışmalar yürütmüştür. Ticari binalarda adaptif konfor kontrolü yapılarak toplam soğutma yüklerinin azaltıldığını ve işletme giderlerinin azaltıldığı görülmüştür. Bütünleşik kontrol ile pik yük talebi %14-17 azaltılmıştır ve tüm binanın enerji tüketimi %6-7 oranında azaltılmıştır. Chiller güç gereksinimi %10 azaltılmıştır ve fan güç gereksinimi %45-51 azaltılmıştır.

1.1.2 Işınımsal Sistemlerin Diğer Sistemlerle Kıyaslanması

Son zamanlarda radiant sistemlerle hava taşınımı esaslı sistemlerin karşılaştırıldığı birçok çalışma yapılmıştır. Genel olarak ışınımsal sistemleri avantajları şu şekilde sıralanmıştır;

(1) Isıtma ihtiyacını azalttığı için, ısıtma sistemlerinin kapasitelerini düşmektedir. (2) enerji tüketimlerini düşürmektedir [2], [6], [8], [10], [28], [42].

(3) Düşük sıcaklıklarda çalışabilme yeteneği sayesinde ısı pompası, güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynakların kullanılabilme imkanı sağlar [34]. Taşınım esaslı sistemlere göre daha fazla sağladığı ışınım etkisiyle düşük hava sıcaklığında termal konfor şartlarını sağlar ve daha konforlu ortamlar oluşturur [6], [28], [36], [43], [44].

Diğer yandan taşınım esasına dayalı olarak çalışan sistemlerde hava sıcaklığı ortalama ışınımsal sıcaklıktan daha yüksek olduğundan infiltrasyonla olan ısı kaybı ışınımsal sistemlere göre daha fazladır [6], [37]. Bu durum istenmeyen bir durumdur ve binanın enerji tüketimini ve konfor derecesini etkilemektedir [27]. Ayrıca zorlanmış hava taşınımı esaslı sistemlerde düşey yönde büyük sıcaklık farkları oluşur ve ısınan havanda tavana doğru toplanırken tavandaki sıcaklık zemindekinden farklı olmaktadır [11], [28]. Ayrıca yüksek sıcaklık gradyenlerinin oluşması ile de mahal içerisinde düzenli olmayan konfor dağılımı oluşturacaktır [43]. Klasik sistemler ısı transfer aracı olarak düşük termal kapasiteye (ısı iletim katsayısı ve debi) sahip havayı kullanırlar [9]. Taşınım esasına dayalı sistemler sıcaklık değişimlerine daha yavaş cevap verirler [21]. Işınımsal sistenlerin gereksinim duyduğu alan VAV sistemlere göre daha azdır [45].

1.1.3 Işınımsal Sistemlerin Isıl kapasite ve Isı Transfer Katsayıları İle İlgili Çalışmalar

Vangtook ve Chirarattananon, sıcak ve nemli iklime sahip olan Tayland şartlarında havalandırmanın doğrudan dış havayla yapıldığı bir ışınımsal soğutma uygulamasına ilişkin deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Deneyler ve sayısal çözümler 7,5 m^2 alanına sahip bir odada Mart ayının sıcak ve kuru, Mayıs ayının nemli ve Aralık ayının da soğuk dış hava şartlarında yürütülmüştür. Sayısal bulguların deney verileriyle birebir örtüştüğü görülmüştür. ASHRAE ve ISO standartları baz alındığında deneysel ve sayısal bulgular ışınımsal soğutmayla ısıl konfor sağlanabileceğini göstermiştir. Fakat

yoğuşmanın önlenmesi amacıyla soğutma suyu sıcaklığının minimum 24-25°C'de tutulması gerektiğinden birim alan başına soğutma kapasitesi 40 W/m^2 ile sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle ışınımsal panelin soğutma etkisi bazı durumlar için yetersiz olmaktadır. Buna rağmen ışınımsal soğutma panelleriyle hava sıcaklığında dikkate değer bir değişim elde edilemediği bu durumlarda bile ışınımsal sıcaklığın düşmesi sağlanabilmektedir [46].

Işınım ve taşınımla olan ısı transferi literatürde çoğu araştırmacı tarafından incelenmiştir. Araştırmalara göre doğal taşınım ve ışınım düşük oda sıcaklıklarında bile etkindir [47-49]. Mahal içerisindeki sıcaklık ve hız dağılımlarında ışınımun etkisi çok fazladır. [20-22]. Işınımun ve taşınımın beraber olduğu ışınımsal ısıtma-soğutma panelleri ile yapılan uygulamalar literatürde çokca bulunmaktadır.

Causone vd. [53], ışınımsal ısıtma sistemlerindeki ısı taşınım katsayısını incelemiştir. Chen ve Kooi [54], ışınımsal panel hesaplama modeli geliştirmiştir. Modelde tavandan ısıtma panelleri ile mahaldeki yüzeyleri yüzey ısı değiştiricisi gibi olarak kullanarak, mahal içerisini havayla, diğer yüzeyleri ise ışınımla ısıtılmasını sağlamıştır. Stetius ve Feustel [55], ısıl difüzyon eşitliklerini basitleştirerek iki boyutlu ışınımsal panel modeli geliştirmiştir.

Conroy ve Mumma [56], tavandan uygulanmış soğutma panelleri için analitik model türetmiştir. Bu metodolojinin temeli bilinmeyen panel yüzey ortalama sıcaklığının iteratif proses ile bulunarak soğutma kapasitelerinin hesaplanması şeklindedir [56].

Son yıllarda ise Jeong ve Mumma [57], birleşik taşınım katsayısı önererek ışınımsal panel kapasitelerini hesaplamışlardır. Yaptıkları çalışmaların amacı, havalandırma difüzerleri yakınındaki panellerdeki hava haraketi panel yüzeylerinde zorlanmış taşınım oluşturmaktadır. Bununla birlikte panel yüzeylerindeki hava hızlarının, difüzörlerin bulunduğu yere bağlı olarak değişmesiyle toplam taşınım katsayısı da değişmektedir.

Xiang Gong [58], ışınımsal panellerde boru ile alüminyum plaka arasında ısıl direnç kaynaklanan termal performans düşüşünü incelemiştir. Isıl temas direnci olduğunda soğutma kapasitesi %18,6 ve ısıtma kapasitesi %20,6 düşmektedir. Bu yüzden tasarımlarda termal rezistansların azaltılması yönünde önlemler alınmalıdır.

Néstor Fonseca ve Cristian Cuevas [59], kurduğu iki adet deney odasıyla tavandan

ışınımsal ısıtma soğutma deneyleri gerçekleştirmiştir. Deney odalarında Belçika şartlarındaki standart bir ofis benzeştirilmiştir. Toplam 46 adet deney yapmıştır. Su debisinin, su sıcaklığının havalandırma sisteminin ve ısıl yük dağılımın panel performansına etkisini incelemiştir. Laboratuvar deneylerinin bulgularına göre ısı transfer katsayısı ısıtma durumunda soğutma durumuna göre her zaman %10 daha fazladır. Bina kabuğu ve paneller arasındaki ısı yalıtımı soğutma kapasitesini %8 oranında düşürmektedir.

Shigeru O. ve Hisako [60], tavan soğutma panellerinde boru sıklığını ve oda sıcaklığı ile panele gönderilen suyun sıcaklığını kullanarak yeni bir matematiksel model geliştirmiştir. Geliştirdiği matematiksel modeldeki verilerle deneysel bulguları karşılaştırmıştır. Yaptığı analizler sonucunda ısıtma durumunda panelden gerçekleşen ısı transferinin %70'i ışınımla, soğutma durumunda ise %60'ı ışınımla gerçekleşmiştir.

Işınımsal sistemlerin boyutlandırılması konusunda birçok çalışma yapılmasına rağmen henüz boyutlandırma ve montajı konusunda herhangi bir standart oluşmamıştır. ASHRAE standart ısıtma sistemlerinin ısı yükü hesabı ısıtma sistemi dizaynı konusunda prosedürleri oluşturmasına rağmen, bu yöntemlerin ışınımsal sistemlere uygulanması için deneysel çalışmalar gerekmektedir [27].

Literatürde ışınımsal sistemlerin boyutlandırılmasında (boyutlar, gerekli ünite sayısı v.s.) (DeWerth ve Loria, [27]) ve bu sistemlerin termal konforu sağlayacağı pozisyonların (yükseklik, açı, v.s.) (Dudkiewicz ve Jezowiecki, [7]) birçok öneri yer almaktadır. Petras ve Kalus [42], IR ısıtıcılar için kabul edilebilir minumum yüksekliğin belirlenmesi için ısıtıcının boyutlarına, iç ortam hava sıcaklığına, maksimum ışınımsal akı yoğunluğuna, ısıtıcının yüzey sıcaklığına ve ışınım yüzey sıcaklığına bağlı matematiksel bir eşitlik geliştirmiştir.

Isıtma yükünün belirlenmesi ışınımsal sistemlerin boyutlandırılması ve konumlandırılması için çok önemlidir. Yayma oranı, taşınım katsayısı ve Isıl geçirgenlik değerleri (U) herbir yüzey için belirlenmelidir. Isıl geçirgenlik değerinin yüksek olması ısı kaybını ve gerekli panel yüzey alanını arttırmaktadır. Örneğin yüzey sıcaklığının 49 °C olduğu durumda tavan alanının %49'u kullanılırken, 82 °C olduğu durumda sadece %20'si kullanılır. Ayrıca oda yüksekliği arttıkça ihtiyacı karşılamak için daha geniş panel

yüzey alanı gerekmektedir ve bunun sonucunda panelden olan toplam ısı kaybı artacaktır. Oda geometrisinin değişmesiyle daha çok duvarın ısıtılması gerekecek ve ısıtılmayan yüzey alanı artacaktır [28].

Kilkis vd. [34], yaptığı çalışmalarda ışınımsal panellerden elde edilen ısı akısını iç hava sıcaklıkları, ısıtılmayan yüzey sıcaklıkları, mahaldeki iç hava sıcaklıkları ve yüzey yayıcılığına bağlı olarak hesaplamıştır. Taşınıma bağlı ısı transferi yükseklik ve mahal boyutlarına bağlı olarak değişmiştir. Eğer bu parametreler iyi bir şekilde ilişkilendirilebilinirse, panel yüzeyinden elde edilecek ısı akısı sadece yüzey sıcaklığına bağlı olarak ifade edilebilir ve elde edilen toplam ısı akısı ışınım ve taşınımının toplamıdır.

Işınımsal soğutma panellerinin odanın üç farklı bölgesinde olması durumu için CFD çalışmaları yapmıştır. Oluşturulan CFD modelinde içerisinde insanı vücudunu da benzeştiren bir hacim de oluşturulmuştur. Hacim içerisinde aydınlatmadan ve insanlardan gele yükler, güneş ışınım etkileri dikkate alınmıştır. Her üç durum için de oda içerisindeki sıcaklık-hız dağılımları, duvar yüzey sıcaklıkları hesaplanmıştır. Farklı düzenlemeler için MRT, operatif sıcaklık değeleri karşılaştırılmıştır. İnsan vücudu benzetimi oda içerisinde ışınımla ve taşınımla olan ısı transferleri incelenmiştir. Oda içerinde bulunan kişi ile çevresi arasında ortalama %35 oranında ısı transferi gerçekleşmiştir [61].

Tavandan soğutma panelleri için deneysel olarak 18 farklı durum için ışınımla ve taşınımla olan ısı transfer miktarlarını ve ısı transfer katsayılarını incelemiştir. Deneyler esnasında hava sıcaklığı, yüzey sıcaklığı, MRT ve operatif sıcaklıkları ölçülmüştür. Bulgularında, ortalama taşınım ısı transfer katsayısını 4,2 $W/m^2.K$, ışınımla olan ısı transfer katsayısı 5,4 $W/m^2.K$, toplam ısı transfer katsayısını ise 8,5 $W/m^2.K$ bulmuştur [62].

Rafet Karadağ [63], tavandan soğutma durumunda (3x3), (3,4x3), (4,6x3) boyutlarındaki üç farklı oda yapısı ve üç farklı yüzey emissivite değerleri için ışınımla ve taşınımla olan ısı transfer katsayılarını hesaplamıştır. Bulgularında taşınım katsayısının yüzey, hava sıcaklığı ve yayma oranı değerine bağlı olarak değişiminin amprik ifadesini oluşturmuştur.

Awbi [64], hava ve yüzey sıcaklıklarının ölçüldüğü bir kapalı hacimdeki hava taşınım katsayılarını incelemiştir. Çevre sıcaklıkları hassas bir şekilde kontrol edilebilen 1,01m x 1,05m x 1,05m boyutlarında küçük hacimde deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Francesco Causone vd. [53], 10 farklı panel düzenleme konfigürasyonları (tavan, taban, duvar) için deneysel çalışmaları yürütmüşlerdir. Farklı yüzeylerden elde edilen taşınım katsayıları karşılaştırmışlardır. Elde ettiği taşınım katsayısı ifadelerini literatürdeki korelasyonlarla karşılaştırmışlardır. Tavandan ısıtma-soğutma durumu için taşınımla ve ışınımla olan ısı transfer katsayılarını odanın farklı yükseklikleri için deneysel ve sayısal olarak bulmuşlardır. Deneysel çalışmalarını 4,3 m x 2,7 m x 2,56 m boyutlarındaki bir deney odasında yapmışlardır. Tavandan soğutma durumu için taşınımla olan ısı transfer katsayısını 4,4 $W/m^2.K$, ışınımla olan ısı transfer katsayısını 5,6 $W/m^2.K$, toplam ısı trasfer katsayısını ise 13,2 $W/m^2.K$ bulmuşlardır. Literatürde ortalama; taşınımla olan ısı transfer katsayısını 3,1-4,4 $W/m^2.K$, ışınımla olan ısı transfer katsayısını 5,5 $W/m^2.K$, toplam ısı trasfer katsayısını ise 11 $W/m^2.K$'dir.

Frenc Kalmar vd [65], ısıtma sisteminin konumunun ve oda geometrisinin ortalama ışınımsal sıcaklık değerine etkisini çalışmıştır. Aynı çalışmaları içeride oturan insanın iki farklı oturma konumu, farklı dış hava sıcaklıkları ve farklı panel çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak incelemişlerdir. Bulgulara göre MRT değerinin oda geometrisiyle yakından ilgili olduğunu saptamıştır.

Awbi vd. [66], başka bir çalışmada 2,78 m x 2,78 m x 2,3 m boyutlarında bir deney odasında ısıtıcıların farklı konumlarına göre doğal taşınım ve zorlanmış+doğal taşınım katsayılarını elde etmiştir. Elde bulgulardan amprik ifadeler oluşturmuştur.

Gökhan, S. ve Muhsin, K. [67], iki panel radyatörün bulunduğu bir oda üç boyutta sürekli hal için modellenmiştir. Oda içerisinde oturan bir insan modeli eklenmiştir. Bulgularına göre; duvar ve pencerenin iyi yalıtılmasıyla daha iyi termal konfor şartları sağlanırken enerji tüketimleri azaltılmaktadır.

Min vd. [68], gerçek ölçekte bir hacimde taşınım katsayılarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda farklı deney odası boyutlarının etkisi de incelemişlerdir. Çalışmalarında ayrıca ışınımla ısı transferi de hesaplanmıştır.

Khalifa ve Marshall [69], gerçek ölçekte iki farklı deney odasında çalışmalarını

yürütmüştür. 2,95 m x 2,35 m x 2,08 m boyutlarındaki deney odasının iç tarafı binalardaki oturma odasını benzeştirmektedir. Deney odasının dış hacmi ise soğuk bölge olup dış şartları benzeştirmektir. İki farklı hacimde 21 farklı sıcaklık sensörü ile yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Hava sıcaklığı ise 7 farklı noktadan ölçülmüştür. Ölçümler duvarın 6 mm uzaklığında sınır tabakasının kenarından ölçülmüştür. Çalışmalarında ışınım etkisi göz ardı edilmiştir. Hata analizinde duvar ve hava sıcaklığı arasındaki 1 °C fark için hata analizinin %21 olduğu görülmüştür. Bulgulara göre düşey yüzeylerdeki doğal taşınım katsayıları hesaplanmıştır. Bulgular literatürde kullanılan değerlerden 1,7 kat fazla çıkmıştır. Duvar yüzeylerindeki bölgesel taşınım katsayılarının dağılımı tüm yüzeydeki ortalama taşınım katsayısından yaklaşık %10 oranında sapmıştır.

Dela force vd. [70], 2,034 m x 2,034 m x 2,334 m boyutlarındaki, fan-coil ısıtıcı olan odada duvar yüzeylerindeki taşınım katsayıları incelenmiştir. Işınım etkisi ihmal edilmiştir ve çok küçük sıcaklık farkları incelenmiştir. Duvar, taban ve tavan için ayrı ayrı taşınım katsayıları bulunmuştur. Bulgular sırasıyla; 1,6 W/m^2, 4,8 W/m^2, 0,5 W/m^2 [70].

1.1.4 Işınımsal Soğutma Sistemleri ve Nem Kontrolü

Tavandan soğutma sistemlerinin birçok avantajının yanında, uygulamada kullanılmasını zorlaştıran dezavantajı yoğuşma problemidir. Duvar yüzeylerinde gerçekleşecek yoğuşmanın ciddi problemlere yol açma riski vardır. Duvar yüzeylerinde yoğuşma olması durumunda korozyon, küf ve iç hava kalitesinin bozulması gibi risklere neden olmaktadır [71, 72].

Tavandan soğutma ile iklimlendirme sistemlerinde mahal içerisindeki nem davranışları ve yoğuşma riski dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Tavandan soğutma sistemlerine nem alıcı havalandırma sisteminin entegre edilmesiyle, yoğuşma riskinin önlenmesi, termal konfor ve enerji verimliliği açısından birçok avantaj sağlanır [73–75]. Hem yoğuşmayı önlemek hem de soğutma kapasitesini arttırmak için birçok çalışma yapılmıştır.

Özellikle Antalya gibi nemli bölgelerde yoğuşma riski iyice ön plana çıkmaktadır. Yoğuşmanın oluşmaması için tavan panellerinin yüzey sıcaklığının daima çiğ noktası sıcaklığının üzerinde olması alınabilecek önlemlerin başında gelmektedir. Yapılan

çalışmalarda yoğuşmaya karşı alınan tedbir bu yöndedir [76]. Ancak, bu da sistemin ısıl verimini düşürmektedir. Örneğin 30°C sıcaklıkta %60 bağıl nemde bulunan bir ortamda soğutma suyu sıcaklığı hiçbir zaman 21°C'nin altına inmemelidir. Bu durumda soğutma kapasitesi hep sınırlı kalmakta istenilen performans elde edilememektedir. Vangtook, [46] tarafından yapılmış olan bir çalışmada, deney odası sıcak ve nemli bir bölge olan Tayland'da kurulmuş ve su gidiş sıcaklığı 24 °C'de sabit tutulmuştur. Bu durum panellerin ısıl kapasitesini düşürse de, bulguların ASHRAE ve ISO tarafından belirtilen konfor şartlarını sağladığı görülmüştür.

Nem bütün hava şartlandırma sistemlerinde çözülmesi gereken bir problem olarak karşımıza çıkar. Nem alıcı sistemler ile ışınımsal soğutma sistemlerinin entegrasyonu konusunda birçok araştırmacı nem alıcı sistemin performansı ve iç hava kalitesine olan olumlu etkisini deneysel ve sayısal çalışmalar yürüterek incelemişlerdir [77,78].

Leigh ve Song [79,80], Kore şartlarında yerden soğutma sistemi ile havalandırmanın entegrasyonunu çalışmış, sistem kontrol parametrelerinin sıcaklık ve nem üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan sistem, tavandan soğutma sistemlerinin, dış ortam havasının şartlandırılmasıyla birlikte kullanılmasıdır. Bu sistemde dış ortam havası, sirküle edilen iç ortam havasından ayrı olarak şartlandırılmaktadır. Bu sayede ortamın nemi hep düşük tutulmakta ve soğutma kapasitesi yoğuşma riski olmadan arttırılabilmektedir. Zhang vd. [81], yapmış oldukları çalışmada, nemli bir bölge olan Hong Kong'daki bir ofis odasına tavandan soğutma sistemi kurulmuş ve oda içerisine giren temiz hava kontrollü olarak soğutulmuş ve nemi alınmıştır. Bu şekilde tavan soğutma sistemlerinden oldukça iyi verim alındığı belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada, binanın sızdırmazlığının önemi üzerinde de durulmuştur. Benzer bir çalışma sıcak ve nemli bir iklimi olan Çin'in Pekin şehrindeki bir ofis ortamı için yapılmıştır. Çalışmada tavandan soğutma sistemi, nem alıcı ve havalandırma sistemi bir arada kullanılmış, bu sayede hem yoğuşma riski ortadan kaldırılmış, hem de iç hava kalitesi iyileştirilmiştir.

Nemi alınmış havayla entegre edilen tavandan soğutma, termal konfor, yoğuşma riskinin ortadan kaldırılması ve enerji tasarrufu açısından avantaj sağlar. Binghooth ve Zainal [82], üç farklı hava debisi için yaptıkları deneyler sonucunda; 243 kg/h kütlesel

debide ve 2673 kg/h yüksek kurutma kapasitesiyle ısıtma yapmaksızın %40 bağıl neme 10 dakikada düşürmüşlerdir. Ayrıca termal konfor şartları altında tavan yüksekliğini etkisini incelemişler ve yerden 2 m yükseklikte enerji sarfiyatı açısından en düşük değerlere ulaşıldığını görmüşlerdir.

Zhang vd. [83], yaptıkları çalışmalarda nem alıcı/havalandırma sistemi ile tavandan soğutma panellerinin performansını incelemiştir. Panel yüzeyinde oluşması muhtemel yoğuşma konusunda öngörü çalışmaları yürütülmüştür. Odadaki nem hesaplamaların yapılarak panel yüzeyinde oluşabilecek yoğuşma riskini ortadan kaldıracak nem alma ve havalandırma stratejilerini geliştirmiştir. Bina enerji görüntüleme programı yardımıyla ile de nem kontrol sisteminin enerji performansları görüntülenmiştir. Tavandan soğutma sistemi, klasik klima sistemlerine göre, havalandırma ile nem kontrolünün yapıldığı durumda %47, kimyasal nem alıcı sistemle ise %30 enerji tasarrufu sağlamıştır.

Benzer şekilde 'kimyasal nem alıcı' şeklinde ifade edilen sistemlerinin ışınımsal sisteme entegrasyonu da birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Oda içerisindeki nem oranının konfor düzeyinde korunması ve panel üzerindeki yoğuşma riskinin düşürülmesinin gerektiği sıcak ve nemli iklimlerde tavandan soğutma ile kurutucuyla soğutma kullanılması önerilen bir yöntemdir. Niu vd. [84], bu yöntemi bina enerji tüketim görüntüleme kodu olan ACCURACY'yi kullanarak Hong Kong şartlarında bir ofis modellemişlerdir. ve konvansiyonel klima sistemi, ısı geri kazanımlı klima sistemi ve klima santralli ışınımsal soğutma işe karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda kurutucuyla birlikte tavandan soğutmada konvansiyonel sistemlerle kıyaslandığında % 44 lük enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Binghooth A.S. ve Zainal Z.A [85], çalışmalarında sıcak ve nemli bir bölge olan Malezya şartlarında silika jelin kullanıldığı döner dessiccant nem alıcı sistemi ışınımsal tavandan soğutma sistemlerinde nem kontrolü amacıyla kullanılmasını çalışmışlardır. Çalışmanın sonucunda desiccant nem alıcı sistem bağıl nem oranını %40 oranında azaltmıştır. Tavan panellerine gönderilen suyun sıcaklıkları 6-10 °C'lere kadar düşürülebilmiştir. Panellere gönderilen su sıcaklığı 14 °C iken, herhangi bir yoğuşma olmadan bağıl nem oranı %50'de tutulabilmiştir. %70 bağıl nemin altında ise herhangi bir yoğuşma

görülmemiştir. Sıcak ve nemli iklimlerde yoğuşma riskinin panel yüzey sıcaklığının kontrol edilmesiyle ve havalandırma sistemindeki nemin kontrolü ile engellenebileceğini belirtmişlerdir.

Ameen ve Mahmut [86], çok nemli tropikal iklim şartlarında desiccant kurutucu sistem ile ışınımsal soğutma sisteminin performansını deneysel incelemiştir. Çalışmaları sonunda çok nemli iklimlerde bile yoğuşma probleminin kurutucu ile çözülebileceğini göstermiştir.

Çin'de desiccant nem alıcı sistem çok hızlı bir şekilde hızla yaygınlaşmaktadır. Liu X.H. [87,88], desiccant nem alıcı sistemlerin Çin iklim şartlarındaki performanslarını detaylı bir şekilde incelemiştir.

Loveday vd. [73], BS EN ISO 7730 standartının tavandan soğutma sistemlerine uyumluluğunu deney etmişlerdir. Bay ve bayan toplam 128 ofis çalışanı üzerinde dört farklı yüzey sıcaklığı ve iki farklı bağıl nem koşullarında yaptıkları deneyler sonucunda standartın, bir düzenleme gerekmeksizin geçerli olduğunu belirtmişlerdir.

Sıcak ve nemli iklimlerde ışınımsal soğutma uygulamalarında, panel üzerindeki havanın yoğuşmasının engellenme zorunluluğu vardır. Vangtook ve Chirarattanano [46], ışınımsal soğutmayı TRNSYS bilgisayar kodunu kullanarak deney odalarını bütün bir yılı görüntüleyerek incelemişlerdir. Çalışmalarında soğutma suyu tedariğinde soğutma kulesi kullanımını ya da doğrudan veya dolaylı evoparatif soğutmanın enerji tasarrufuna yararını incelemişlerdir.

Tavandan ışınımsal soğutma panelleri düşük enerji sarfiyatı ve konfor avantajından dolayı klima sistemlerine göre tercih edilirler. Fakat iç mahal neminin kontrol edilememesi dezavantajlarıdır. Fauchoux vd. [89], bu sınırlamanın üstesinden gelmek için ısı ve nem transferine imkan sağlayan panel geliştirmişlerdir. Çalışmalarında geliştirdikleri panelleri farklı sıcaklık ve nem değerleri için sayısal ve deneysel olarak deney etmişlerdir. Panelin etkililik oranı ortam şartlarına göre %15 ile % 28 arasında değişiklik göstermiştir. Sayısal ve deneysel çalışmaları ortalama %5' lik sapma ile uyumluluk göstermiştir.

Stanley A. [90], geniş pencere alanine sahip tarihi binalarda soğutulmuş tavan için yoğuşma kontrolünü incelemiştir. Kontrolün sabit su gidiş sıcaklığı değişken su debisi ya

da sabit debi değişken su sıcaklığı ile yapılmasını önermiştir. Yapılan deneyler sonucunda bu yöntemle, bütün pencere ve kapıların açılarak çiğ noktası sıcaklığının aniden yükseldiği durumda bile yoğuşma problemine rastlanmadığını belirtmiştir.

Oda sıcaklığı ile bağıl nem termal konforu etkileyen iki önemli parametredir. Fenghua Ge vd. [91], termal konfor eşitliğindeki diğer değişkenleri sabit tutarak oda sıcaklığı ile bağıl nemin PMV ve enerji sarfiyatına etkisini Çin'deki beş farklı iklimdeki altı şehire göre incelemiştir. Oda hava sıcaklığının 1˚C artmasıyla aynı bağıl nem koşullarında enerji tüketiminde %5,2 – 6,2 aralığında azalma görmüşlerdir. Aynı oda sıcaklığında bağıl nemin %40' tan %70'e artmasıyla enerji tüketiminde %7,7 – 35,7 azalma görmüşlerdir. Sıcaklığın PMV üzerindeki etkisinin daha büyükken, bağıl nemin enerji tüketimine etkisinin daha fazla olduğu sonucunda varmışlardır. Bundan dolayı oda sıcaklığı ile bağıl nem değerleri iklim şartlarına göre belirlenmesi gerektiğini savunmuşlardır.

Işınımsal soğutma sistemleri birçok avantaj içermesine rağmen en büyük dezavantajı sadece duyulur soğutma yükünü karşılamasıdır. Gizli ısı yükünü karşılamak için ise havalandırma sistemi kullanılmakta ve nem bu yöntemle istenilen seviyede tutulabilmektedir. Bu dezavantajı ortadan kadırmak amacıyla Saskatchewan üniversitesin 'Novel heat and moisture transfer panel (HAMP)' geliştirmiştir. Bu panel duyulur soğutmanın yanında aynı zamanda nem transferi ve mahal içerisindeki nemin kontolünü de sağlamaktadır [92-95].

Yarı geçirgen membrandan yapılan bu tarz paneller su buharı için geçirgen fakat akışkan için geçirgen olmayan yapıdadır. Bunun anlamı HAMP'ın içerisindeki sıvı nem alıcı sistem yarıgeçirgen membran ile direkt olarak temas halinde olmasına rağmen mebrandan oda içerisine herhangi bir sızıntı olmamaktadır. Yarı geçirgen membranlar yaygın olarak nefes alabilir kıyafetlerde ve bina malzemelerinde kullanılmaktadır. Bu şekilde kullanılan yarı geçirgen membranlar oda içerisindeki hava ile nem alıcı sıvı arasında nem transferi sağlamaktadır.

Bu sistemde nem transferinin sağlanabilmesi için membran boyunca su buharı konsantrasyon gradyaninin oluşması gerekmektedir. Hava içerisindeki nem miktarı azaldığında, odanın nemlendirilmesi için akışkan içerisindeki su buharı kütle oranın

daha yüksek olması gerekmetedir. Hava içerisindeki nem miktarı yüksek olduğunda nem alınması gerekmekte ve akışkan içerisindeki su buharı kütle oranının havanınkinden daha düşük olması gerekmektedir [96].

Sıvı nem alıcı sistemler HVAC endüstrisinde kullanılmakta ve havayı çiğ noktası sıcaklığına kadar soğutmadan neminin alınmasına olanak vermektedir. Sıvı nem alıcı sisteme örnek olarak su-tuz karışımı verilebilir. Tuzlu su karışımının saf suya göre daha düşük yüzey basınıcına sahip olduğundan daha düşük yüzey bağıl nem değerine sahiptir. Örneğin 20 °C suyun yüzey nem oranı 14 g_w/kg_{air} (100 %RH), aynı sıcaklıkta doymuş soyum karbonatın yüzey bağıl nem oranı 11 g_w/kg_{air} (75 %RH), doymuş magnezyum kaloridin yüzey bağıl nem oranı 4,8 g_w/kg_{air} (33 %RH), doymuş lityum kaloridin yüzey bağıl nem oranı 1,6 g_w/kg_{air} (11 %RH)'dır [97].

1.1.5 Düşey Levhada Su Buharı Film Yoğuşması ve Eşzamanlı Isı ve Kütle Geçişi Problemini Konu Alan Çalışmalar

Yoğuşan ve yoğuşmayan gaz karışımı içerisindeki su buharının yoğuşma problemi iklimlendirme, soğutma, uzay endüstrisi, nükleer tesiler ve ısı değiştiriciler gibi bir çok uygulamada karşımıza çıkmaktadır.

Fakat literatürde yüksek kütle oranına sahip yoğuşan gaz karşımlarının çözümlerine dair birçok veri olmasına rağmen, yoğuşan gazların düşük kütle oranına sahip olduğun durumlar için çalışmalar kısıtlıdır.

Bu konudaki ilk çalışmaları Sparrow ve Gregg [98], Koh vd. [99], Sparrow ve Lin [100] ve Minkowycz ve Sparrow [101], tarafından yapılmıştır. Sonrasında ise gaz karışımı içindeki yoğuşma birçok araştırmacı tarafından da detaylı olarak çalışılmıştır [102–106]. Düşey bir yüzeyde gaz karışımı içerisindeki su buharının yoğuşması da bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir [107–109].

Yoğuşma problemini farklı amaçlar için deneysel olarak incelenmesi literatürde yer almaktadır. Düşey bir yüzeyde gaz karışımı içindeki su buharının yoğuşma probleminin deneylerinin büyük bir çoğunluğu nükleer reaktör kabini ile alakalıdır. Literatürde bununla alakalı birçok bulgu da yer almaktadır [110-117].

Düşey bir levhada su buharı gaz karışımının yoğuşması konusu en çok nükleer tesis

dizayn mühendisliğinde kullanılmaktadır. Yeni nesil 'light water reactor' güvenlik zırhında meydana gelmesi muhtemel kaza güvenlik zırhının duvarında gerçekleşen yoğuşma ve zırhın dış yüzeyinde gerçekleşen buharlaşma olduğu durumda olması muhtemel olarak kabul edilmektedir. Bu ısı transfer prosesi doğal olarak gerçekleşmektedir. Bu yüzden nükleer koruyucu zırh yapısının güvenliği için buradaki ısı transferi mekanizmaları önem kazanmaktadır [118].

Bir diğer örnek ise buhar jenaratörleri borulama sistemlerde oksijen ve hidrojen oluşma problemidir. Yapılan radyoanalizlerde reaktör çekirdeğindeki soğutucularda hidrojen ve oksijen herzaman oluşabilmektedir. Yapılan araştırmalarda su buharı reaktörlerinde tahliye bölümü olmayan geometrilerinde çok iyi yalıtılmayan tesisat bölmelerinde su buharının yoğuşmasıyla bu iki komponent birikebilmektedir. Bunun sonucunda borulama sistemlerinde zamana bağlı olarak problemler ortaya çıkabilmektedir [119].

Ayrıca yoğuşmayan karışım içerisindeki su buharının yoğuşması çalışmaları yatay boru ısı değiştiricilerde de görülmektir (birçok endüstriyel uygulamasından dolayı). Bu konuda literatürde Vierow [118], Ogg [120], Siddique [121] ve Kuhn vd. [122], başı çektiği birçok deneysel çalışma yer almaktadır.

Bu problemin çözümünde nümerik yöntemler ekonomik olmasından dolayı son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Sayısal yöntemler sayesinde yoğuşma prosesinin deneysel olarak incelemenin zor olduğu dinamik karakteristiği de incelenebilmektedir. CFD yöntemi ve programlama ile yoğuşmayan gaz içerisindeki su buharının yoğuşması modellenebilmektedir. Valencia [123], su buharı ve bir tür asitin bir plaka üzerindeki yoğuşmasını geliştirdiği özel Fluent kodu ile incelemiştir. Martin-Valdepenas vd. [124], farklı film yoğuşma modelleri geliştirmiştir. Bu konuda dört farklı model CFD kodune çevirilip düşey bir kanal için çalışmalar yapılmış ve bulguları deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Benelmir, Mokraoui ve Souayed [125], iki düşey plaka arasındaki yoğuşma ve kanatlı ısı değiştirici üzerindeki yoğuşmayı Fluent ile modellemiştir. Bulgularına göre karışımının giriş hızları arttırıldığında ısı transferi katsayısı ve yoğuşan su buharı miktarı artmaktadır. Jackson J.D, ve Ahmadinejad M. [126], yatay plaka üzerine üflenen karışımdaki su buharının yoğuşmasını deneysel

olarak incelemiştir.

Y. Liao [118], yaptığı çalışmada, düşey bir levhada su buharı gaz karışımının yoğuşması çözümünde yeni bir method geliştirmiştir. Geliştirdiği yöntem deneysel bulgularla uyumluluk göstermiştir. Çalışmasında, gaz fazı akışı karışık taşınım olarak ifade edilmiştir. Karışık taşınım ifadesi yer çekimi etkisi, gaz kompoziyonu ve sıcaklık farkından oluşan yoğunluk farkından kaynaklanan basit doğal taşınım ve kütle hızından kaynaklanan birleştirilmiş zorlanmış taşınımdan oluşmaktadır. Karışık taşınım etkilerinin zorlanmış taşınım etkisini gösteren Re sayısı ile doğal taşınım etkisini gösteren Gr sayısı etkisi (Re/Gr^2) incinden tanımlanması yapılmıştır. Düşey bir yüzeydeki gaz karışımın yoğuşması durumunda birleştirilmiş (superimposed) zorlanmış taşınımın, basit doğal taşınımda oluşan ısı transferine etkisi ve analitik olarak hesaplanan ısı transferin deneysel çalışmalarla kıyaslanması çalışmalarını yürütmüştür. Ayrıca su buharı gaz karışımının doğal taşınım durumundan hangi durumda geçiş şartlarına geldiğini incelenmiştir. Sonucunda düşey bir levhada buhar-gaz karışım taşınım analizi için yeni bir model geliştirmiştir.

Yeni method olan birleştirilmiş zorlanmış taşınımın mekanizması basit doğal taşınımla ısı transferi prosesini de vermektedir: İki-faz sınır tabakasında önceden birikmiş olan yoğuşmayan gazlar birleştirilmiş karışım hızı ile sınır tabakdan uzaklaştırılır ve bunun sonucunda yoğuşmayı tetikleyen kuvvetler arttırılmış olur. Bu mekanizmaya göre karışım akışının süpürücü etkisi karışık taşınımın oluşmasında rol oynamaktadır. Bulgu olarak karışım akışının üfleme yeteneği, taşınım rejiminin belirlenmesi amacıyla, kütle transferini harekete geçiren kuvvet potansiyeli (Bm) ve doğal taşınımı tetikleyen kuvvetin büyüklüğü (Re^2/Gr) ile karakterize edilebilir. Çalışmada düşey levhadaki yoğuşma için doğal taşınımdan karışım taşınıma geçiş için basit bir kriter geliştirmiştir: $B_m.Re^2/Gr > 0,15$.

Bu konudaki ilk teorik çalışmaları Sparrow'ın [127], çalışmaları ile başlamıştır. Teorik analizlerinde sınır tabaka kabulü yapmış, bu çalışmada gaz fazı için doğal taşınım eşitlikleri ve iki fazlı sınır tabaka eşitliklerini benzerlik metodu kullanarak çözmüştür.

Denny [128,129], sonlu elamanlar yöntemi kullanarak karışım hızının taşınım rejimine etkisini incelemiş, karışım hızının artmasıyla yoğuşma ile olan ısı transferi miktarını

doğal taşınıma göre arttırdığını görmüştür.

Debbissi [130], yaptığı çalışmada ise karışım hızının buharlaşma hızına olan etkisi incelenmiş, karışım hızının artmasıyla kütle transferi sınır tabakası kalınlığının inceldiğini görmüştür. Lucas [131], ise taşınım rejiminin belirlenmesi için bir method oluşturmaya çalışmış fakat sonunda sonlu elamanlar farkı çözümünde bir çok parametre olduğundan bu şekilde bir çözüm oluşturamayacağını bildirmiştir [131]. Son yıllardaki çalışmalarda ise yoğuşmayan gaz karışımı içindeki su buharının yoğuşmasında farklı akış konfigürasyonları için türbülans etkisi, sıvı faz ataleti ve enerji taşınımı ve tüm sınır tabaka eşitliklerinin çözümüyle sınır tabaka analizleri yapmılmıştır. Fakat çalışmaların hiç birinde taşınım rejimi belirlenmesi hakkında bir çözüm üretilmemiştir [132].

Neale vd. [133], geliştirdiği basit hidro termal matlab programını Fluent programına entegre ederek, hava ve gözenekli malzeme için ısı transferi ve nem aktarım eşitliklerini çözmüştür. Elde ettiği nemli yüzey katsayısını Chilton ve Colburn'un analojik bulgularıyla karşılaştırmıştır.

Yang Li [134], çalışmasında bir oda içerisindeki hava şartlarının bina kabuğundan olan ısı ve nem transferini de dikkate alınarak CFD modeli oluşturmuştur. Geliştirdiği sayısal model deneysel çalışmalarıyla doğrulandıktan sonra, farklı nem yüklerinin, havalandırma debisinin ve hava giriş ve çıkış lokasyonlarının oda içi şartlara ve yapı kabuğundan olan ısı ve kütle transferine olan etkisini çalışmıştır. Analizlerini 42-91 g/h farklı nüm yükleri 0,5-1 hava değişim sayısı için tekrarlamış, bulgularına göre nem yükü ve havalandırma miktarı mahal içerisindeki nem yükünü çok etkilemektedir. Düşük debilerde çalışan havalandırmanın giriş ve çıkış konumlarının etkisi mahal içerisindeki iklim şartlarına en büyük etkiyi göstermiştir.

Vaibhav ve Prabal [135], mahal içerisinde gizli ve duyulur ısı yükünü karşılayacak yeni bir panel geliştirmişlerdir. Çalışmalarında geliştirdikleri panelin oda içerisindeki ısı ve nem transfer performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Oluşturdukları üç boyutlu modelde mahal içerisindeki akış, ısı ve kütle transferi eşitliklerini nümerik olarak Fluent programı kullanılarak çözmüşlerdir. Mahal içersindeki su buharının membran içerisindeki geçisinin sadece difüzyon ile gerçekleştiği kabul edilmiştir. Sayısal

çalışmalarını daha önce Saskatchewan üniversitesinde yapılan deneysel çalışmalarla doğrulanmışlardır. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki fark yaklaşık %5 olmuştur. Analizlerinde HAMP'ın farklı iklim koşullarındaki performansını incelemiştir. Bulgularına göre HAMP sistemi tavana monte edildiğinde performansının bir çok durum için %50 olduğunu görmüştür. Bu bulgularına göre bu sistemin pratik uygulama potansiyelinin olduğu görülmüşlerdir.

Athushi [136], çalışmasında gözenekli duvarlardan nem de-absorbiyonun olduğu bir odada nem dağılımının sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmasında iki farklı türbülans modelinin bulguları da karşılaştırılmıştır. Bulgularına göre low-Re türbülans modeli, standart k-e modeline göre daha geniş bağıl nem dağılımı vermiştir. Birçok noktada low-Re türbülans modeli ile daha yüksek nem oranını hesaplanmıştır.

Raluca Teodosiu [137], çalışmasında nem transferi ve duvar yüzeyindeki yoğuşmayı çözecek gerekli fiziksel ve matametiksel konuları da içeren CFD çalışmaları yürütülmüştür. İki boyutlu sayısal modelinde soğuk bir yüzeydeki yoğuşmayı incelemiş bulguları deneysel çalışmalarla doğrulamıştır. Deneysel çalışmalarında 3,1 m x 3,1 m x 2,5 m boyutlarında ve içerisinde nemlendirici, taze hava giriş-çıkışı bulunan deney odası kullanılmıştır.

Xiaojun Ma [138], çalışmasında duvar yüzeyindeki yoğuşma ve mahal içerisindeki nem dağılımının zamana bağlı hesaplanması için cebirsel model geliştirmiştir. Geliştirdiği model sayısal ve deneysel çalışmalarla da doğrulanmıştır. Mahal içerisindeki nem dağılımı sonucu deneysel çalışmalarla, yoğuşma çözümü ise CFD çalışmalarıyla doğrulanmıştır.

Li Cheng [139], çalışmasında nemli havanın düşey bir plakada yoğuşmasını nümerik olarak incelenmiştir. Yerel yoğuşma miktarı, yoğuşma film kalınlığı, ara yüzeydeki sıcaklık düşüşü ve nemli havanın hızlarını farklı duvar yüzey sıcaklıkları ve giriş şartları için nümerik olarak hesaplanmıştır.

Dehbi [140], yoğuşmayan gaz karışımı içerisindeki su buharının soğuk bir duvarda yoğuşmasını Fluent programına özel kod entegre ederek çözüm yapmıştır. Yoğuşan miktarı yoğuşan sıvı-gaz arayüzeyinin yoğuşmayan gaz için geçirmeyen yüzey olarak tanımlanmasından hesaplanmıştır. Modelinde sıvı film direnci ihmal edilmiştir ve

çözüm yönteminin yoğuşmayan gaz karışımı kütle oranının 0,1'den büyük olduğu durumlarda geçerli olduğunu belirtmiştir. Ayrıca modelinde yoğuşma miktarının çok olduğu durumlarda gerçekleşen emme basıncı çözümü için düzeltme korelasyonu CFD koduna entegre edilmiştir. Çalışmasında farklı akış konfigürasyonları için analizler yapmış, ve deneysel bulgularla karşılaştırmıştır. Bulgularına göre sayısal çalışmalar deneysel bulgularla uyumluluk göstermiştir. Eğer yoğuşan miktar çok fazla ise emme basıncı düzeltme katsayısı Fluent koduna entegre edilmesi gerekmektedir.

Houkema vd. [141], yoğuşmayan gazların da bulunduğu gaz karışımındaki su buharının yoğuşmasının 'Stefan Flow' formülasyonuyla çözümü için CFX-4 programında CFD kodu kullanmıştır. Düşük yoğuşma miktarlarında kullandığı model deneysel çalışmalarla uyumluluk göstermiştir.

Hie Chan Kang [142], yatay bir plaka üzerindeki hava su buharı karışımının laminar film yoğuşmasını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışmasında film yoğuşması çözümü ve yoğuşma ısı trasfer katsayısı çözümü için superheated and equilibrium modeli kullanmıştır. Bulgularına göre doymuş buhar-hava karışımı ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı düşük olduğunda, gaz karışımı sınır tabakası süperheated gaz olarak düşünülebilir, eğer sıcaklık farkı fazla ise sınıra yakın bölgelerdeki gaz karışımı süperheated olur.

J.C. de la Rosa [143], laminar rejimde emme basıncı düzeltme katsayını, türbülans akış şartları için de geliştirmiş, daha önce geliştirilen korelasyonun türbülans şartlarında normalden fazla değer verdiğini ve laminar şartlarda daha doğru tahmin yapabildiğini tespit etmiştir. Çalışmasının sonucunda türbülans koşullarında emme basıncı düzeltme faktörü formülasyonu geliştirmiş, bulgularını literatürdeki orijinal formülasyonla karşılaştırmıştır.

Karkoszka and Anglart [144], yoğuşma probleminin çözümü için ara yüzeye yakın hücrelerinde kütle ve enerji kaynak terimin eklendiği CFX 4.4 yazılım kodu geliştirmiştir.

Kuhn S.Z. [122], düşey bir borudaki yoğuşmayan gazların bulunduğu gaz karışımında su buharının yoğuşmasını deneysel olarak incelemiştir.

Jun [145], düşey silindirik yoğuşturucu boru içerisinde yoğuşmayan gaz karışımı içerisindeki su buharının yoğuşması CFD metodu ile incelenmiştir. Analizlerinde

yoğuşan film tabakası hesaba katılmıştır ve yoğuşan film kalınlığı Nusselt metodu kullanılarak hesaplanmıştır. CFD çalışmaları Kuhn'un [122], deneysel çalışmalarıyla kıyaslanmıştır. Bulguları deneysel çalışmalarla uyumluluk göstermiştir.

Foxa vd. [146], düşey bir kabinde doğal taşınıma bağlı yoğuşma durumundaki ısı transfer katsayılarını, nümerik olarak incelemiş bulgularını deneysel çalışmalarla kıyaslamıştır. Modelinde düşey bir yüzeyde alt taraftan su buharı-hava karışımının girişi sağlanıyor ve izotermal soğutucu yüzeyde yoğuşma gerçekleşiyor. Yoğuşan su yüzeyde ince bir film oluşturarak havanın üflendiği bölümden toplanıyor. Su buharı basıncının kritik seviyeyi aştığı zaman oluşun sis durumunun formülasyonlarını tanımlayan 'Modified Critical Saturation Model (MCSM)'ya dayanan model kullanılmıştır. Bulgularının bazıları deneysel çalışmalarla uyuşmadığından modelinde bazı katsayılar kullanmıştır. Çalışmasının sonucunda sis oluşması nedeniyle su buharı kütle transfer miktarını %20'ye kadar azlatırken, toplam kütle transfer ve ısı transfer mitkarları sis durumunun oluşmasından çok fazla etkilenmemiştir. Kapalı sistemlerde sis oluşmasından dolayı gaz karşımının sıcaklığı artmakta ve bunun sonucunda ısı transfer katsayılarında ön görülenden sapabileceğini, fakat açık sistemlerde toplam sis oluşumunun toplam ısı transfer katsayısına etkisinin az olduğunu vurgulamıştır. Son olarak kapalı sistemlerde ısı transferin korelasyonunun oluşturulmasında ve karakterize edilmesinde kütle transfer katsayının ısı transfer katsayısına göre baskın olduğunu vurgulamıştır.

Fahri Aglar [147], nükleer tesislerde yaygın olarak kullanılan RELAP5/MOD3.3 yoğuşma modülünü incelemiştir. Düşey bir boru içerisinde yoğuşmayan gazların bulunduğu gaz karışımında su buharının yoğuşmasını incelemiş farklı parametrelere göre literatürdeki deneysel çalışmalarla karşılaştırmıştır.

Yan [148], çalışmasında sıvı film kalınlığının etkisini incelemiş, sıvı film kütle miktarının az olduğu durum için ihmal edilebilir olduğu sonucuna varmıştır.

Volchkov vd. [149], soğuk yüzeyde yoğuşan sıvı film kalınlığının çok ince olduğunu, oluşturacağı termal direncin çok az olacağını ve bu sayede soğuk yüzey ile ara yüzey sıcaklığının hemen hemen aynı olacağını ve hızın ara yüzeye normal komponentinin set edilerek yoğuşmanın modellenebileceğini vurgulamıştır. Rosa [150], çalışmasında tipik

bir soğuk yüzey için ara yüzey sıcaklık düşüşünün yaklaşık 0,0003 K olduğu görülmüştür. Bu değer ölçüm cihazlarının hassasiyetlerinden bile çok küçüktür.

Su buharı ile yoğuşmayan gazların bulunduğu gaz karışımının içerisinde az miktarda bile yoğuşmayan gaz karışımı olduğunda, yoğuşma durumundaki ısı ve kütle geçişini etkilemektedir. Sıvı-gaz ara yüzeyinden yoğuşmayan gazların geçememesi dolayısıyla bölgede yoğuşmayan gazlar birikir. Bu durumda kütle transferine ek bir direnç oluşur ve su buharının gaz karışımı içerisinden geçerek soğuk yüzeye olan difüzyonu zorlaşır [109]. Minkowycz [151-153], yoğuşmayan gazların bulunması yoğuşma prosesindeki ısı transferini olumsuz etkileyeceğini belirtmiştir.

Churchill ve Chu [154], geniş aralıkta Ra ve Pr (veya Sc) sayılarında yüzeydeki ortalama Nu (veya Sh) sayıları için basit bir ifade oluşturmuşlardır. Oluşturdukları ifade eş zamanlı ısı kütle geçişi için uygun olduğu belirtilmiştir. Geliştirdikleri geniş ve sınırlı aralıktaki basit ifadeler deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Laminar akışta üniform sıcaklıktaki levhadan ısı geçişi için (1.1), (1.2) denklerimdeki korelasyonlar oluşturulmuştur.

$$Nu = 0{,}670Ra^{1/4} / \left[1 + (0{,}492/\mathrm{Pr})^{9/16}\right]^{4/9} \qquad 10^5 < \mathrm{Ra} < 10^9 \qquad (1.1)$$

$$Nu = 0{,}68 + \frac{0{,}670Ra^{1/4}}{\left[1 + (0{,}492/\mathrm{Pr})^{9/16}\right]^{4/9}} \qquad \mathrm{Ra} < 10^9 \qquad (1.2)$$

Laminar ve Türbülanslı rejimde üniform yüzey sıcaklığındaki levhadan ısı geçişi için Eşitlik (1.3)'deki korelasyon önerilmiştir.

$$Nu^{1/2} = 0{,}825 + \frac{0{,}387Ra^{1/6}}{\left[1 + (0{,}492/\mathrm{Pr})^{9/16}\right]^{8/27}} \qquad (1.3)$$

Sabit ısı akısı için:

$$Nu^{1/2} = 0{,}825 + \frac{0{,}387Ra^{1/6}}{\left[1 + (0{,}437/\mathrm{Pr})^{9/16}\right]^{8/27}} \qquad (1.4)$$

Kütle geçişi için yapılan çalışmada, kütle transferi miktarı hız alanını önemli miktarda değiştirecek kadar büyük değilse, laminar ve laminar+türbülanslı durum için oluşturulan eşitliklerde Nu yerine Sh, Pr yerine Sc ve Ra yerine $Ra^{'}$ yazılarak kütle geçişi

için aynı eşitliklerin kullanılabileceği belirtilmiştir. Sabit sıcaklıktaki levhada laminar+türbülanslı durum için oluşturulan korelâsyonda Nu yerine Sh, Ra yerine $Ra(Sc/\mathrm{Pr})^{4/3}$ yazılarak çözümleme yapılabileceği belirtilmiştir. Sc=Pr olması halinde ise (1.3) korelâsyonun Ra yerine Ra+Ra' yazılarak eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için kullanılabileceğini belirtmiştir.

Wilcox [155], tarafından yapılan çalışmada, düşey levha üzerinden laminar doğal taşınımla olan akışta, eş zamanlı ısı ve kütle geçişi problemini teorik olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı sınır şartlarındaki tüm Pr ve Sc sayılarında basit çözümler veren bir ifade oluşturmaktır. Çalışmalarında momentum, enerji ve kütle eşitlikleri oluşturulduktan sonra hız, sıcaklık ve derişiklik sınır tabakaları arasında bir bağıntı önerilmiştir.

$$Nu = 0{,}58\frac{(\mathrm{Pr})^{1/4}\left[Gr_L + (\mathrm{Pr}/Sc)^{1/2}Gr_{LC}\right]^{1/4}}{\left[1+(0{,}625/\mathrm{Pr})\right]^{1/4}} \qquad Sh = \left(\frac{Sc}{\mathrm{Pr}}\right)^{1/2} Nu \tag{1.5}$$

$Gr_L = \dfrac{gL^3\beta(T_0 - T_\infty)}{\nu^2}$ = Sıcaklık farkına bağlı ortalama Grashof sayısı

$Gr_{LC} = \dfrac{gL^3\beta^*(C_0 - C_\infty)}{\nu^2}$ = Derişiklik farkına bağlı ortalama Grashof sayısı

$r = \dfrac{\delta^{''}}{\delta^{'}}$ =Derişiklik sınır tabaka kalınlığının ısıl sınır tabaka kalınlığına oranı

Benzer olarak kütle geçiş kontrollü durum için (Pr>Sc)

$$Nu = \left(\frac{\mathrm{Pr}}{Sc}\right)^{1/2} Sh \qquad Sh = 0{,}58\frac{(Sc)^{1/4}\left[Gr_{LC} + (Sc/\mathrm{Pr})^{1/2}Gr_L\right]^{1/4}}{\left[1+(0{,}625/Sc)\right]^{1/4}} \tag{1.6}$$

Şeklinde tanımlanmıştır.

Parabolik sıcaklık ve derişiklik profilleri için $\dfrac{\mathrm{Pr}}{Sc} = r^3\left(\dfrac{5}{2} - 2r + \dfrac{1}{2}r^2\right)$ olarak tanımlanmış ve eşitlikler aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

Isı geçiş kontrollü durum için:

$$Nu = 0{,}667\frac{(\mathrm{Pr})^{1/4}\left[Gr_L + (\mathrm{Pr}/Sc)^{1/2}Gr_{LC}\right]^{1/4}}{\left[1+(0{,}952/\mathrm{Pr})\right]^{1/4}} \qquad Sh = \left(\frac{Sc}{\mathrm{Pr}}\right)^{1/2} Nu \tag{1.7}$$

Kütle geçiş kontrollü durum için:

$$Nu = \left(\frac{\mathrm{Pr}}{Sc}\right)^{1/2} Sh \qquad Sh = 0{,}667\frac{(Sc)^{1/4}\left[Gr_{LC} + (Sc/\mathrm{Pr})^{1/2}Gr_L\right]^{1/4}}{\left[1+(0{,}952/Sc)\right]^{1/4}} \tag{1.8}$$

Sc ve Pr sayıları büyüdükçe ve birbirine yaklaştıkça Eşitlik (1.7) ve (1.8) eşitlikleri aşağıdaki hale dönüştürmüştür.

$$Nu = 0{,}677(\mathrm{Pr})^{1/4}\left[Gr_L + (\mathrm{Pr}/Sc)^{1/2}Gr_{LC}\right]^{1/4} \tag{1.9}$$

$$Sh = 0{,}677(Sc)^{1/4}\left[Gr_{LC} + (Sc/\mathrm{Pr})^{1/2}Gr_L\right]^{1/4} \tag{1.10}$$

Bulunan bulguların sadece ısı geçişinin gerçekleştiği hale göre (Gr_{LC}=0) indirgenmiş durumları Ostrach'ın kesin bulguları ile karşılaştırılmıştır. Bulguta Eşitlik (1.5)'in düşük Pr sayıları için, Eşitlik (1.6)'nın yüksek Pr sayıları için, Eşitlik (1.9)'un ve dolayısıyla Mathers'in benzer çözümünün ise sadece bağıl olarak yüksek Pr sayıları için uygun olduğu saptanmıştır. Ayrıca eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için de Pr sayısı yerine Pr ve Sc sayılarının konulması ile aynı eşitliklerin doğru bulgular vereceği tahmin edilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen diğer bir bulgu da r" ve (Pr/Sc) arasındaki ilişkidir ve $r = (\mathrm{Pr}/Sc)^{1/2}$ eşitliğinin, integral yöntemde de verildiği gibi uygun bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir.

Gebhart ve Pera [156], tarafından yapılan çalışmada, eş zamanlı ısıl enerji ve kütlesel difüzyon kaynaklı oluşan yoğunluk farklarının, yerçekimiyle etkileşimi sonucu akışkan içinde meydana gelen laminar akım çalışılmıştır. Çalışmasında derişiklik seviyesinin düşük olduğu kabul edilmiştir. Genel Boussinesq yaklaşımları sonucunda, yüzeye bitişik dik akışlarda birleşik kaldırma etkileri için, benzeşim formunda çözümü olan bir grup eşitlik oluşturulmuştur. Akımı harekete geçiren toplam yoğunluk farkını sağlayan, kimyasal ve ısıl difüzyonun bağıl önemini belirten bir " N " katsayısı tanımlanmıştır.

$$N = \frac{Gr_{x,C}}{Gr_{x,t}} = \frac{\beta^*(C_0 - C_\infty)}{\beta(t_0 - t_\infty)} \tag{1.11}$$

Kütle geçişi olmaması durumunda N katsayısı sıfır, ısı geçişinin olmaması durumunda ise sonsuz olur. Her iki etkinin birbirini destekler yönde birleşerek, akışı oluşturması halinde pozitif ters yönde olmaları halinde ise negatif değer alacağını belirtmiştir.

Yapılan kabulleri ve hesaplamaları sonucunda, düşey bir yüzeydeki akış için yerel Nu ve yerel Sh sayıları sırasıyla Eşitlik (1.12) ve (1.13) ile ifade edilmiştir.

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} = -\frac{\phi'(0)}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(PGr_{x,t} + QGr_{x,C})} = -\frac{\phi'(0)}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(Gr_{x,t})} \sqrt[4]{(P + QN)} \quad (1.12)$$

$$Sh_x = \frac{h_{m,x} x}{D} = -\frac{C'(0)}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(PGr_{x,t} + QGr_{x,C})} = -\frac{C'(0)}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{\left(\left|Gr_{x,C}\right|\right)} \sqrt[4]{\left|\frac{P + QN}{N}\right|} \quad (1.13)$$

P,Q= Boyut faktörü (Sabit)

ϕ = Boyutsuz sıcaklık

C= Boyutsuz derişiklik

Bulgu bölümünde birleşik kaldırma etkisinin laminar akım kararlılığı üzerindeki etkisini belirleyebilmek için hesaplama yapılmadığı söylenmiştir. Pr ve Sc sayılarının eşit olması durumunda, birleşik kaldırma mekanizmasının laminar kararlılıktaki etkisinin basit görüldüğü fakat birleşik kaldırma mekanizmasının genel durumda, karışık ve değişken kararlılık karakteri gösteren akımlar oluşturduğu belirtilmiştir. Bu tür problemlerin analizinde kaldırma etkisi için, birleştirilmiş durumdaki karışıklığın dahil edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

De Leeuw, Den Bouter vd. [157], tarafından yapılan çalışmada doğal taşınımla oluşan eş zamanlı ısı ve kütle geçişini deneysel olarak çalışmıştır. Yöntem bu çalışmada da düşey levha için yapılmış eş zamanlı ısı ve kütle transferini konu alan hesaplamlarda kullanılmıştır. Düşey levhadaki kütle transferi için elektrokimyasal bir yöntem kullanılmış, ısı transferi ise diferansiyel analiz ile ölçülmüştür. Teorik çalışmalar sonucunda elde edilen birleştirilmiş Gr sayıları aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$GR_h = Gr_h + \left(\frac{\mathrm{Pr}}{Sc}\right)^{1/2} Gr_m \quad (1.14)$$

$$GR_m = Gr_m + \left(\frac{Sc}{\Pr}\right)^{1/2} Gr_h \tag{1.15}$$

$$Gr_h = \frac{gl^3}{\nu^2}\frac{\Delta\rho_T}{\rho} \qquad Gr_m = \frac{gl^3}{\nu^2}\frac{\Delta\rho_C}{\rho} \tag{1.16}$$

Ortalama ısı ve kütle transfer katsayıları ise $Nu = c\left(GR_h \Pr\right)^n$, $Sh = c\left(GR_m Sc\right)^n$, formunda ifade edilmiştir. "c" katsayısının değerinin diferansiyel eşitliğin çözüm yöntemine ve Pr, Sc sayılarına bağlı olarak 0,56-0,67 arasında değiştiği ve düşey levha için n=0,25 olduğu belirtilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada yüzeyden soğutma sistemleriyle entegre çalışabilecek nem alıcı hibrid panel üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Hibrid panel ile mahal içerindeki su buharının yoğuşturulmasıyla ışınımsal soğutma panelleri üzerinde muhtemel yoğuşmanın önlenmesi ve mahal içersindeki bağıl nem değerinin termal konfor şartlarında tutulması hedeflenmektedir. Elde edilen genişletilmiş ifadeler kullanılarak, mahal içerisindeki nem yüküne göre kullanılması gereken, gizli ısı yükü karşılacak hibrid panel miktarı da hesaplanabilecektir.

Diğer temel amaç; düşey bir plaka üzerinde film yoğuşması durumu için serbest taşınım şartlarında genelleştirilmiş ısı ve kütle geçiş bağıntılarının literatüre kazandırılması. Oluşturulan genelleştirilmiş ifadeler ve deneysel bulgular farklı araştırmalarda ve endüstriyel alanlarda da kullanılabilecektir.

1.3 Hipotez

Literatürde ışınımsal sistemlerde karşılaşılan nem problemine yönelik bir çok çözüm yer almasına rağmen yüksek ilk yatırım maliyeti, oluşturduğu sistem karmaşıklığı ve neden olduğun mahal içerisindeki konforsuz durumdan dolayı ideal çözüme rastlanamamıştır.

Bu çalışmada yeni bir nem kontrolü çözümü üzerinde çalışılmıştır. Nerilen bu çözümde ışınımsal sisteme hidrolik olarak bir araya getirilen 'hibrid panel' olarak adlandırılan, ve yoğuşma riskini ortadan kaldıracak bir çözüm üzerinde çalışılmıştır. Hibrid panelin

ışınımsal soğutma sistemine entegrasyonuyla duyulur ısının büyük bir kısmı ışınımsal panellerle, gizli ısı yükü ve bir miktar duyulur ısı yükü ise hibrid panel ile sağlanması hedeflenmektedir.

Işınımsal sistemin aktive edilmesi, hızlı bir şekilde devreye girmesi ve kapasite kayıbının oluşmaması için konfor sıcaklıklarında oda içerisindeki bağıl nem değerinin %70'in altında tutulması gerekmektedir. Hibrid panelin sistem entegrasyonuyla anlık olarak havanın bağıl neminin artmasıyla, panel üzerinde yoğuşma gerçekleşecek bu sayede ışınımsal paneller üzerinde yoğuşma riski azaltılırken ışınımsal soğutma panellerinin performanslarının arttırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla bu çalışmada ışınımsal soğutma sistemine bir araya getirilecek hibrid panelin nem alma performansları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Ayrıca literatürde bu tarz soğutma panellerinin ışınım ve taşınımla ısı transferinin incelendiği birçok deneysel çalışma yer almasına ve birçok korelasyonlar önerilmesine rağmen, duyulur ve gizli ısı transfer mekanizmalarının beraber incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Hibrid panel sisteminin ısı transfer mekanizmalarının çok iyi anlaşılması için gizli ve duyulur ısı transfer kapasitelerinin, taşınım, ışınım ve yoğuşma ısı transfer katsayılarının incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada hibrid panel sisteminin ise duyulur ve gizli transfer kapasite ve ısı transfer katsayıları deneysel olarak incelenmiştir ve genelleştirilmiş ısı transfer katsayısı ifadeleri oluşturulmuştur.

Yapılan deneysel ölçümler sonucunda düşey bir levhada eşzamanlı ısı ve kütle geçişinde kütle transfer katsayıları ve plaka ile sınır tabaka dışındaki su buharı kısmi basınç farkına bağlı olarak yoğuşma akısı bağıntısı önerilmiştir. Isı transferi kısmında ise genelleştirilmiş Sh-Ra' ve Nu-Ra ifadeleri önerilmiştir. Benzer deneyler yoğuşmanın olmadığı durum için de yapılmıştır. Yoğuşma gerçekleşmeyen deneylerden elde edilen bulgulara göre Grashoff sayısı sıcaklık farkı ve yoğunluk farkı cinsinden ifade edilmiştir ve karşılaştırıldığında bulguların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Sonrasında ise plaka üzerinde yoğuşmanın gerçekleştiği deneylerde Gr sayısı yoğunluk farkı cinsinden ifade edilmiştir.

Bunun dışında literatürde doğal ve zorlanmış taşınıma bağlı bir çok yoğuşma probleminin incelenmesine rağmen çalışmaların birçoğu zorlanmış taşınıma bağlı

yoğuşma üzerine yoğunlaşmıştır. Bu tezde çalışılan kapalı bir hacim içerisindeki hava+su buharının doğal taşınıma bağlı olarak yoğuşması literatürde çalışılmamıştır. Yapılan yoğuşma (gaz karışımı içerisindeki) çalışmalarının genel olarak nükleer santral endüstrisinde karşılaşılan problemler üzerinde yoğunlaşırken, bina iklimlendirme ekipmanları üzerine yapılan çalışma kısmen daha kısıtlıdır.

Elde edilen tüm bulgulara göre ışınımsal soğutma sisteminin uygulanacağı mahallerdeki nem yüküne göre serinletme panellerine entegre olacak hibrid panel miktarı kolayca projelendirilebilecektir.

Literatürde birçok araştırmacı düşey veya yatay ısı değiştiricisinde boru içerisindeki yoğuşmayı incelemesine rağmen, düşey plaka üzerindeki yoğuşma çok fazla incelenmemiştir. Yoğuşma çalışmaların çoğu saf buharın yoğuşması üzerine yoğunlamıştır. Gaz karışımı çalışmalarının birçoğu da yüksek kütle oranına sahip su buharı için yapılmıştır. Bu çalışmada literatürde az çalışılan gaz karışımı içerisinde düşük kütle oranına sahip su buharının yoğuşması incelenmiştir.

Bu çalışmada Yoğuşmanın modellenmesi için üç boyutlu CFD modeli kullanılmış ve su buharının, kuru hava ile karışımı içerisinde film yoğuşması incelenmiştir. Modelleme için kütle ve bileşen eşitliklerine kaynak terimleri eklenmiştir ve yoğuşma çözümleri yoğuşan yüzeye en yakın hücrelerde gerçekleştirilmiştir.Bu sayısal modeli doğrulacak lüteratürde herhangi bir deneysel bolmadığından bire-bir ölçekte bir deney sistemi geliştirilmiş sayısal model doğrulanmıştır.

BÖLÜM 2

SAYISAL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Sırasıyla terorik çalışmalar, sayısal modelleme tekniği ve çözüm kodu, sayısal model ve çözüm ağı, sınır şartları, kullanılan yöntemler ve sayısal çözüm bulguları verilmiştir.

2.1 Teorik analiz

Bu bölümde sayısal çalışmalarda kullanılan çözüm kodunun arka planındaki teorik ifadaler incelenmiştir [158].

2.1.1 Korunum Eşitlikleri

Laminar, sıkıştırılamaz ve sabit özelliklere sabit bir akışkanın süreklilik, Navier Stokes, bileşen korunum ve enerji eşitlikleri yöneten eşitliklerdir [158].

Süreklilik ve Navier-Stokes eşitlikleri sırasıyla aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\nabla . v = 0 \tag{2.1}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v . \nabla v = \mu \nabla^2 - \nabla p \tag{2.2}$$

Bileşen korunum eşitlikleri aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\frac{\partial w_v}{\partial t} + v . \nabla w_v = D \nabla^2 w_v \tag{2.3}$$

Viscous yayılım etkisi ihmal edildiğinde, difüzyondan kaynaklanan enerji taşınım eşitliği aşağıdaki şekildedir.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p v.\nabla T = k\nabla^2.T \quad (2.4)$$

Yukarıdaki eşitlikde t zaman, p basınç, w_v nem-hava karışımındaki su buharı kütle oranı, T sıcaklıktır.

Diğer değerler ise aşağıdaki şekildedir.

Yoğunluk:

$$\rho = \rho_a + \rho_v \quad (2.5)$$

Vizkozite:

$$\mu = (1 - w_v)\mu_a + w_v\mu_v \quad (2.6)$$

Sabit basınçtaki özgül ısı:

$$c_p = (1 - w_v)c_{pa} + w_v c_{pv} \quad (2.7)$$

Isı iletim katsayısı k:

$$k = (1 - w_v)k_a + w_v k_v \quad (2.8)$$

Hesaplamalarda, akışkanın termofiziksel özellikleri sabit olup sınır tabaka dışı ve duvar yüzey şartlarındaki değerlerinin ortalamasına eşittir.

Karışım hızı ise bileşenelerin kütlesel ortalamalarından hesaplanır.

$$v = (1 - w_v)v_a + w_v v_v \quad (2.9)$$

v_a kuru hava hızı, v_v su buharı hızıdır. Binary kütlesel difüzyon katsayısı D, su buharından kuru havaya olan moleküler difüzyonu tanımlamaktadır. Bileşen korunum eşitliği v hızıyla haraket eden madde için yazılır. Bulgu olarak bileşen korunum eşitliğindeki (3) su buharı kütlesel akısı iki kısımdan oluşmaktadır: su buharının kütlesel taşınım ifadesi olan advactive $w_v v$ su buharının ortalama v hızıyla moleküler difüzyonla olan aktarım ifadesi olan difüzyon akısı ifadesi $D\nabla w_v$ [158].

2.1.2 Kütle transfer eşitliklerinin çözümleri

Plaka yüzeyinde kütle transferinin gerçekleştiği sınır tabaka dışındaki yüzeye dik yöndeki karışım hızı, su buharı ve kuru hava kütlesel akısı aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [158].

Yoğuşmanın olduğu ara yüzeyde duvara teğet yönde kaymama sınır şartı olduğu kabul edilir.

$$v_T = 0 \tag{2.10}$$

Diğer yandan duvara normal doğrultuda, hız değeri kütle dengesinden dolayı sıfır olmayacaktır.

n yönündeki, karışım hızı olan v_n hız komponentini bulabilmek için kütle dengesi muhakkak hesaba katılmalıdır. Bileşen korunum eşitliğine göre (2.3) ara yüzeydeki su buharının difüzyon akısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\left(m''\right)_{dv} = -\rho D \left.\frac{\partial w_v}{\partial n}\right|_{n=0} \tag{2.11}$$

Su buharı advactive akısı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\left(m''\right)_{av} = \rho w_v v_n \tag{2.12}$$

Yoğuşmanın olduğu yüzeylerde su buharının advactive difüzyon akılarının toplamı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$m_v'' = \left(m''\right)_{dv} + \left(m''\right)_{av} = -\rho D \left.\frac{\partial w_v}{\partial n}\right|_{n=0} + \rho w_v v_n \tag{2.13}$$

Ara yüzeydeki kuru hava advactive kütle akısı:

$$\left(\dot{m}^0\right)_{aa} = \rho\left(1 - w_v\right) v_n \tag{2.14}$$

Ara yüzeydeki kuru havanın difüzyon ısı akısı, (11) nolu eşitlikde w_v yerine $(1 - w_v)$ yazılarak elde edilir.

$$\left(m_{da}''\right) = -\rho D \left.\frac{\partial\left(1 - w_v\right)}{\partial n}\right|_{n=0} = \rho D \left.\frac{\partial w_v}{\partial n}\right|_{n=0} \tag{2.15}$$

Duvar yüzeyi kuru hava için geçirgen olmadığından, ara yüzeydeki kuru hava toplam akısı sıfıra eşit olacaktır:

$$m_a'' = \left(m''\right)_{da} + \left(m''\right)_{aa} = -\rho D \frac{\partial w_n}{\partial n}\bigg|_{n=0} + \rho\left(1-w_v\right)v_n = 0 \tag{2.16}$$

Eşitlik 47'den bilinmeyen v_n çekilir:

$$v_n = -\frac{D}{1-w_w}\frac{\partial w_v}{\partial n}\bigg|_{n=0} \tag{2.17}$$

v_n nemli havanın yüzeye dik kütlesel ortalama hızıdır.

Eşitlik (2.10) ve (2.17) Navier-Stokes eşitliğinde sınır şartı olarak kullanılır. Eşitlik (2.17)'deki sınır şartı ile Navier-Stokes, bileşen korunum ve enerji eşitlikleri bütünleşik hale gelmektedir. Diğer yandan v_n değeri çok küçük bir değere sahip olduğundan iklimlendirme sistemlerinde genellikle $v_n = 0$ kabul edilir ve yöneten eşitlikler birbirinden bağımsız olarak çözülür [158].

$v_n = 0$ için toplam ısı akısı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$m_v'' \cong -\rho D \frac{\partial w_w}{\partial n}\bigg|_w = \left(\dot{m}''\right)_{dv} \tag{2.18}$$

Eşitlik (2.11), nemli havanın yoğuşmanın olduğu sınırdaki kütlesel ortalama hızı için sınır şartıdır.

Bulgu olarak eşitlik (2.17), (2.13)'da yerine yazılırsa:

Fakat yüzeylerde v_n değeri ihmal edilemediğinden su buharı toplam kütlesel akısı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\left(\dot{m}_v''\right) = -\rho D\left(1+\frac{w_v}{1-w_v}\right)\frac{\partial w_v}{\partial n}\bigg|_{n=0} = -\frac{\rho D}{1-w_v}\frac{\partial w_v}{\partial n}\bigg|_v \tag{2.19}$$

2.1.3 Duyulur ve gizli ısı transferi

Sayısal çalışmalarda yapılan temel kabule göre nemli hava ilk önce soğuk yüzeye sahip duvar ile temas oluşturur ve sonradan denge oluşana kadar yoğuşma devam eder. Plaka yüzeyinde gerçeleşen duyulur ve gizli transferi aşağıdaki şekilde hesaplanır [158].

Karışımdaki bağıl nem oranı ve kütle oranı arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\varphi = \frac{w_w}{1 - w_w} \tag{2.20}$$

İlk önce duyulur ısı transferi gerçekleşir. T_v sıcaklığına sahip nemli hava yüzeye temas ettiğinde ve φ_∞ bağıl nemi sabit kalacak şekilde sıcaklığı duvar yüzey sıcaklığı olan T_s değerine düşer. Daha sonra nemli havanın φ_∞ bağıl nemi sabit T_v sıcaklığında φ_v değerine düşer. Sayısal çalışmalar yoğuşan miktar T_v sıcaklığında kontrol hacminden çıkacağından, nemli havadan duvar yüzeyine olan ısı transferi aşağıdaki şekilde hesaplanır [159].

$$q_v = \dot{m}_a \left[c\left(T_\infty - T_v\right) + h_{fg}(T_v)(\varphi_\infty - \varphi_v) \right] \tag{2.21}$$

Eşitlik (2.21)'deki enerji dengesinin duyulur ısı transferi ifadesi:

$$\dot{q}_{duy} = m_a \overline{c}_p (T_\infty - T_v) \tag{2.22}$$

Gizli ısı akısı ifadesi:

$$\dot{q}_{giz} = \dot{m}_a h_{fg}\left(T_w\right)\left(\varphi_\infty - \varphi_v\right) = \dot{m}_v h_{fg}\left(T_w\right) \tag{2.23}$$

Yukarıdaki eşitlikte $\dot{m}_a$ kuru havanın debisi, $\dot{m}_v$ yoğuşan su buharının debisi, $h_{fg}(T_v)$, T_v yüzey sıcaklığındaki yoğuşma gizli ısı değeridir.

Özgül ısı değeri ise sabit sıcaklık ve φ_∞ bağıl nem değerine göre aşağıdaki şekilde hesaplanır [158].

$$\overline{c}_p = c_{pa} + x c_{pv} \tag{2.24}$$

Gerçekleşen yoğuşma referans sıcaklıkta çözüm alanından çıkartılmakta, bunun sonucunda ise duyulur ısı transferinde taşınım ısı transferi katkısı olmamaktadır [158].

Su buharının yoğuşmasına bağlı olarak gerçekleşen gizli ısı transferi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$q''_{gizli} = \dot{m}''_v h_{fg}(T_w) \tag{2.25}$$

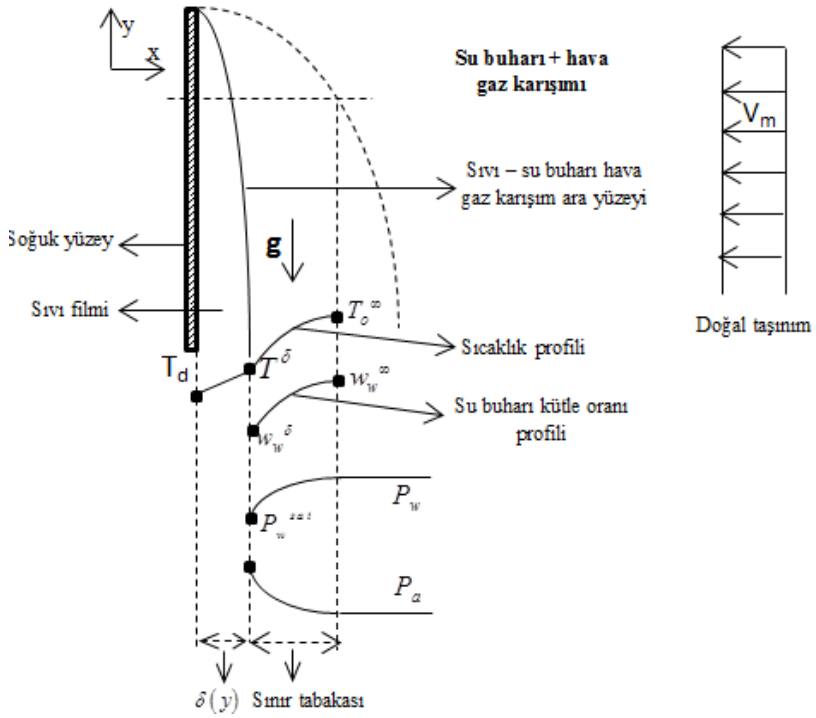
Eşitlik (2.25)'deki su buharı kütle akısı Eşitlik (2.19)'den elde edilir.

2.2 Duvar Yüzeyinde Film Yoğuşmanın Sayısal Olarak Modellenmesi

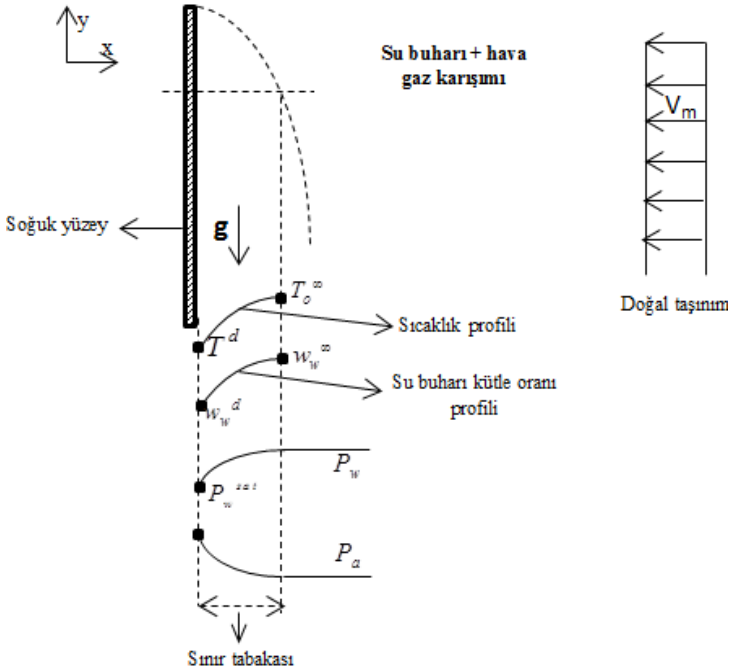
Kabuller:

- Akışkanın bütün termofiziksel özellikleri sıcaklıkla, basınçla ve su buharı kütle oranına bağlı olarak değişmektedir.
- Buhar fazı, su buharı ve hava ideal gaz karışımından oluşmaktadır. Yerel termodinamik dengesi sıvı-buhar ara yüzeyinde gerçekleşmektedir.
- Sadece film yoğuşması dikkate alınmıştır. Damlacık yoğuşması dikkate alınmamıştır.
- Sıvı filmin oluşturacağı termal direnç dikkate alınmamıştır.
- Işınımla olan ısı transferi ve vizkos yayılması ihmal edilmiştir.
- Yoğuşan miktar hesaplama alanından çıkartılmıştır.

Bu kabuller ışığında Şekil 2.1'de şematize edilen gerçek fiziksel model basitleştirilerek, Şekil 2.2'de gösterilen fiziksel modelin sayısal çözümleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmalarda Ansys firmasından Dr. B.Bell ve Prof. Dehbi [140,160] tarafından geliştirilen kod bu çalışmaya uyarlanarak kullanılmıştır.



Şekil 2.1 Gerçek fiziksel model [139]



Şekil 2.2 Basitleştirilmiş fiziksel model

2.2.1 Süreklilik ve Bileşen Eşitlikleri Kaynak Terimleri

Yukarıdaki kabullere göre yoğuşma miktarı, su buharının soğuk yüzeye olan difüzyonundan hesaplanır. Su ve buhar ara yüzeyinde gerçekleşen yoğuşma miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanır [140, 160].

Hava ve su buharının, su-buhar ara yüzeyindeki özgül kütlesel akıları aşağıdaki şekilde yazılır [161].

$$\dot{m}''_a = \rho\omega_a v_n - \rho D\frac{\partial \omega_a}{\partial n} \tag{2.26}$$

$$\dot{m}''_v = \rho\omega_v v_n - \rho D\frac{\partial \omega_v}{\partial n} \tag{2.27}$$

Buradaki n ara yüzeye normal yön, v_n ara yüzeye dik hız komponenti, ρ karışımın yoğunluğunu, D karışım kütle difüzyon katsayısını ve ω kütle oranını ifade etmektedir.

Karışımdaki kütle oranı tanımından:

$$\omega_a = (1-\omega_v) \tag{2.28}$$

$$\frac{\partial \omega_v}{\partial n} = -\frac{\partial \omega_a}{\partial n} \tag{2.29}$$

Sıvı-buhar ara yüzeyindeki karışımın kütle akısını hesaplamak için (2.28) ve (2.29) eşitlikleri (2.26) ve (2.27) eşitliklerinde yerine konularak, (2.28) ve (2.29) eşitlikleri toplanır.

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_a + \dot{m}''_v = \rho v \tag{2.30}$$

Yapılan 2. Kabul sebebiyle:

$$\dot{m}''_a = 0 \tag{2.31}$$

Eşitlik (2.28) ve (2.29) Eşitlik (2.26)'de yerine yazılırsa, yoğuşan su buharı miktarı Eşitlik (2.19)'da da ifade edildiği gibi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$(\dot{m}''_v) = \rho v = \frac{1}{(\omega_v - 1)}\rho D\frac{\partial \omega_v}{\partial n} \tag{2.32}$$

Fluent programında sıvı-buhar ara yüzeyi 'duvar' (no-slip condition) olarak tanımlanmıştır. Bu yüzden (2.32) numaralı eşitliğin sol tarafı sıfır olacaktır.

Duvara en yakın çözüm hücresindeki yoğuşma miktarı kütle (süreklilik) kaynak terimi kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\dot{m}''' = (\dot{m}_v'') \frac{A_{hücre,duvar}}{V_{hücre}} \quad (2.33)$$

Burada $A_{hücre,duvar}$ duvar yüzeyindeki hücrenin alanı, $V_{hücre}$ ise hücrenin hacmidir.

UDF (User Defined Function) kullanılarak Eşitlik (2.32) ve (2.33) düzenlenip programa tanıtılır. Duvara normal olan vektörler ile kanyak derimi (2.33) negatif olacak ve yoğuşan miktar hesaplama alanından çıkartılacak.

UDF'de, duvar yüzey sıcaklığı su buharının yüzeydeki kısmı basıncına bağlı olarak doyma noktası sıcaklığına eşit veya düşük olduğunda yoğuşma gerçekleşecektir. Eğer sıcaklık doyma noktasındaki sıcaklıktan yüksek ise, su buharının kütle oranı duvar bitişiğindeki hücrenin değerine getirilir.

Üçüncü kabulden dolayı, eğer sıcaklık doyma noktasına eşit veya düşükse, duvardaki su buharı kütle oranı sıvı-buhar ara yüzeyini oluşturur. Burada su buharı kısmi basıncı, yerel duvar sıcaklığındaki suyun doyma basıncına eşit alınır.

Fluent programında, duvar sınırındaki kütle oranı tanımlandığında, hesaplama alanına giren veya çıkan bileşenlerin difüzyon akıların kontrol edilmesi imkansızdır. Fakat hesaplamalar için bileşenlerin hesaplama alanına girdiği ve çıktığı durumdaki net akıların bilinmesi gerekmektedir.

Bunu hesaplamak içinse, duvar yakınındaki hacimlerdeki bileşen eşitliğinin kaynak terimi, difüzyon akısını hesaba katmalıdır.

Eşitlik (2.33) yeniden düzenlenip, (2.27), (2.30) ve (2.31)'de yerine yazılırsa:

$$\dot{m}''' V_{hücre} = \rho v \omega_v A_{hücre,duvar} - \rho D \frac{\partial \omega_v}{\partial n} A_{hücre,duvar} \quad (2.34)$$

Eşitlik (2.31) düzenlenip, Eşitlik (2.32)'nin sağ tarafına yazılırsa:

$$\dot{m}''' V_{hücre} = \omega_v \dot{m}''' V_{hücre} - \rho D \frac{\partial \omega_v}{\partial n} A_{hücre,duvar} \quad (2.35)$$

Eşitlik (2.35)'in sağ tarafındaki ikinci terim Fluent tarafından hesaplanıyor ve sabit bileşen sınır koşulu için duvar yakınındaki hücrelerde bileşen akısı dengesine ekleniyor. Bu değer üzerinde programda herhangi bir kontrol yapılamıyor.

Fluent programı duvara komşu hücrelerde bileşen eşitliğindeki, yoğuşmaya bağlı olarak su buharının azalma miktarının, duvara yakın hücrelerdeki süreklilik eşitliğinde azalan miktara eşit olması için her bir eşitlik farklı formlardaki hacimsel kaynak terimlerini kullanmak zorundadır.

$$\dot{m}''' V_{hücre} = \dot{m}_v''' V_{hücre} - \rho D \frac{\partial \omega_v}{\partial n} A_{hücre,du\,var} \tag{2.36}$$

Eşitlik (2.35), Eşitlik (2.36)'den çıkarıldığında:

$$\dot{m}''' = \frac{\dot{m}_v'''}{\omega_v} \tag{2.37}$$

Eşitlik (2.36) yeniden düzenlendiğinde 'bileşen kaynak terimi':

$$\dot{m}''' = \frac{1}{(\omega_v - 1)} \rho D \frac{\partial \omega_v}{\partial n} \frac{A_{hücre,du\,var}}{V_{hücre}} \tag{2.38}$$

Eşitlik (2.37) ve (2.38) düzenlendiğinde:

$$\dot{m}_v''' = \frac{\omega_v}{(\omega_v - 1)} \rho D \frac{\partial \omega_v}{\partial n} \frac{A_{hücre,du\,var}}{V_{hücre}} \tag{2.39}$$

Eşitlik (2.38) ve (2.39) UDF koduna sırasıyla süreklilik ve bileşen eşitliklerinde yoğuşmaya bağlı kaynak terimi olarak yer almaktadır. Ayrıca kaynak terimleri domain'den çıkan buharın enerji ve momentum akılarının hesabında da kullanılır.

Eşitlik (2.39) duvara normal hız vektörlerinin sıfıra yakın olduğu durumda, yoğuşan su miktarı hesabında doğru bulgu veriyor. Fakat yoğuşan su miktarı çok fazla ise 'emme etkisi' etkisi görülür. Bu durumda sınır tabakadaki gradyenler daha da keskinleşir ve bu sayede ısı, kütle, momentum transferi artış gösterir. Buradaki emme etkisi direkt olarak programa tanıtılamaz çünkü yazılan kodda duvar yüzeyi kaymama sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Bu etkiyi hesaba katmak için literatürde bazı düzeltme katsayıları kullanılmıştır [98].

2.2.2 Enerji ve Momentum Eşitlikleri Kaynak Terimleri

Su buharının yoğuşmasıyla domain'den buhar kütlesi ayrılır ve bunun sonucunda kontrol hacminden momentum ve enerji kaybı olmaktadır. Fluent programında

yoğuşmanın gerçekleştiği duvara bitişik çözüm hücrelerinde hacimsel kaynak terimleri aşağıdaki şekilde modellenir.

$$S_{j-mom} = U_j \frac{\dot{m}'''_{s,eff}}{W_{s,i}} \tag{2.40}$$

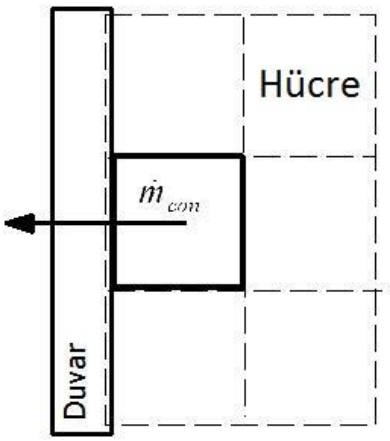
$$S_E = h_{fg} \frac{\dot{m}'''_{s,eff}}{W_{s,i}} \tag{2.41}$$

S hacimsel kaynak terimi, U_j karışımın j yönündeki hızı, h_{fg} su buharı faz değişim entalpisidir.

2.2.3 Yoğuşmanın Gerçekleşmesi

Duvar yüzeyindeki sıcaklık değeri karışım çiğ noktası sıcaklığının altında ise belirtilen noktalarda yoğuşma gerçekleşir. Yoğuşan miktar hesabı ise difüzyon modelinden hesaplanır. Şekil 2.3 ilk hücrede gerçekleşen yoğuşmayı ifade etmektedir [162].

$$\dot{m}_{yoğ.} = \frac{-\rho D}{1 - w_{v,\text{hücre}}} \frac{w_{v,\text{hücre}} - w_{v,doy,i}}{\Delta X_{merkez_hücre,merkez_i}} \tag{2.42}$$

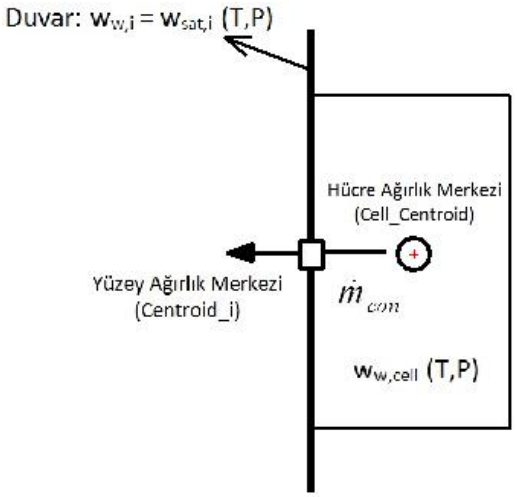


Şekil 2.3 İlk hücrede gerçekleşen yoğuşma [162]

Kullanılan UDF ile Fluent programında yapılan çözümün şematiği Şekil 4'de gösterilmiştir. $\left(1 - w_{v,hücre}\right)$ İfadesi adveksiyondan teriminden gelen ifadedir. Bu ifade mahal içerisindeki doğal taşınıma bağlı hava hareketlerinden meydana gelmektedir. Mahal içerisindeki kütlenin korunumu eşitliğinin çözümlenmesi için havanın o bölgede hareketsiz olmadığı kabul edilmektedir ve advaksiyona bağlı ek ifadenin matematiksel

olarak bütün çözüm hücrelerinde çözümlenmesi gerekmektedir. Fiziksel olarak ise sıvı-gaz ara yüzeyinde kütle transferi sadece difüzyonla gerçekleşmektedir. Dolayısıyla fiziksel durum ile matematiksel olarak bir farklılık ortaya çıkmaktadır. Adveksiyona neden olan v_n hızı ara yüzeye yakın kısımda çok küçük olduğundan ara yüzeyde kütle transferi matematiksel olarak da ağırlıklı olarak (%99) difüzyonla gerçekleşmektedir.

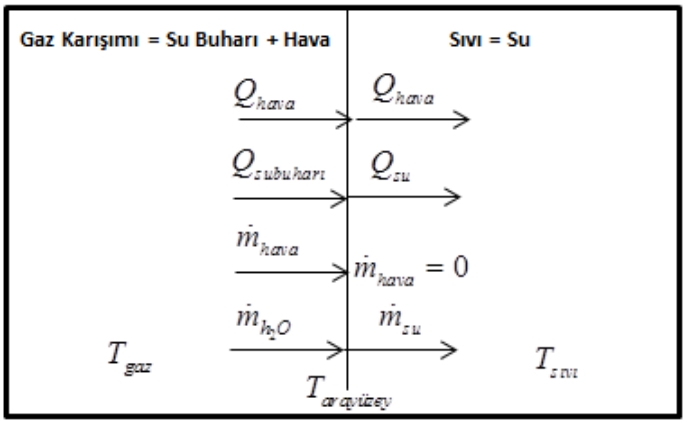
Şekil 2.4'de ifade edildiği gibi yoğuşan yüzeyde karşımdaki su buharı kütle oranı $w_{v,i}$, yüzeydeki sıcaklık ve karışım basıncına göre, doyma koşullarındaki kütle oranına $w_{v,\mathrm{sat},i}$ getirilir. Bu şekilde kütle oranın düzenlenmesinin sebebi yüzeyde doyma sıcaklığının altında su buharının yoğuşmanın gerçekleşmesi istenmeyen bir durum olup bulgularda sapmaya neden olmaktadır [162].



Şekil 2.4 Fluent çözüm şematiği [162]

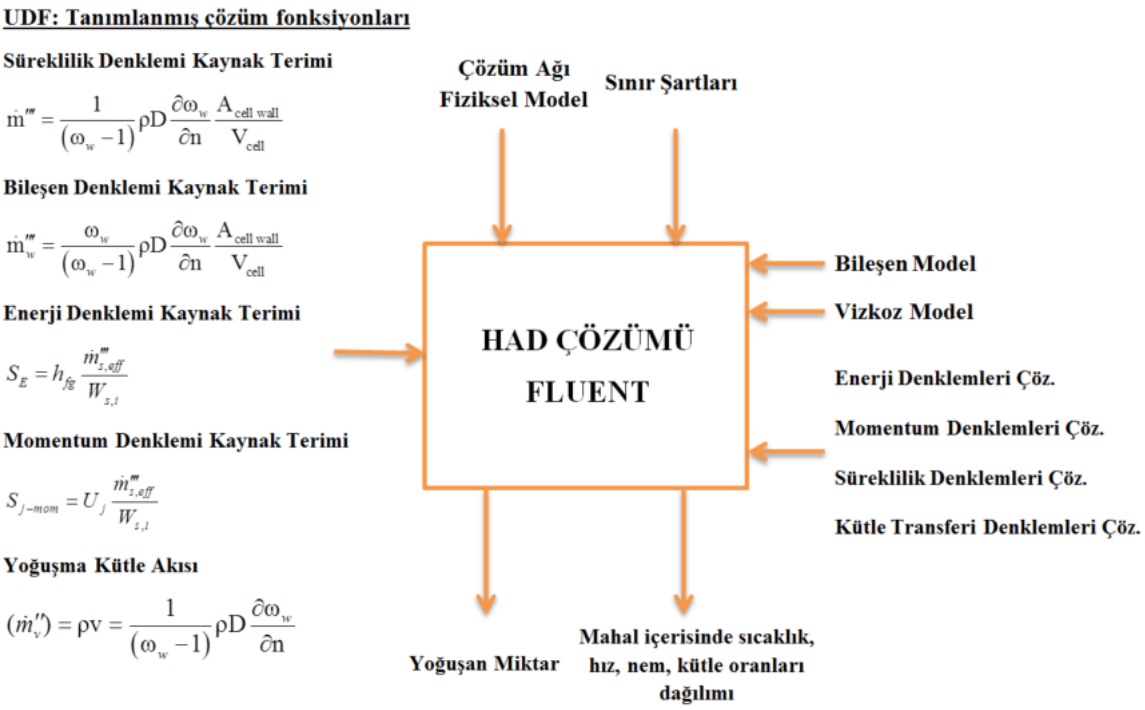
Sonuç olarak, duvara komşu hücrelerde kütle oranı doyma şartlarında ise yoğuşma miktarı sıfır olur. Eğer duvara yakın hücrelerdeki kütle oranı doyma sıcaklığının üzerinde ise yoğuşma miktarı sıfırdan farklı olur.

Şekil 2.5 su buharının sıvıya dönüşmesi sırasında gerçekleşen ısı ve kütle transferini göstermektedir.



Şekil 2.5 Ara yüzeyden ısı ve kütle geçişi

Şekil 2.6 sayısal çalışmalarda kullanılacak sayısal modellemede tekniğini özetlemektedir.



Şekil 2.6 HAD Modelleme

2.3 Sayısal Model ve Çözüm Ağının Oluşturulması

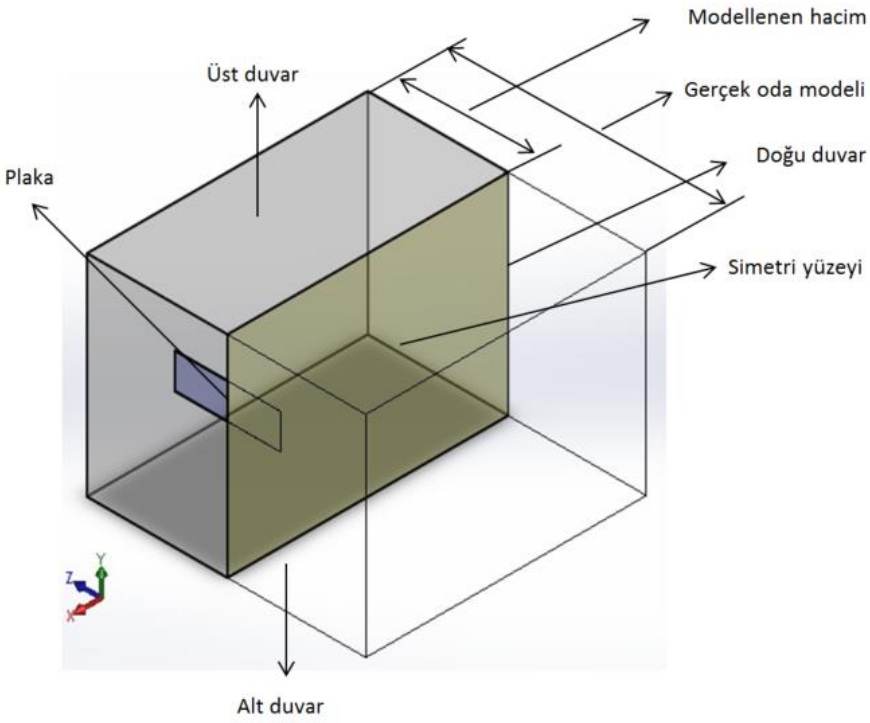
Sayısal çalışmalarda üç boyutlu model kullanılmıştır. Üç boyutlu modelin ölçüleri sayısal çalışmaların yapılacağı deney odasının ölçüleri aynı olacak şekilde belirlenmiştir.

Oluşturulan model için farklı ağ sayılarına göre seri ağ-bağımsızlığı ön analizleri yapılmış ve bulgular ağ değişkeninden bağımsız hale getirilmiştir. Bu bölümün sonunda

oluşturulan nihai sayısal model ile deneysel çalışmalar öncesi analizler yapılacak, bulguları aynı şartlarda yapılacak deney bulgularıyla kıyaslanacaktır.

2.3.1 Sayısal Model ve Geometri

Sayısal çözüm geometrisi Design Moduler 15 yazılımı ile oluşturulmuştur. Oda modelinin taban ölçüleri 4 x 4 m, yükseklik ise 3 metredir. Yoğuşturucu plakanın yüksekliği 0,5 m, genişliği 1 m ve bulunduğu yüzeyde zeminden 2 metre yüksekliğe konumlandırılmıştır. Fakat sayısal model simetrik olarak çözüldüğünden sayısal modelin taban ölçüleri 4 x 2 m olarak belirlenmiştir. Simetri hacimleri hem geometrik olarak hem de sınır şartları açısından tamimiyle simetriktir.



Şekil 2.7 Üç boyutlu sayısal model

2.3.2 Sayısal Çözüm Ağı

Bu bölümde sayısal çalışmalar için nihai çözüm ağı oluşturulmuştur.

2.3.2.1 Çözüm Ağı Bağımsızlığı Çalışmaları

Bu bölümde kullanılacak sayısal modelin çözüm ağı bağımsızlığı çalışmaları yürütülmüştür. Farklı elaman sayısına sahip 10 farklı çözüm ağı modeli

oluşturulmuştur. z yönündeki çözüm ağı sayısı çözüm bulgularını çok fazla etkilememektedir. Isı ve kütle transferinin yoğun olarak gerçekleştiği y yönündeki (yoğuşturucu yüzeyine normal yön) çözüm ağı sayısı ise esas olarak bulguları etkilemektedir. Bu yüzden z yönündeki çözüm ağı sayısı sabit tutulup esas olarak y yönündeki çözüm ağı sayısının etkisi daha detaylı incelenmiştir. Oluşturulan farklı çözüm ağlarının aynı şartlarda sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir.

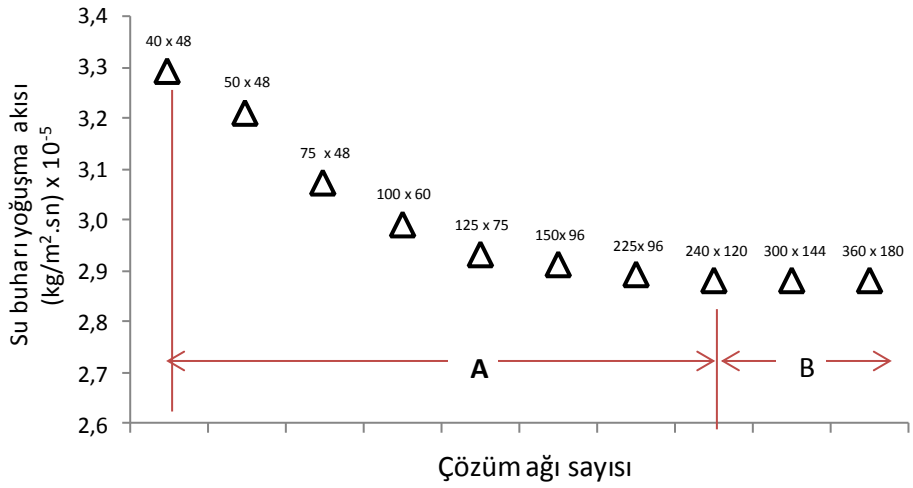
Çizelge 2.1'de farklı çözüm ağı sayıları için yoğuşturucu plaka üzerinde hesaplanan yoğuşan su buharı akıları ve hava hacmindeki ortalama su buharı kütle oranları karşılaştırılmıştır. Çözümler 1000 saniye süre için yapılmış olup bulgular zamana bağlı değiştiği için her 100 saniyede bir okunan değerlerin ortalamaları alınıp karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.1 Farklı çözüm ağı sayıları için bulguların karşılaştırılması

Çözüm Ağı	Çözüm Ağı Sayısı	Eleman Sayısı	İlk hücre kalınlığı (mm)	y^+	Yoğuşma akısı ($kg.m^{-2}.s$)	Ortalama su buharı kütle oranı (w_v) (kg_{sb}/kg_{kh})
ÇA-1	40x48x30	57.600	4,1	11,30	3,29	0,012533
ÇA-2	50x48 x30	72.000	3,5	10,15	3,21	0,012546
ÇA-3	75x48 x30	108.000	2,3	6,96	3,07	0,012563
ÇA-4	100x60 x30	180.000	1,75	5,33	2,99	0,012571
ÇA-5	125x75 x30	281.250	1,35	4,15	2,93	0,012576
ÇA-6	150x96 x30	432.000	1,15	3,55	2,91	0,012580
ÇA-7	225x96 x30	648.000	0,75	2,32	2,89	0,012581
ÇA-8	**240x120 x30**	**864.000**	**0,65**	**2,01**	**2,88**	**0,012584**
ÇA-9	300x144 x30	1.296.000	0,60	1,86	2,88	0,012584
ÇA-10	360x180 x30	1.944.000	0,48	1,49	2,88	0,012584

Şekil 2.8'den görüldüğü üzere z yönünde aynı ağ sayısına sahip A bölgesinde bulgular çözüm ağı sayısından etkilenirken, 864.000 (240 x 120 x 30) çözüm ağı sayısından sonra (B bölgesi) çözüm bulguları çok fazla değişiklik göstermemektedir. Seçilen çözüm ağı (ÇA-8) sayısından sonra çözüm ağının su buharının yoğuşma kütle akısına etkisi % 0,5 'in altına düşmektedir.

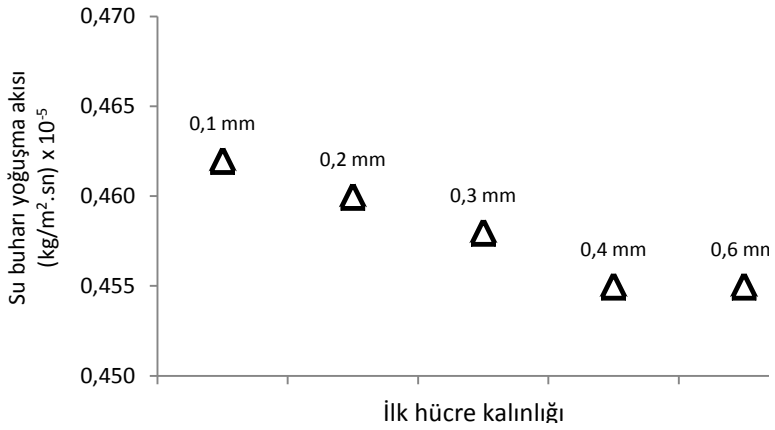
Bu yüzden çözümlerimizde 864.000 (240 x 120 x 30) çözüm ağı sayısına sahip hex geometrilerden oluşan çözüm ağı kullanılmıştır. Bu çözüm ağının ileriki analizlerde kullanılması çözüm bulgularını çözüm ağı sayısından bağımsız hale getirmiştir.



Şekil 2.8 Çözüm ağı sayısının yoğuşma kütle akısı üzerindeki etkisi

Yoğuşmanın Gerçekleştiği İlk Hücrenin Kalınlığının Yoğuşmaya Etkisi

Bu bölümde yoğuşmanın gerçekleştiği ilk hücre kalınlığının yoğuşma akısına olan etkisi incelenmiştir. Farklı ilk hücre kalınlığına sahip 1m x 1m boyutlarında iki boyutlu basit bir model için farklı ilk hücre kalınlığına sahip çözüm ağları oluşturulmuştur. Çözümler 1000 saniye süre için yapılmış olup her 100 saniyede bir okunan değerlerin ortalamaları alınıp karşılaştırılmıştır.



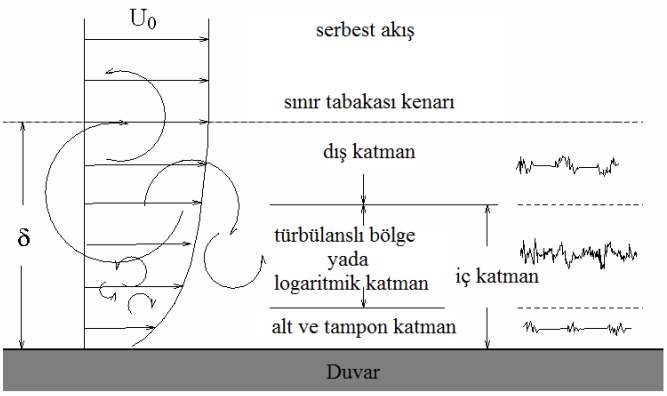
Şekil 2.9 İlk hücre kalınlığının yoğuşma kütle akısı üzerindeki etkisi

Şekil 2.9'dan görüldüğü gibi seçilen (240 x 120 x 30) ağ konfigürasyonundaki ilk hücre kalınlığı olan 0,65 mm ile olduğu durum ile 0,1 mm olduğu durum arasındaki yoğuşma kütle akısı arasındaki fark yaklaşık %1,5 olmuştur. Bu sonuca göre seçilen çözüm ağının ikinci defa ağ yapısından bağımsızlığı ispatlanmıştır.

y+ Boyutsuz Duvar Mesafesi

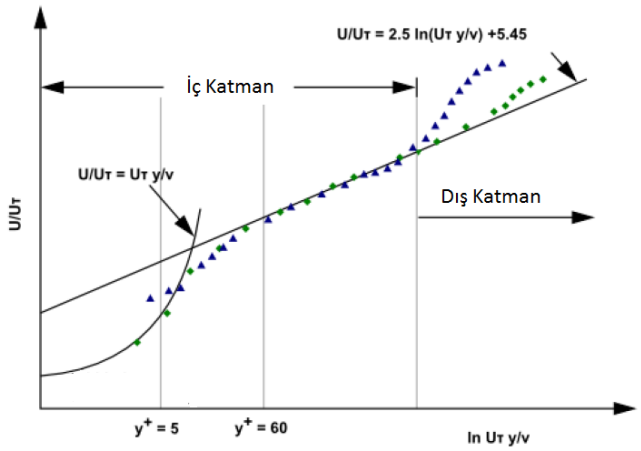
Duvar üzerindeki basınç gradyanlarında oluşan farklılıkları görebilmek ve sınır tabakasında gerçekleşen akışı kontrol edebilmek için, Olander, [153] duvara yakın olan akışın tam olarak çözümlenmesi gerektiğini belirtmiştir.

Sınır katmanı türbülanslı akış için viskoz etkinin önemli olduğu yüzey üzerindeki ince bir tabaka olarak tanımlanır. Sınır katmanı serbest akışkan hızının U_τ, duvar üzerinde sıfıra yaklaşmasına izin verir. Türbülans akış içerisinde duvarlar, kaymama şartlarından ötürü hız alanlarını doğrudan etkilemektedirler. Burada yüzeye dik olan hız bileşeni, yüzeye paralel olan hız bileşenine göre oldukça küçüktür ($u >> V$). Sınır tabakası kalınlığı (δ), serbest akışın %99 olarak oluştuğu yüzeyin duvara olan uzaklığıdır [163].



Şekil 2.10 Duvara yakın bölgelerdeki akış bölgeleri [163]

Duvara yakın bölgede gerçekleşen akış Şekil 2.10' da görüldüğü üzere üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Duvara en yakın bölge, viskoz alt katman olarak adlandırılır. Bu bölgede akış tamamıyla laminar olmasından ötürü, viskoz sönümleme kuvvetleri teğet ve normal hız büyüklüklerini düşürür. Viskozite, momentum ve kütle transferini önemli ölçüde etkilemektedir. Viskoz alt bölgeye yakın olan katman, tampon tabaka olarak adlandırılır. Burada viskozite ve türbülansın etkileri eşit orandadır. Duvardan olan mesafe arttıkça türbülans etkileri artar ve tamamıyla türbülans etkilerinin yaşandığı logaritmik tabakada grandyanlar farklılaşmaktadır [163].



Şekil 2.11 Duvara yakın bölgede gerçekleşen akışın sınır tabakası yapısı [163]

Şekil 2.11'deki y ifadesi duvardan olan uzaklık, τ_w duvar kayma gerilmesi, ρ yoğunluk, μ dinamik vizkosite, v kinematik vizkosite, U y mesafesindeki hız, $U_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ sürtünme hızıdır.

Duvardan ile ilk hesaplama hücresi arasındaki uzaklığı tanımlayan boyutsuz y^+ sayısı, Reynold sayısı baz alınıp, sürtünme hızı kullanılarak hesaplanır.

$$y^+ = yU_\tau/v \tag{2.43}$$

Sürtünme hızı kullanılarak, boyutsuz y uzaklığında oluşan sürtünme hızı,

$$u^+ = U/U_\tau \tag{2.44}$$

Ağ Bağımsızlığı Çalışması ve y+ İfadesi

İlk hesaplama hücresinin duvardan uzaklığını belirtmek için boyutsuz y^+ değeri kullanılmaktadır. Bu değer, oluşturulan modeldeki kullanılacak duvar yaklaşımına bağlı olarak sınır tabakası, akış koşulları ve momentum eşitlikleri hakkında bilgi vermektedir. Model ağ yapısının belirlenmesi için y^+ değeri bu nedenle oldukça önemli bir parametredir [163].

Duvar yakınında meydana gelen akışta oluşan sınır bölgesi üç katmandan meydana gelmektedir. Oluşan bölgeler sırasıyla laminar alt katman, tampon katman ve türbülans bölgesidir. Her bir katmandaki gradyan yapıları ve türbülans kinetik enerjileri farklıdır. Yapılacak çalışma için her katmanı çözmek yüksek işlemci hızına gereksinim duymaktadır ayrıca üç katman için kullanılacak yaklaşımların farklı olmasından ötürü

problem oldukça karmaşıklaşacaktır. Bu nedenle çalışılacak bölgeye göre ağ yapısının oluşturulması gerekmektedir [163].

Analizi yapılacak modelin, ağ bağımsızlığı çalışması için 10 farklı ağ yapısı oluşturularak incelenmiştir. Çizelge 2.1'deki son üç ağ yapısında, bulguların birbirine yakınsadığı ve artan çözüm ağı sayısından bağımsızlaştığı görülmektedir. Elde edilmiş olan "Kayma Gerilmesi" ve "yoğunluk" değerlerinin son üç ağ yapısında sabit kalması da bunun göstergesidir.

Yapılan incelemede laminar alt sınır tabakada gerçekleşen kütle transferi çalışılmaktadır. Alt sınır tabakada gerçekleşen duvara yakın akış neredeyse tamamıyla laminardır. Burada kullanılan y^+ değeri 12' nin altında olmalıdır. Elde edilen ağ analizi bulgularının 5'in altında olduğu Çizelge 2.1'de görülmektedir. Kullanılması kararlaştırılan 8. ağ yapısında ise y+ değeri, 2,01' dir. İlk hesaplama hücresinin duvara uzaklığı ise 0,65 mm' dir. Elde edilen bulgular oluşturulan ağ yapısının çözümden bağımsız olduğunu, laminar alt sınır tabakada çalışıldığını ve bu tabakada en az 6 hesaplama hücresinin bulunduğunu göstermiştir.

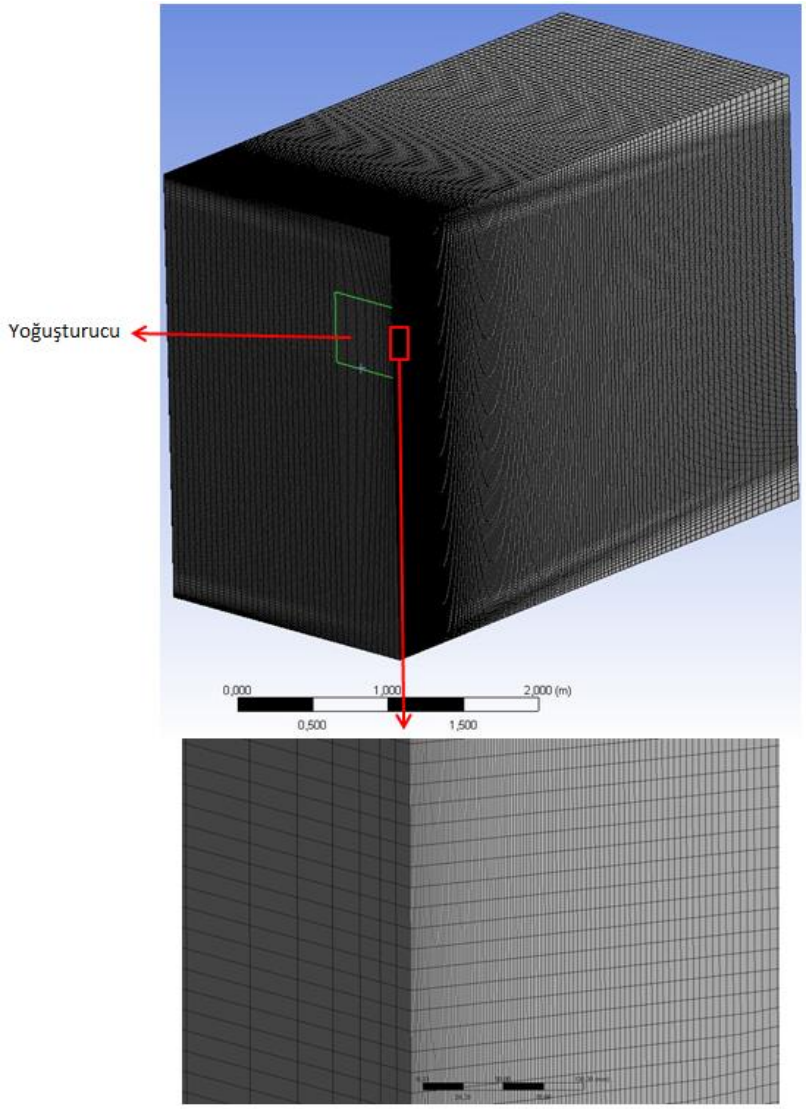
2.3.2.2 Nihai Çözüm Ağı

Oluşturulan geometrik modeli yaklaşık 864.000 hexegonal çözüm ağından oluşmaktadır. Sınır tabakası ve sıvı-gaz ara yüzeyinin en iyi şekilde yakalanması ve daha doğru bulgu elde edilmesi amacıyla Bias faktör 60 olarak seçilmiş, duvar yüzeyine yakın bölgelere daha sık ağ atılmıştır. Bu bölgelerde sık ağ atılmasının sebebi, bu bölgede sıcaklık, konsantrasyon ve hız gradyanlerinin en iyi şekilde yakalanmasının gerekliliğidir.

Yoğuşmanın gerçekleştiği yüzeye yakın bölgelerde yukarıda belirtildiği gibi ağlarınn daha sık atılması ile o bölgede hücrelerin genişliği 0,65 mm, yüksekliği 9 mm'dir. Duvara yakın bölgelerde y^+ değeri 2 mertebelerinde tutulmuştur. Bu sayede türbülans kütle transferinin ihmal edildiği laminar alt tabakadaki su buharı konsantrasyon gradyanleri çözümlenmiştir.

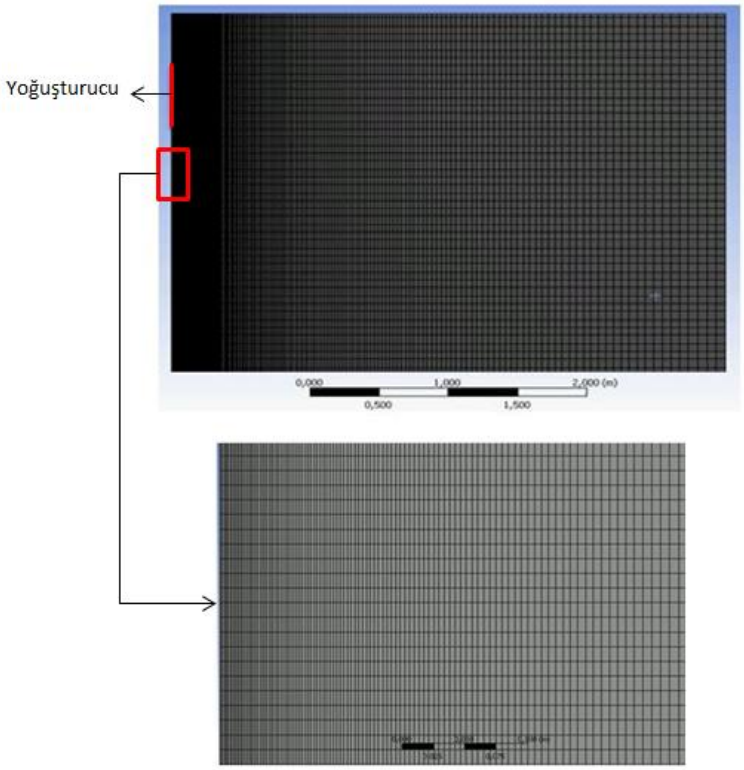
Çözüm hücrelerin uzun kenarının kısa kenarına oranı en fazla 14 olmuştur. Laminar alt sınır tabakası 6 hücreye bölünmüştür.

Şekil 2.12'de nihai sayısal model için oda hacmindeki çözüm ağı gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Üç boyutlu sayısal model çözüm ağı

Şekil 2.13'de ise oluşturulan modelin X-Y düzlemindeki çözüm ağı ve yoğuşmanın gerçekleşeceği duvar yüzeyindeki yakınlaştırılmış ağ görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.13 Sayısal model x-y düzlemindeki çözüm ağı

2.3.3 Sayısal Model ve Çözüm Tekniği

Sayısal çalışmalarda ticari bir yazılım olan Ansys - Fluent 15 yazılımı kullanılmıştır. Analiz çalışmaları 48 GB hafızaya ve 12 çekirdek işlemci gücüne sahip iş istasyonuyla yürütülmüştür. Tüm çözümler zamana bağlı, implicit, üç boyutlu ve 'Double Precision' olarak yürütülmüştür.

Sayısal çalışmalarda enerji, akış, momentum, kütle transferi ve bileşen eşitlikleri sonlu hacim farklar sayısal metodu yardımıyla çözülmüştür.

2.3.3.1 Sayısal Çalışmalarda Kullanılan Programda Kullanılan Eşitlikler

Kullanılan paket programda aşağıdaki korunum eşitlikleri çözdürülmüştür [163].

Süreklilik:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial (\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial (\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial (\rho w)}{\partial z}=S_{kütle} \tag{2.45}$$

Buradaki $S_{kütle}$ süreklilik eşitliğindeki kaynak terimidir.

Momentum

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u w)}{\partial z}=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}+\rho g_x+F_x \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho v w)}{\partial z}=-\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}+\rho g_y+F_y \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t}+\frac{\partial(\rho w u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho w v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w w)}{\partial z}=-\frac{\partial P}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}+\rho g_z+F_z \quad (2.48)$$

Buradaki basınç ifadesi statik basınç, τ gerilme tensörü, ρg yer çekiminin oluşturduğu kuvvet, F ise dış kuvvetleri ifade etmektedir.

Enerji Çözüm Eşitliği

Ansys Fluent programı enerji eşitliğini aşağıdaki formda çözmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\nabla.\left(\overline{v}(\rho E+\upsilon)\right)=\nabla.\left(k\nabla T-\sum_j h_j \overline{J}_j\right)+S_{enerji} \quad (2.49)$$

Burada k etkin ısı iletim katsayısı $\overline{J}_j$, her bir j türünün difüzyon akısıdır. Eşitlik (2.49)'un sağ tarafındaki ilk 3 terim ise sırasıyla, iletimle, bileşen difüzyonu ile olan enerji transferini ve S_{enerji} ise enerji kaynak terimini ifade etmektedir.

Eşitlik (2.49)'daki E ifadesi:

$$E=h-\frac{P}{\rho}+\frac{v^2}{2} \quad (2.50)$$

Eşitlik (2.50)'deki ideal gaz için duyulur entalpi ifadesi:

$$h=\sum_j w_j h_j \quad (2.51)$$

Eşitlik (2.51)'deki w_j değeri j türlerinin her birinin kütle oranını ifade etmektedir.

$$h_j=\int_{T_{ref}}^{T} c_{p,j}\,dT \quad (2.52)$$

Eşitlik (2.52)'deki T_{ref} değeri basınç tabanlı (pressure-based) çözüm methodu kullanıldığından 298,15 K olarak alınmıştır.

Bileşen difüzyon teriminin enerji eşitliğinde hesaba katılması:

Sayısal çalışmalarda basınç tabanlı çözüm modeli kullanıldığından enerji eşitliğindeki (2.49) bileşen difüzyonuna bağlı entalpi aktarımı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\nabla.\left(\sum_j h_j \bar{J}_j\right) \tag{2.53}$$

Bileşen Eşitliği

Bileşen eşitliklerinin çözümünde Fluent programı her bir karışım türü için taşınım ve difüzyon korunum eşitliklerini çözümlerini gerçekleştirebilmektedir. Fluent programı her bir noktadaki yerel kütle oranlarını w_i her bir i türü için taşınım ve difüzyon eşitliklerini çözerek hesaplamaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w_i) + \nabla(\rho v w_i) = -\nabla.J_i + S_i \tag{2.54}$$

Buradaki S_i UDF olarak eklenen kaynak terimidir.

Doğal Taşınım Eşitlikleri

Mahal içerisindeki akışkana ısı transferi gerçekleştiğinde sıcaklığa bağlı olarak akışkanın yoğunluğu değişim gösterir ve bu değişim ve yer çekimi gücü etkisiyle akışkan hareket kazanır. Bu çalışmada Fluent programında doğal taşınım modeli kullanılmıştır.

Akışkan üzerindeki bu kaldırma kuvveti etkisi Grashof ve Reynolds sayılarının oranından ölçülür.

$$\frac{Gr}{\mathrm{Re}^2} = \frac{g\beta\Delta TL}{v^2} \tag{2.55}$$

Bu değerin payındaki ifade arttıkça akışkan üzerindeki yer çekimi etkisi artar. Doğal taşınım çözümünde akışkan üzerindeki kaldırma kuvveti etkileri Rayleigh sayısı ile ölçülür.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T^3 \rho}{\mu a} \tag{2.56}$$

Buradaki β termal genleşme katsayısıdır.

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \tag{2.57}$$

a ise termal difüzyon katsayısıdır.

$$a = \frac{k}{\rho c_p} \tag{2.58}$$

2.3.3.2 Sayısal Model ve Sınır Şartları

Hava içerisindeki su buharının modellenmesi amacıyla ise 'Bileşen Aktarım' eşitliklerinin çözümü aktif hale getirilmiş, gaz karışımı hava ve su buharından oluşacak şekilde tanımlanmıştır.

Mahal içerisindeki doğal taşınıma bağlı hava hareketlerinin modellenmesi amacıyla çözümlerde yer çekimi etkisi de dikkate alınmıştır.

Oda içerisinde akışın %80'i laminar, yoğuşturucu plaka üzerinde ise tamamıyla laminar olduğundan vizkoz model olarak laminar seçilmiştir. Tüm çözümlerde enerji eşitliklerinin çözümü gerçekleştirilmiştir. Çizelge 2.2'de sayısal çözümlerde kullanılan modeller özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 Kullanılan sayısal çözüm yöntemleri

Enerji Çözümü	Açık
Vizkoz model	Laminar
Bileşen	Bileşen aktarım modeli çözümü, Gaz karışımı Hava & Su Buharı Karışımı

Malzeme Seçimi

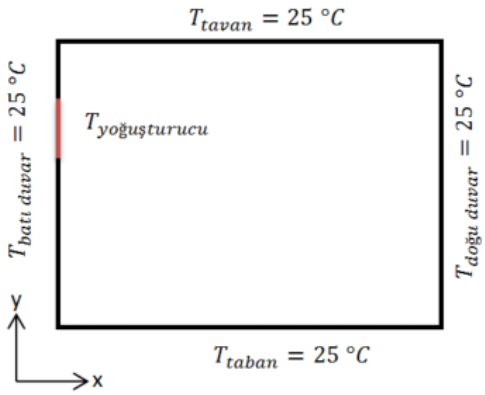
Yoğuşturucu plaka ve diğer tüm yüzeyler alüminyum malzeme, olarak tanımlanmıştır. Oda içerisinde akışkan olarak hava-su buharı gaz karışımı tanımlanmıştır.

Çözüm Hücresi

Hava su buharı gaz karışımı çözüm alanı için kütle dengesi, X momentum, Y momentum, su buharı ve enerji çözümleri için UDF programında yer alan kaynak kodları eklenmiştir.

Sınır Şartları

Modelde tüm duvarlar yüzey olarak kabul edilmiştir ve malzeme olarak aluminyum olarak tanımlanmıştır. Yoğuşturucu dışındaki tüm duvarların yüzey sıcaklıkları 25 °C olacak şekilde sabit sıcaklık sınır şartı verilmiştir. Yoğuşturucu bölge yüzey olarak kabul edilmiş ve malzemesi aluminyum plaka olarak tanımlanmıştır. Yoğuşturucu plakanın yüzey sıcaklığı sabit olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.14). Yoğuşmanın sadece plaka yüzeyinde gerçekleşeceği tanımlanmıştır.



Şekil 2.14 Sınır şartları

Sınır şartları özet olarak Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 Sınır şartları

Duvar Hareketi	Hareketsiz duvar
Yüzey Kayma Şartı	Kaymama sınır koşulu
Duvar Sıcaklığı	Sabit Sıcaklık, 25 °C
Yoğuşturucu Yüzey Sıcaklığı	Sabit Sıcaklık
Bileşen Sınır Şartı	Yoğuşturucu: Tanımlanmış kütle oranı (UDF)

Kullanılan Ayrıklaştırma Çözüm Yöntemleri

Basınç – Hız eş zamanlı çözümlerinde SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Momentum, difüzyon ve enerji eşitlikleri çözümlerinde Second Order Upwind çözüm metodu kullanılmıştır (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4 Kullanılan ayrıklaştırma çözüm yöntemleri

Basınç & Hız Akuple Çözüm	SIMPLE
Gradyan Çözümü	Green Gauss Node Base
Basınç Çözümü	Presto
Momentum Çözümü	Second Order Upwind
Su Buharı Bileşen Çözümü	Second Order Upwind
Enerji Çözümü	Second Order Upwind

Başlangıç Şartları

Başlangıç şartı olarak gaz karışımı içerisindeki su buharı kütle oranı farklı şartlar için sabit değer olarak tanımlanmış ve çözüm hacmindeki su buharı hava gaz karışımının başlangıç sıcaklığı 25 °C olarak belirlenmiştir.

Zaman Adımı Optimizasyonu

Sayısal çalışmalarda zaman adımının belirlenmesinde Courant sayısı dikkate alınmaktadır. Courant sayısı birim zaman adımı ve birim uzunluktaki boyutsuz aktarım ifadesidir.

$$a = \frac{u}{\Delta t/\Delta x} = \frac{KDD_Denklem_Hızı}{Çözüm_Ağının_Hızı} \tag{2.59}$$

$$a = u\Delta t/\Delta x \tag{2.60}$$

Burada a courant sayısı, Δt birim zaman adımı, u ortalama hız, Δx birim mesafedir.

Coupled çözümlerde Fluent program standart olarak Courant sayısını 200 olarak kabul edilmektedir. Karmaşık ve üç boyutlu çözümlerde ise kararlı çözüm için bu değerin 20-30'lara kadar indirilmesi önerilmektedir, Fluent theory guide [163].

Zaman Adımının Belirlenmesi

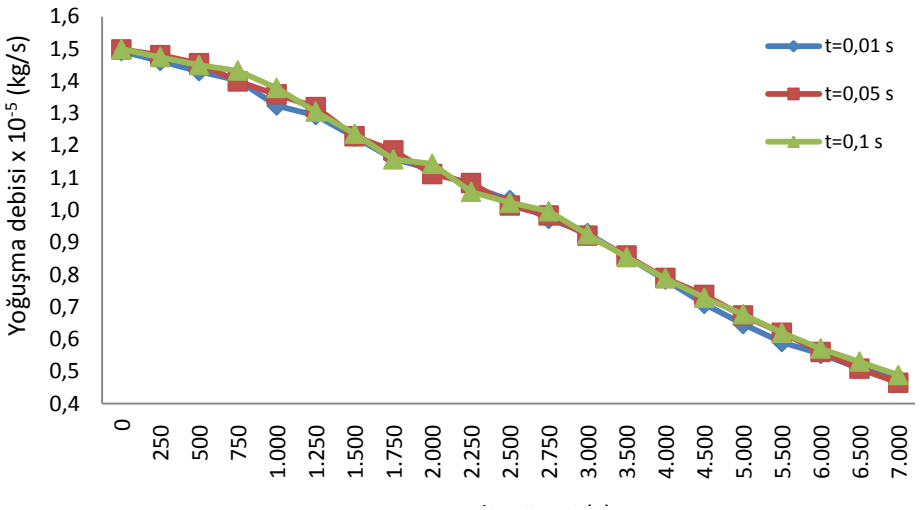
Zaman adımının belirlenmesinde öncelikli olarak, her bir zaman adımı için aynı sınır şartları kullanılarak sayısal çözümler yapılmıştır. 0,01 – 0,05 – 0,1 saniye zaman

adımları için zamana bağlı yoğuşma miktarı ve mahal ortalama bağıl nem değişimleri incelenmiştir.

Ön deneme analiz çalışmaları sonucunda her üç zaman adımı arasında ortalama yoğuşma debisi maksimum % 0,9 mertebelerinde değişiklik göstermiştir (Şekil 2.15). Mahal içerisindeki ortalama bağıl nem değişiminde ise 0,01 s zaman adımı çözümü ile 0,1 s zaman adımı çözümü arasındaki maksimum fark % 1,2 olduğu görülmüştür.

0,05 s zaman adımı kullanılarak, yoğuşmanın gerçekleştiği duvara bitişik hücre için hesaplanan courant sayısı değeri yaklaşık 15 çıkmıştır. (Bitişik hücredeki ortalama hız 0,2 m/s, hücre genişliği 0,65 mm ve zaman adımı 0,05 s alınmıştır.)

Elde edilen analiz bulguları ve hesaplanan Courant sayısı değeri dikkate alındığında zaman adımı 0,05 saniye olarak belirlenmiştir.

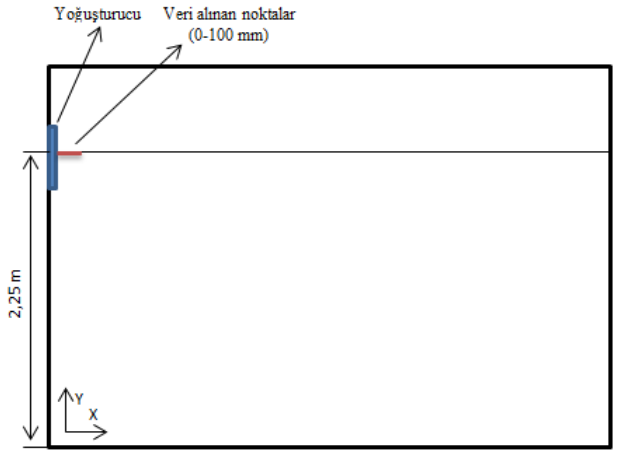


Şekil 2.15 Farklı zaman adımları için zamana bağlı yoğuşan miktar

Mahal İçerisinde Sis Oluşumunun İncelenmesi

Yoğuşturucu yüzey sıcaklık şartının 9 °C olduğu durum için yürütülen CFD çalışma bulguları kullanılarak mahal içerisinde sis oluşması durumu olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Mahal içerisindeki enerji dengesi sürekli duruma yakın hale geldiği zamandaki (t = 3 saat) analiz bulguları değerlendirilmiştir. Yüzeye yakın bölgedeki yatay eksende farklı noktalardan hava sıcaklık ve su buharı özgül nem değerleri sayısal analiz bulgularından alınmıştır (Şekil 2.16).



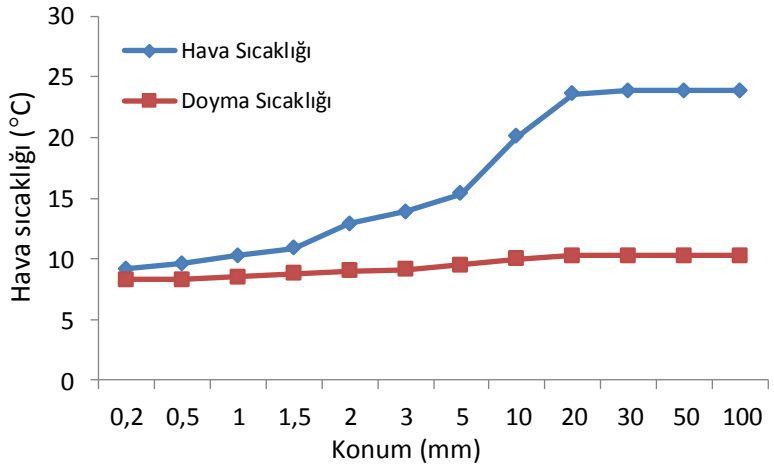
Şekil 2.16 Farklı zaman adımları için zamana bağlı yoğuşan miktar

Değer alınan noktalardaki özgül nem değerlerine karşılık gelen doyma sıcaklıkları psikometrik diyagramdan hesaplanmıştır. Bulgular Çizelge 2.5'de özetlenmiştir

Çizelge 2.5 Gerçekleşen hava sıcaklığı ve doyma sıcaklığı verilerinin kıyaslaması

Konum (mm)	Özgül Nem (kg_{sb}/kg_{kh})	Hava Sıcaklığı (°C)	Doyma Sıcaklığı (°C)	Fark (°C)
x=0,2	0,0070	9,2	8,3	0,9
x=0,5	0,0070	9,6	8,3	1,3
x=1	0,0071	10,3	8,5	1,8
x=1,5	0,0072	10,9	8,8	2,1
x=2	0,0073	12,9	9	3,9
x=3	0,0073	13,9	9,1	4,8
x=5	0,0075	15,4	9,5	5,9
x=10	0,0078	20,1	10	10,1
x=20	0,0080	23,6	10,3	13,3
x=30	0,0080	23,9	10,3	13,6
x=50	0,0080	23,9	10,3	13,6
x=100	0,0080	23,9	10,3	13,6

Bulgular değerlendirildiğinde yoğuşturucu yüzey sıcaklığı 9 °C olduğu durum için mahal içerisinde hiçbir noktada sis oluşması beklenmemektedir. Yüzeye en yakın noktada hava sıcaklığı doyma sıcaklığına 0,9 °C üzerinde olmaktadır. Bu noktadan itibaren yüzeyden uzaklaştıkça ise hava sıcaklığı ile doyma sıcaklığı arasındaki fark artmaktadır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 Gerçekleşen hava sıcaklığı ve doyma sıcaklığı verilerinin kıyaslaması

2.4 Sayısal Analiz Bulguları

Bölüm 2.3'de belirtilen sayısal modelleme tekniği, geliştirilen sayısal model ve sınır şartları, çözüm metotlarına göre sayısal analizler yürütülmüş bulguları alt başlıklar şeklinde aşağıda verilmiştir.

Yürütülen sayısal çalışmalardaki sınır şartları kullanılarak 10 farklı sayısal çalışma yürütülmüştür. Analizlerde iki farklı parametre çalışılmıştır. Bunlar: yoğuşturucu plaka yüzey sıcaklığı ve başlangıç bağıl nem değeridir. Var olan deneysel alt yapı ile plaka yüzeyinde elde edilebilen en düşük yüzey sıcaklığı 10,5 °C olduğundan, farklı başlangıç bağıl nem değerlerinde bu sıcaklık değeri kullanılmıştır.

Yürütülen sayısal çalışmaların özeti Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 Gerçekleşen hava sıcaklığı ve doyma sıcaklığı verilerinin kıyaslaması

	Farklı Plaka Yüzey Sıcaklığı						**Farklı Başlangıç Bağıl Nem Oranı**			
Deney Şartları	**CFD-1**	**CFD-2**	**CFD-3**	**CFD-4**	**CFD-5**	**CFD-6**	**CFD-7**	**CFD-8**	**CFD-9**	**CFD-10**
$T_{s,0}$ (°C)	10,5	10,9	11,4	12,3	13	14	10,5	10,5	10,5	10,5
$\varphi_{H,0}$ (%)	75	75	75	75	75	75	85	80	70	65
$T_{a,0}$ (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
$T_{sw,0}$ (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

Mahal içerisindeki değişken dağılımların daha detaylı olarak incelenmesi için model üzerinde Eksen-1 isimli bir eksen tanımlanmıştır (Şekil 2.18).



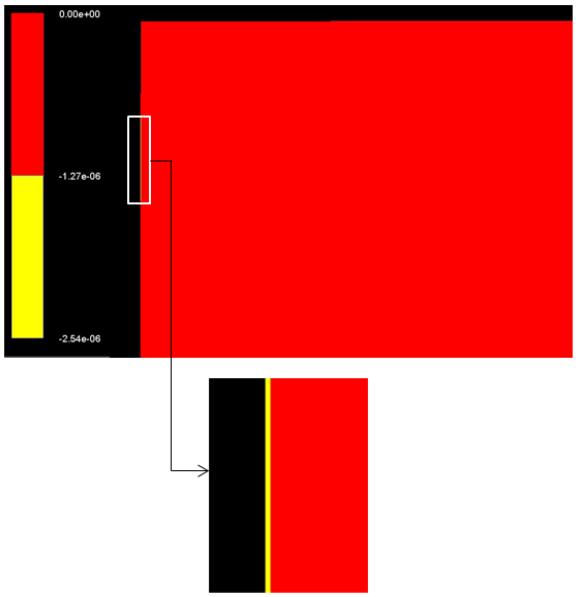
Şekil 2.18 Gerçekleşen hava sıcaklığı ve doyma sıcaklığı verilerinin kıyaslaması

2.4.1 Yoğuşan Su Buharı Debisi ve Toplam Yoğuşma

Geliştirilen oda modelinde konumlandırılan yoğuşturucu plaka üzerinde yoğuşma, UDF ile hesaplanmıştır. Çözümler 0,05 s zaman adımıyla deney süresine karşılık gelen süre boyunca yürütülmüştür. Her bir zaman adımındaki çözüm bulguları kaydedilmiş bulguları aşağıda verilmiştir. Şekil 2.19'da verilen analiz görseli CFD-5 modelinin 600. dakikadaki çözüm bulgularından alınmıştır.

Bu bölümde yoğuşturucu plaka üzerindeki zamana bağlı yoğuşma debisi, toplam yoğuşma miktarı bulguları verilmiştir.

Şekil 2.19, yoğuşturucu plaka üzerinde gerçekleşen yoğuşmayı göstermektedir. Bölüm 2.2'de belirtildiği gibi yoğuşma yoğuşturucu plakaya komşu en yakın hücrede gerçekleşmektedir.



Şekil 2.19 Yoğuşturucu plaka üzerinde gerçekleşen yoğuşma (CFD-5)

Çizelge 2.7'de yüzey sıcaklığı parametresinin çalışıldığı analiz bulguları yer almaktadır. Her bir çözüm adımı için bulgular kaydedilmesine rağmen, aşağıdaki tabloda her 30 dakikalık verilerin ortalaması verilmiştir.

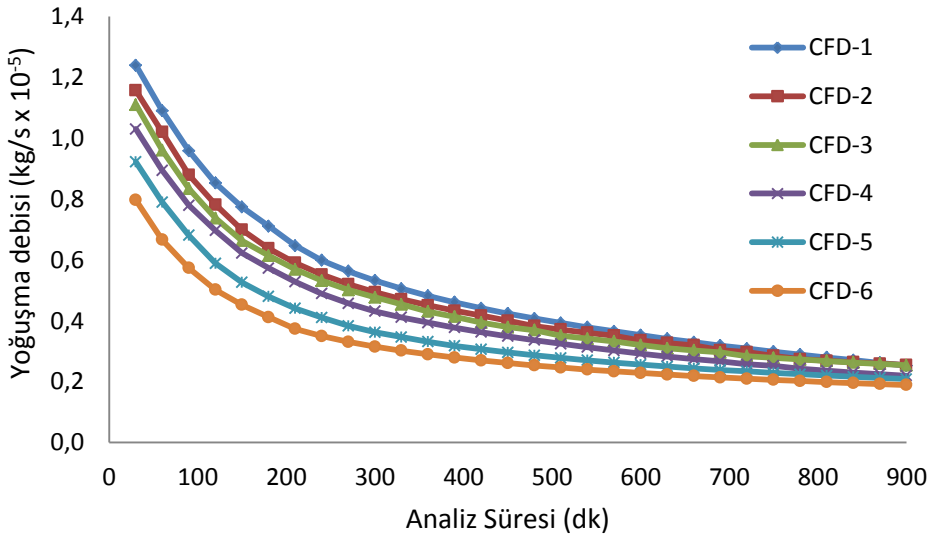
Çizelge 2.7 Farklı yoğuşturucu yüzey sıcaklıkları için CFD bulguları

	Toplam Yoğuşan Miktar (g)						**Yoğuşma Debisi (kg/s) x10^{-5}**					
Analiz Süresi (dk)	**CFD 1**	**CFD 2**	**CFD 3**	**CFD 4**	**CFD 5**	**CFD 6**	**CFD 1**	**CFD 2**	**CFD 3**	**CFD 4**	**CFD 5**	**CFD 6**
30	23,5	21,0	20,0	19,2	16,8	14,4	1,29	1,17	1,11	1,07	0,93	0,80
60	43,1	39,1	37,3	35,3	30,7	26,3	1,08	1,00	0,96	0,89	0,78	0,67
90	60,0	54,9	52,3	49,4	43,0	36,7	0,93	0,88	0,83	0,78	0,68	0,57
120	75,1	69,0	65,6	61,9	53,6	45,7	0,83	0,78	0,74	0,70	0,59	0,50
150	88,7	81,6	77,4	73,3	63,1	53,8	0,75	0,70	0,66	0,63	0,53	0,45
180	101,3	93,0	88,5	83,8	71,7	61,2	0,69	0,64	0,61	0,58	0,48	0,41
210	112,9	103,7	98,7	93,6	79,7	68,0	0,64	0,59	0,57	0,54	0,44	0,37
240	123,8	113,6	108,3	102,7	87,2	74,3	0,60	0,55	0,53	0,51	0,41	0,35
270	134,0	123,0	117,3	111,2	94,2	80,2	0,56	0,52	0,50	0,47	0,39	0,33
300	143,7	131,9	125,8	118,9	100,7	85,9	0,53	0,49	0,47	0,43	0,36	0,32
360	161,7	148,4	141,7	133,4	112,9	96,5	0,48	0,45	0,43	0,39	0,33	0,29
420	178,1	163,7	156,3	146,7	124,2	106,4	0,44	0,42	0,40	0,36	0,31	0,27
480	193,2	177,9	169,8	159,1	134,7	115,6	0,41	0,38	0,37	0,34	0,29	0,25
540	207,2	191,1	182,2	170,5	144,5	124,4	0,38	0,36	0,34	0,31	0,27	0,24
600	220,2	203,4	194,0	181,3	153,9	132,7	0,35	0,34	0,32	0,29	0,26	0,23
660	232,4	215,0	205,3	191,3	162,7	140,7	0,33	0,32	0,31	0,27	0,24	0,22
720	243,8	225,8	215,8	200,7	171,2	148,3	0,31	0,30	0,28	0,26	0,23	0,21

Çizelge 2.7 Farklı yoğuşturucu yüzey sıcaklıkları için CFD bulguları (devamı)

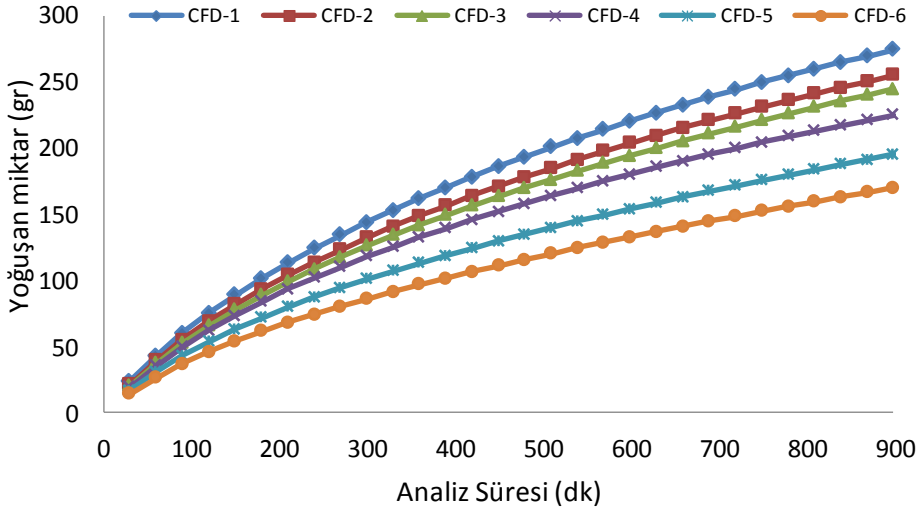
780	254,5	235,9	225,8	209,5	179,4	155,6	0,29	0,27	0,27	0,24	0,22	0,20
840	264,5	245,5	235,3	217,9	187,2	162,7	0,27	0,26	0,26	0,23	0,22	0,20
900	273,9	254,7	244,5	225,9	194,8	169,6	0,25	0,25	0,25	0,22	0,21	0,19

Şekil 2.20'de farklı plaka yüzey sıcaklıkları için zamana bağlı yoğuşma debisinin değişimi görülmektedir. Tüm analiz bulgularında görülen ortak bulgu, plaka üzerinde su buharı-hava gaz karışımı içerisindeki su buharının yoğuşmasına bağlı olarak oda içerisindeki su buharı kütle oranı ve bağıl nem değeri zamana bağlı olarak düşmektedir. Aynı şekilde oda içerisindeki su buharının kütle oranının azalmasına bağlı olarak Eşitlik 2.65'den de görüleceği üzere su buharı yoğuşma kütle akısı zaman bağlı olarak azalmaktadır. En yüksek yoğuşma akısı en düşük yüzey sıcaklığına sahip CFD-1 sonucunda görülmektedir. Fakat 720. dakikada sonra yoğuşma debilerinin azalmasına bağlı olarak yüzey sıcaklığının yoğuşma debisine olan etkisi azalmaktadır.



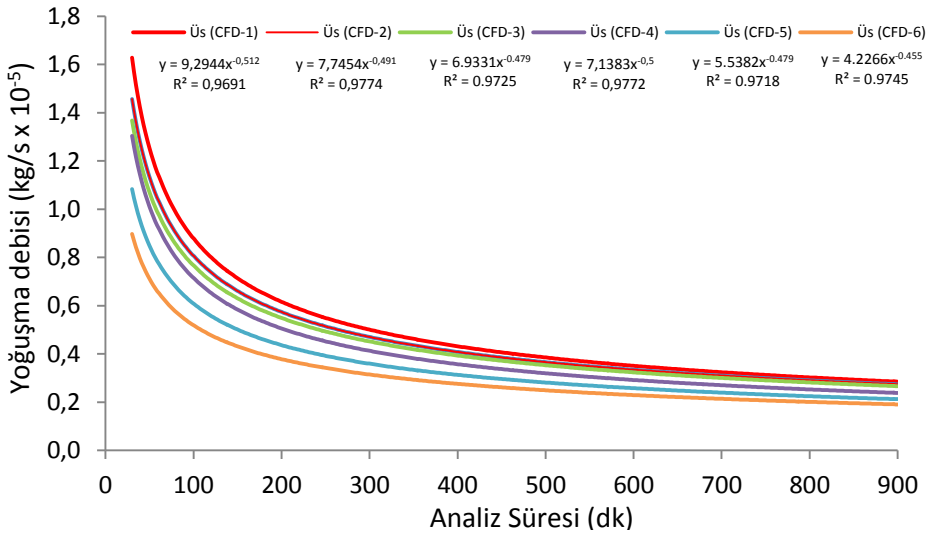
Şekil 2.20 Plaka yüzey sıcaklığına göre zaman bağlı yoğuşma debisi değişimi

Şekil 2.21'de ise farklı yüzey sıcaklıkları için toplam yoğuşma miktarları verilmiştir. Örneğin yüzey sıcaklığı 14 °C iken 900 dakika sonunda toplam yoğuşan su buharı miktarı 169,6 g iken, yüzey sıcaklığının 10,5 °C'ye düşürülmesiyle yoğuşan miktar % 38 oranında artarak 273,9 g'a yükselmektedir.



Şekil 2.21 Plaka yüzey sıcaklığına göre zaman bağlı toplam yoğuşan miktar değişimi

Şekil 2.22'de üstel olarak çizdirilen zamana bağlı yoğuşma akıları verilmiştir.



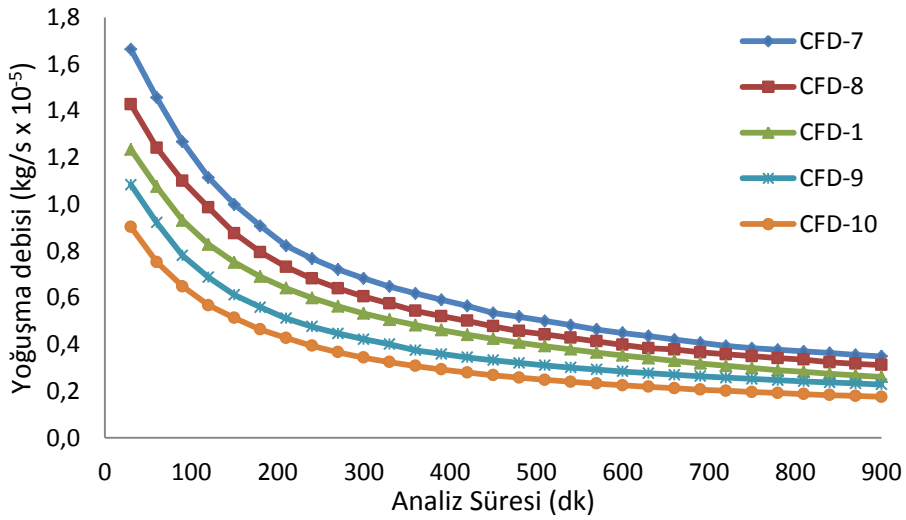
Şekil 2.22 Plaka yüzey sıcaklığına göre zaman bağlı yoğuşma akısı eğilim eşitlikleri

Çizelge 2.8'de başlangıç bağıl nem parametresinin çalışıldığı analiz bulguları yer almaktadır.

Çizelge 2.8 Farklı başlangıç bağıl nem değerleri için CFD bulguları

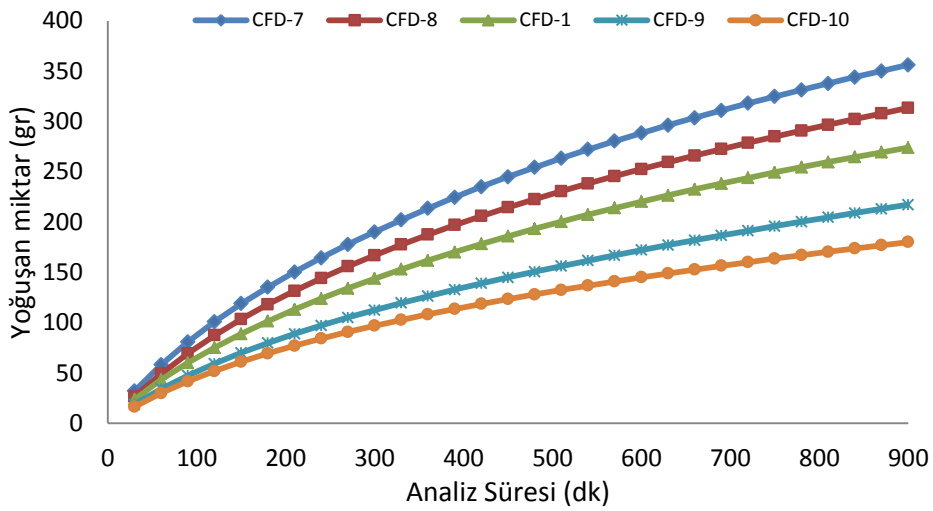
	Toplam Yoğuşan Miktar (g)				Yoğuşma Debisi (kg/s) x10^{-5}			
Analiz Süresi (dk)	**CFD 7**	**CFD 8**	**CFD 9**	**CFD 10**	**CFD 7**	**CFD 8**	**CFD 9**	**CFD 10**
30	31,7	26,2	18,6	16,3	1,76	1,46	1,03	0,90
60	58,0	49,0	34,0	29,8	1,46	1,27	0,86	0,75
90	80,8	69,2	47,3	41,5	1,27	1,12	0,74	0,65
120	100,8	87,3	59,1	51,7	1,11	1,01	0,65	0,57
150	118,8	103,4	69,9	60,9	1,00	0,89	0,60	0,51
180	135,1	118,0	79,6	69,3	0,91	0,81	0,54	0,46
240	164,3	144,0	97,0	84,0	0,78	0,70	0,47	0,39
270	177,6	155,7	104,9	90,6	0,74	0,65	0,44	0,37
300	190,1	166,8	112,4	96,8	0,70	0,62	0,41	0,34
360	213,5	187,4	126,2	108,2	0,63	0,55	0,37	0,31
420	234,9	205,8	138,8	118,5	0,58	0,50	0,34	0,28
480	254,3	222,6	150,6	127,9	0,53	0,46	0,32	0,26
540	272,1	238,2	161,6	136,7	0,48	0,42	0,30	0,24
600	288,4	252,5	172,0	144,9	0,44	0,39	0,28	0,22
660	303,6	266,0	181,8	152,7	0,41	0,37	0,27	0,21
720	318,0	278,7	191,2	160,0	0,39	0,35	0,26	0,20
780	331,3	290,7	200,2	167,0	0,36	0,33	0,25	0,19
840	343,9	302,3	208,8	173,6	0,35	0,32	0,24	0,18
900	356,1	313,4	217,1	180,0	0,33	0,31	0,23	0,18

Şekil 2.23, farklı başlangıç bağıl nem değerleri için zamana bağlı yoğuşma debisinin değişimi görülmektedir. En yüksek yoğuşma akısı başlangıç bağıl nem değerinin en yüksek olduğu CFD-7 sonucunda görülmektedir. Fakat 720. dakikada sonra analizlerde, oda içerisindeki su buharı kütle oranının yakın seviyelere gelmesiyle yoğuşma debileri arasındaki farklar azalmıştır.



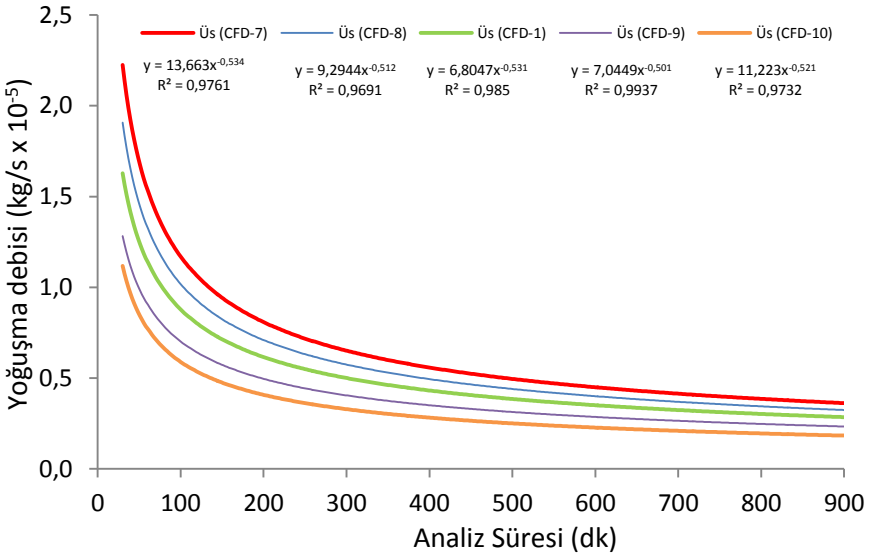
Şekil 2.23 Başlangıç bağıl nem oranına göre zaman bağlı yoğuşma debisi değişimi

Şekil 2.24'de ise farklı başlangıç bağıl nem değerleri için toplam yoğuşma miktarları verilmiştir. Örneğin başlangıç bağıl nem değeri %85 iken iken 900 dakika sonunda toplam yoğuşan su buharı miktarı 356,1 g iken, başlangıç bağıl nem değerinin %65 olduğu durumda yoğuşan miktar % 49 oranında azalarak 180 grama düşmüştür.



Şekil 2.24 Başlangıç bağıl nem oranına göre zaman bağlı yoğuşan miktar değişimi

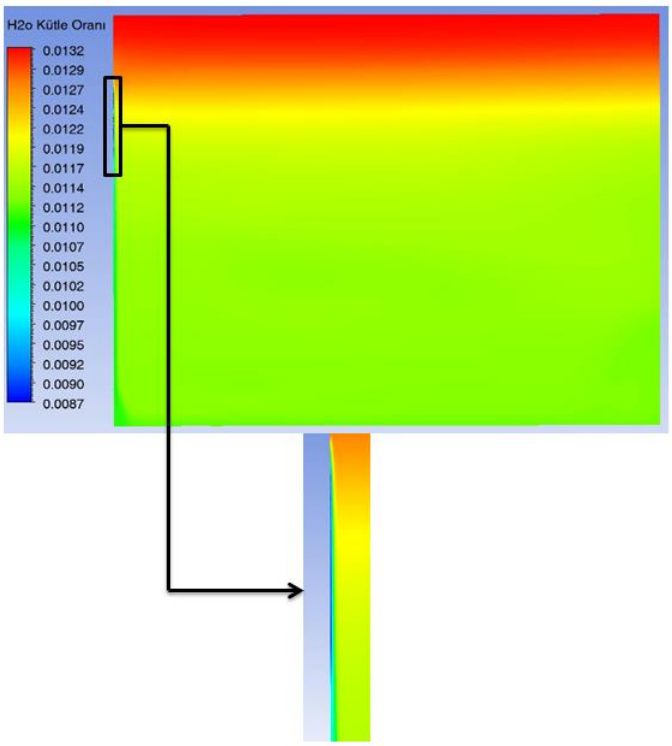
Şekil 2.25'de üstel olarak çizdirilen zamana bağlı yoğuşma debileri verilmiştir.



Şekil 2.25 Farklı bağıl nem değerlerine göre yoğuşma debilerinin değişim eğilimleri

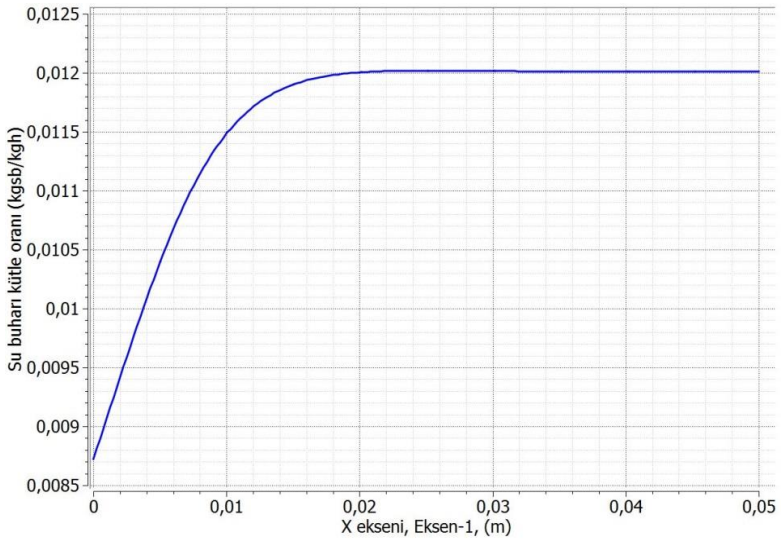
2.4.2 Oda İçerisindeki Su Buharı Kütle Oranı Dağılımı

Şekil 2.26'da mahal içerisindeki su buharı kütle oranı dağılımı görünmektedir. En düşük kütle oranı 0,0087 ile yoğuşturucu yüzeyine en yakın hücrelerde olurken maksimum kütle oranı mahal üst kısımlarına yakın bölgelerde 0,013 olmuştur. Mahal genelinde ise homojene yakın özgül nem dağılımı görünmektedir.

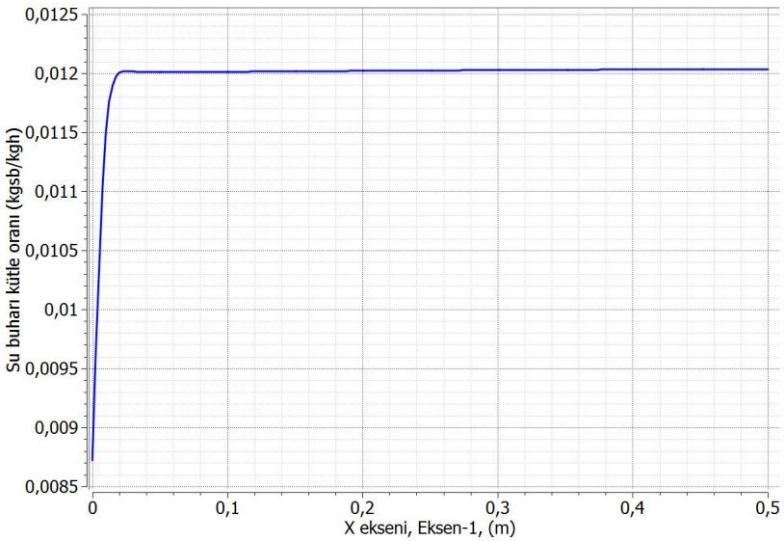


Şekil 2.26 Oda içerisindeki su buharı kütle oranı dağılımı (x-y düzlemi)

Şekil 2.27'de ise model üzerinde tanımlanan Eksen-1 üzerindeki farklı mesafelere göre (0,05m, 0,5m) detaylandırılmış kütle dağılımı görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi duvara yüzeyindeki kütle oranı 0,0087 en düşük değere sahipken, yaklaşık 2 cm uzaklıktan sonra su buharı kütle oranı mahal içerisinde çok fazla değişmemektedir. Bu şekilde bir gradyan oluşmasının sebebi difüzyonla duvar yüzeyine gelen su buharı ve taşınımla ulaşan hava – su buharı gaz karışımı içerisindeki su buharının duvar yüzeyinde yoğuşması ile su buharının gaz karışımındaki kütle oranın azalmasıdır. Ayrıca zamanla yoğuşmayan gazlar yoğuşturucu plakaya yakın bölgelerde birikerek difüzyonu güçleştirmektedir.



(a)



(b)

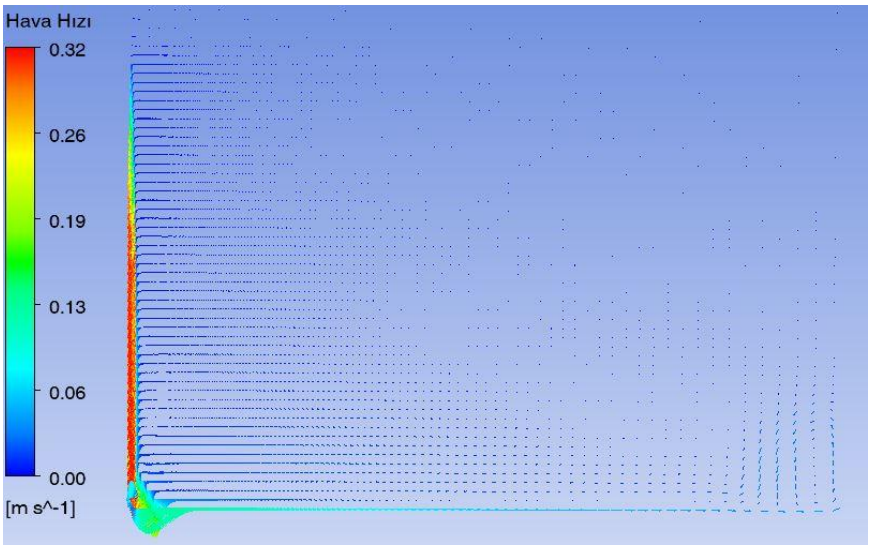
Şekil 2.27 Eksen-1 üzerindeki su buharı kütle oranı dağılımı: a) 0-5 cm, b) 0-50 cm

2.4.3 Mahal İçerisindeki Hava Hızları

Mahal içerisindeki hız dağılımlarına baktığımızda en büyük hız gradyanleri yoğuşturucu plaka alt tarafında duvar yüzeyine yakın bölgelerde oluşmaktadır. Bu durumun nedeni soğuk plaka yüzeyinde soğuyup yoğunluğu azalan hava aşağı inmektedir. Mahal içerisinde ortalama hava hızı 0,05 m/s iken en yüksek hava hızlarının oluştuğu duvar yüzeyinde hava hızları 0,3 m/s'lere kadar çıkmaktadır (Şekil 2.28, Şekil 2.29).



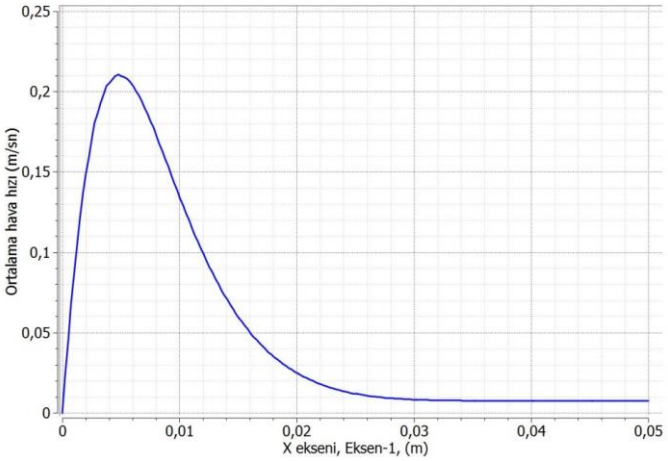
Şekil 2.28 Oda içerisindeki hava hız dağılımı



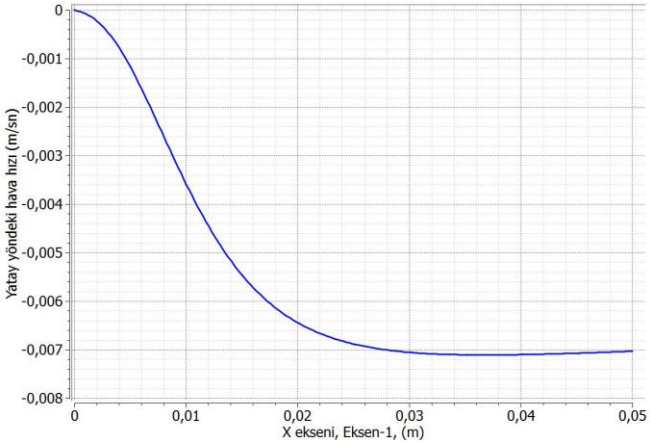
Şekil 2.29 Oda içerisindeki hava hız vektörleri

Şekil 2.30'da ise Eksen-1 üzerindeki hız dağılımları incelenmiştir. Ortalama hava hız değerinin en büyük hız gradyani duvar yüzeyi ile 2 cm uzaklıktaki bölgede oluştuğu görülmektedir. Duvar yüzeyinin kaymama sınır şartı kabulünden dolayı duvar

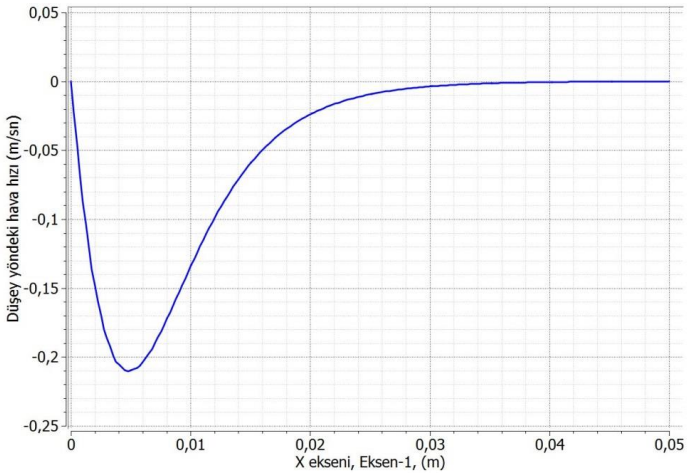
yüzeyinde ortalama hız sıfırdır. Eksen üzerindeki en yüksek hız 0,5 cm uzaklıktaki mesafede oluşmaktadır. Daha hız mahalin orta bölgelerine doğru azalarak 3 cm mesafeden sonra sabitlenmektedir. Hava hızının u komponentine baktığımızda mahal ortalarından duvar yüzeyine doğru azaldığı görülmektedir. Duvar yüzeyine yakın bölgede x yönündeki yönündeki hız değeri (u) 0,001 m/s iken mahalin orta kısımlarına doğru 0,007 m/s'dir. Hızın yoğuşturucu yüzeye dik komponenti olan u değeri, hızın yüzeye dik v değerine göre çok küçük (yaklaşık 10 kat) kalmaktadır. Hava hızının y yönüdeki v komponentinin değişim trendi ise ortalama hız değerinin değişim trendi ile hemen hemen aynıdır.



a)



b)



c)

Şekil 2.30 Hava hız dağılımları a) Ortalama hava hızları b) Yatay yöndeki hava hızları c) Düşey yöndeki hava hızları

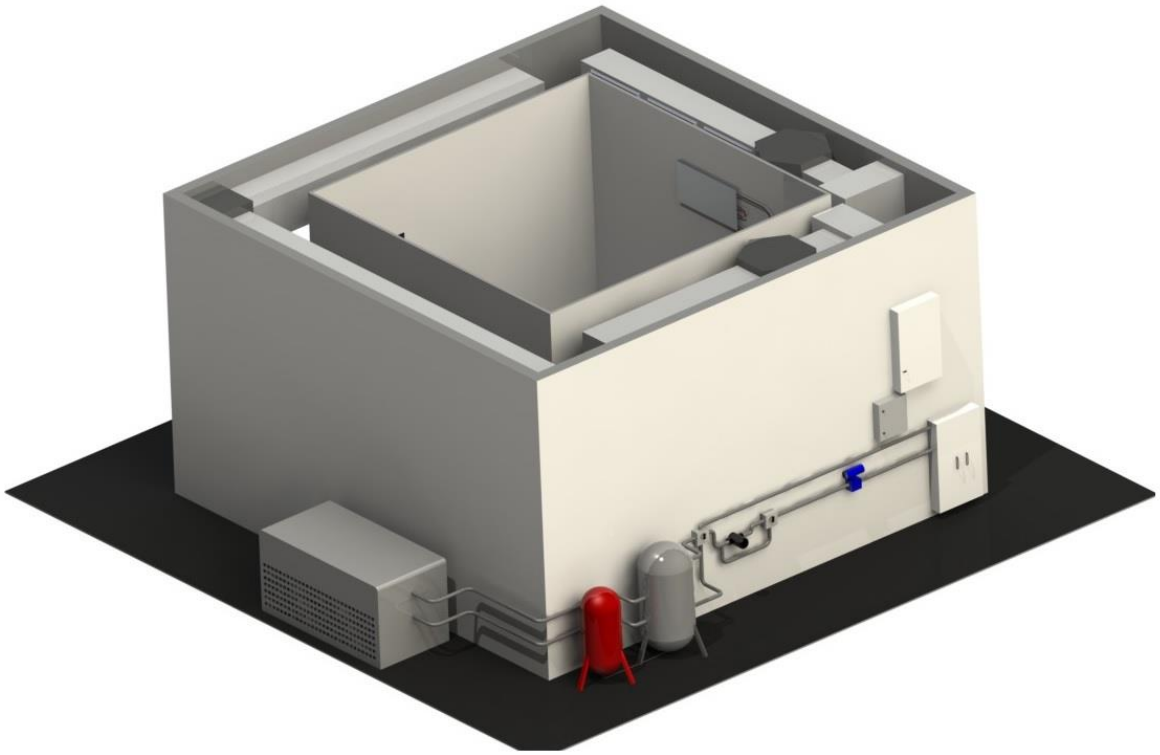
BÖLÜM 3

DENEY SİSTEMİ VE DENEYSEL YÖNTEM

3.1 Deney Odası Tanıtımı

Deneysel çalışmalarda aşağıda detaylı olarak anlatılan ve bu çalışmaya özel tasarlanmış iklimlendirme deney laboratuvarı kullanılmıştır. Deney odası dört hacimden oluşmaktadır. Deney odası deneylerin yapıldığı iç hacim (Hacim-1) ve bu hacmi çevreleyen üç hacimden oluşmaktadır. Bu hacimler deneylerin yapıldığı Hacim-1'in yüzeylerinin istenilen şartlara getirilmesinde kullanılmaktadır. Bunlar; Hacim-1'in duvarlarını çevreleyen ve duvar yüzeylerinin şartlandırıldığı Hacim-2, zemininde bulunan ve taban yüzeyinin şartlandırıldığı hacim-3 ve tavanında bulunan ve tavan yüzeyinin şartlandırıldığı Hacim-4'dür. Çevre hacimler şartlandırılması için birbirinden bağımsız olarak çalışan klima sistemi kullanılmaktadır. Klimalarda şartlandırılan hava hacimlere yerleştirilen havalandırma kanalları ile hacimler içerisinde homojen olarak dağıtılmaktadır. Her bir hacmin sıcaklığı ve nemi bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Ayrıca deneylerin yapıldığı Hacim-1 içerisindeki yoğuşturucu plakaya gönderilen şartlandırılmış suyun sıcaklığının ve debisinin hassas olarak kontrol edildiği su soğutucu ünite, karışım ve tankı ve hidrolik kontrol devresi de yer almaktadır. Hacim-1'in yüzey şartları ve başlangıç hava sıcaklığı çevre hacimlerin şartlandırılması ile oluşturulurken, mahal içerisindeki başlangıç hava nem değeri kontrol sistemine bağlı iç hacimdeki kurutucu ve nemlendirici ile sağlanmaktadır. Deneyler sırasındaki ölçümler için Hacim-1 içerisindeki hava, yüzey, su sıcaklık sensörleri, hava nem sensörleri ile hassas terazi ve termal kamera sistemi bulunmaktadır. Deneyler esnasında hem çevre şartların kontrolü hem de iç hacmin başlangıç şartlarına getirilmesi, deneyler

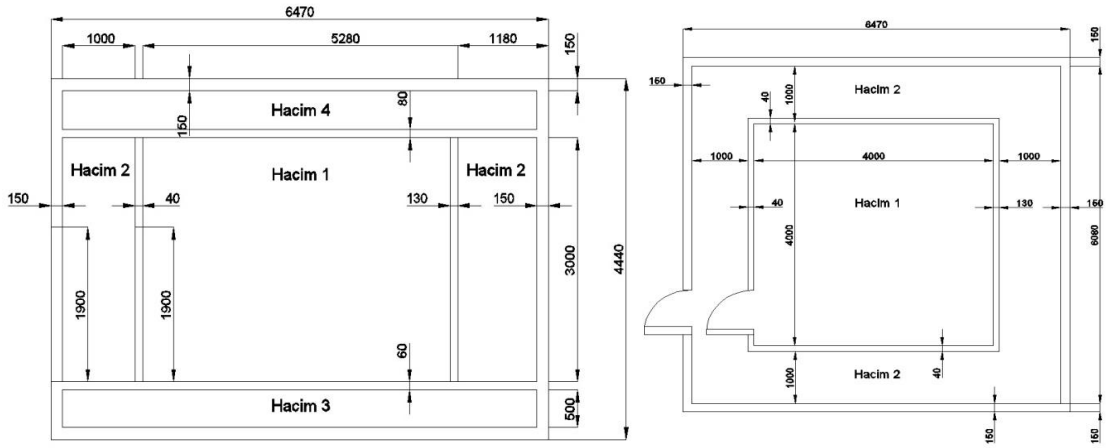
sırasındaki ölçüm ve kontroller deney odası dışından uzaktan takip edilmiştir. Deneylerin yapıldığı deney odanın üç boyutlu tasarımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Deney odasını üç boyutlu şematik görüntüsü

3.1.1 Deney Odası Konstrüksiyonu

Deneylerin yapıldığı iç odanın boyutları 4m x 4m x 3 m ölçülerinde olup, deney odası diğer hacimlerle birlikte 8m x 6.4m x 5.5m ölçülerindedir (Şekil 3.2). Deney odasının duvar yapıları modüler sandviç panellerden oluşmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.2 Deney odasının yandan ve üstten görünümü

Deney odasının dış duvarları 42 kg/m^3 (% +/- 5) yoğunlukta ve DIN 4102 [164]'ye göre B3 sınıfı poliüretan dolgulu, prefabrik panellerden oluşturulmuştur. Panellerinin her iki yüzeyi de 0.5 mm kalınlıkta üzeri polyester esaslı boya ile boyanmış sıcak daldırma galvaniz sac olacak şekilde üretilmiştir. Hacim-1'de kullanılan duvar elemanlarının ısı geçirgenlik katsayısı, ortalama bir binanın ısıl geçirgenlik (U = 0,6W/m^2.K) değerine karşılık gelecek bir değere sahiptir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Dış hacimlerde kullanılan prefabrik paneller

3.1.2 Çevre Hacimler

Çevre hacimler, deneylerin yapıldığı ana hacmin yüzeylerinin şartlandırılmasında amacıyla oluşturulmuştur.

3.1.2.1 Hacim-2

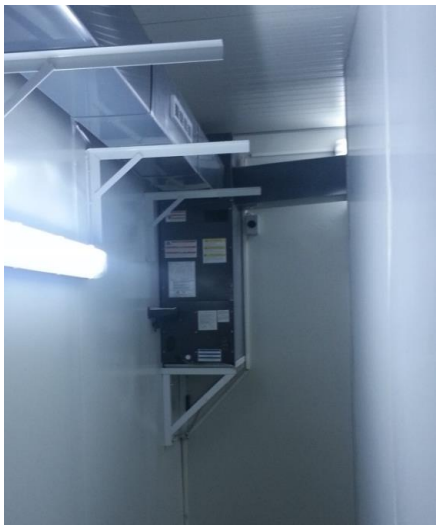
Hacim-2 deneylerin yapıldığı hacmin duvar yüzeylerini çevreleyen hacimdir. Bu hacimde hava sıcaklığı 0,5 °C hassasiyetle -10/40 °C aralığında kontrol edilebilmektedir. Ortam sıcaklığı hacim içerisindeki iklimlendirme cihazı ve önündeki fan ile bağlı oldukları kanallardaki menfezler vasıtasıyla kontrol edilir. Şartlandırılan hacim iki farklı L şeklinde hacimlerden oluşmaktadır. Homojen sıcaklık ve nem dağılımı sağlamak için bu iki hacim iki ayrı klima tarafından şartlandırılmaktadır.

Nem kontrolü klima cihazlarının önüne konulan nemlendirme cihazları ve hacim içerisindeki bir adet mekanik, bir adet adsorbsiyonlu kurutma cihazı tarafından yapılır. Klimalarda istenilen koşullarda şartlandırılan hava, nemlendirme cihazlarından geçirilerek, istenilen sıcaklık ve bağıl nem değerlerinde hava kanallarının

menfezlerinden üflenir. Bu şekilde bağıl nem %10-90 aralığında %2 hassasiyetle kontrol edilebilmektedir.

Şekil 3.4'de iklimlendirme cihazı, Şekil 3.5'de kurutucu ve nemlendirici cihazlar görülmektedir.





(a) (b)

Şekil 3.4 Hacim-2' deki (a) iklimlendirme cihazı (b) iklimlendirme cihazı ve kanalların görünümü





(a) (b)

Şekil 3.5 Hacim-2' deki (a) kurutucular (b) nemlendirici ünite

3.1.2.2 Hacim-3

Bu hacim Hacim-1'in zeminin altında kalan hacimdir. Bu hacmin şartlandırılmasıyla istenilen zemin yüzey sıcaklığı elde edildi. Bu hacim çelik kafesler ile oluşturulmuştur (Şekil 3.6). Bu hacimde nem kontrolü yapılmamaktadır, sadece -10/40°C arasında

sıcaklık kontrolü yapılabilinmektedir. Bu hacmin iklimlendirilmesi klima ve kafesler arasına yerleştirilen havalandırma kanalları ile sağlanmaktadır. Kanal üzerinde her bir kafes aralığına denk gelecek şekilde konumlandırılan menfezler ile tüm hacimler homojen sıcaklık dağılımı elde edilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.6 Hacim-3' de kullanılan çelik kafesler



Şekil 3.7 Hacim-3' de kullanılan klima

3.1.2.3 Hacim-4

Hacim-4 deneylerin yapıldığı Hacim-1'in üst hacmini oluşturmaktadır. Mahaldeki tavan sıcaklık sınır şartları bu hacmin şartlandırılmasıyla oluşturulur. Bu hacmin sıcaklığı diğer hacimlerde olduğu gibi -10/+40 °C aralığında 0,5 °C hassasiyetle kontrol edilebilmektedir. Ortam sıcaklığı hacim içerisindeki iklimlendirme cihazı ve önündeki üç fan ile bağlı oldukları kanallardaki menfezler vasıtasıyla kontrol edilir. Bu hacminde ısıtma; fanların önüne yerleştirilen rezistanslar sayesinde sağlanır. Şekil 3.8'de klimanın görüntüsü, ısıtma yapılan rezistanslar ve önündeki fanlar görülmektedir. Şekil 3.9'da klimanın montajı ve fanlara bağlı olan alüminyum kompozit hava kanallarından biri görülmektedir. Bu hacim ve diğer hacimlerde kullanılan klimaların dış üniteleri ise şekil 3.10'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Hacim-3’ de kullanılan klima





(a) (b)

Şekil 3.9 a) Klima cihazı montajı, b) Havalandırma kanalı

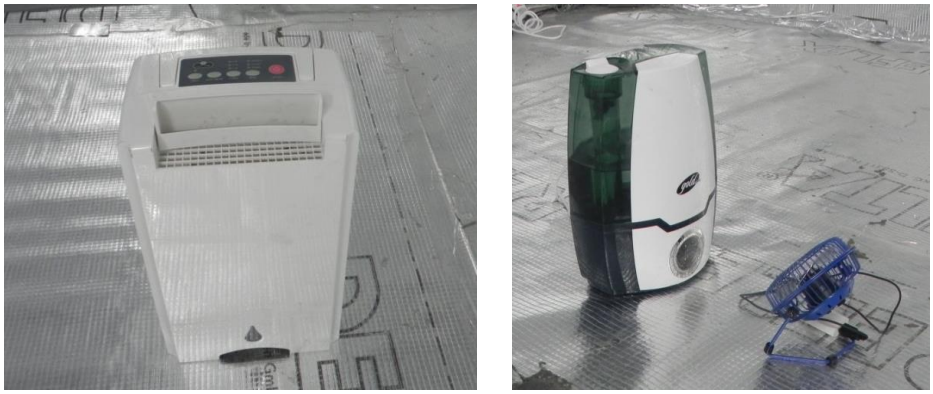


Şekil 3.10 Hacimlerde kullanılan klimaların dış üniteleri

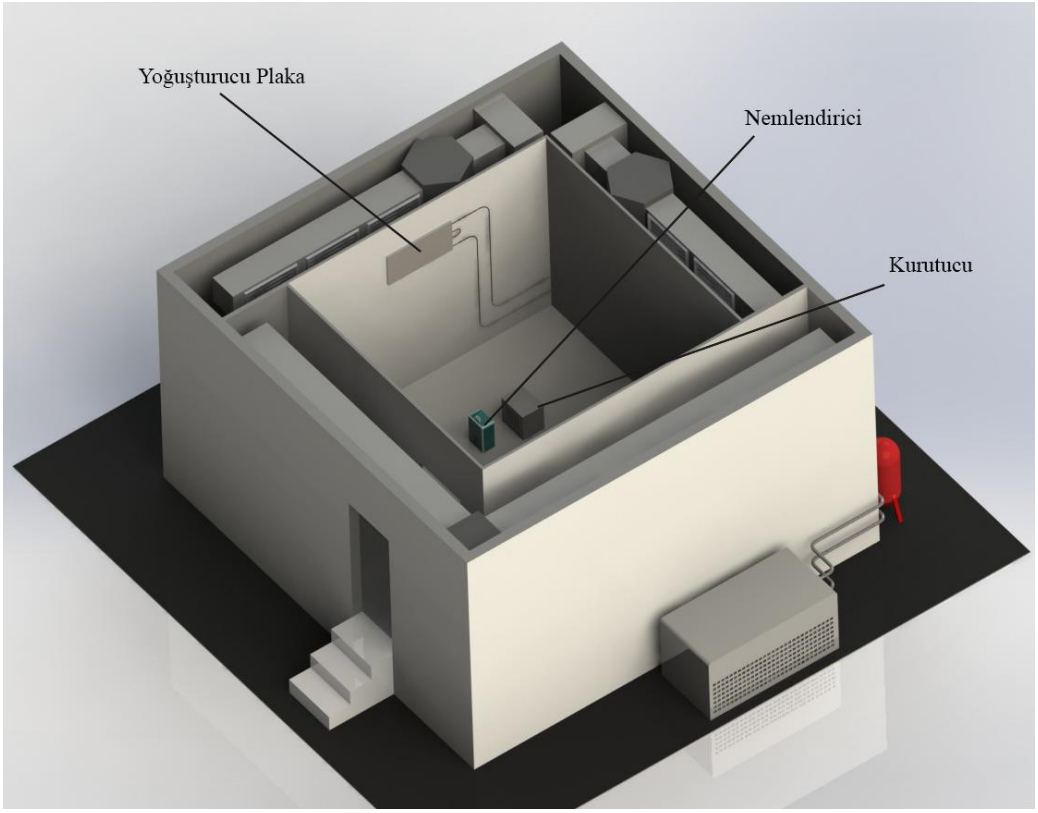
3.1.3 Deneylerin Yapıldığı Hacim (Hacim-1)

Yapılan yoğuşma deneyleri bu hacim içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu hacmin tüm yüzeyleri ve iç hava sıcaklığı çevre hacimler tarafından şartlandırılarak başlangıç koşuluna getirilmekte ve deneyler sırasında kontrol edilmektedir. Ayrıca tüm yüzeyler Reflex marka buhar bariyeri ile kaplanmıştır. Kullanılan bariyer iki tarafı polyester film ile kaplı alüminyum malzemeden oluşmaktadır. Kullanılan malzemenin su buharı bariyer özelliklerinin tanımlandığı DIN 4108 [165] sertifikası mevcuttur. Deney odası içerisinde havanın başlangıç koşullarını getirilmesi için bir adet ev tipi nemlendirici ve bir adet kurutucu kullanılmıştır. Bu cihazlardan nemlendirici ve kurutucu bağlı olduğu prizden PXI’dan otomatik olarak kontrol edilmektedir. Nemlendirme prosesi için ev tipi

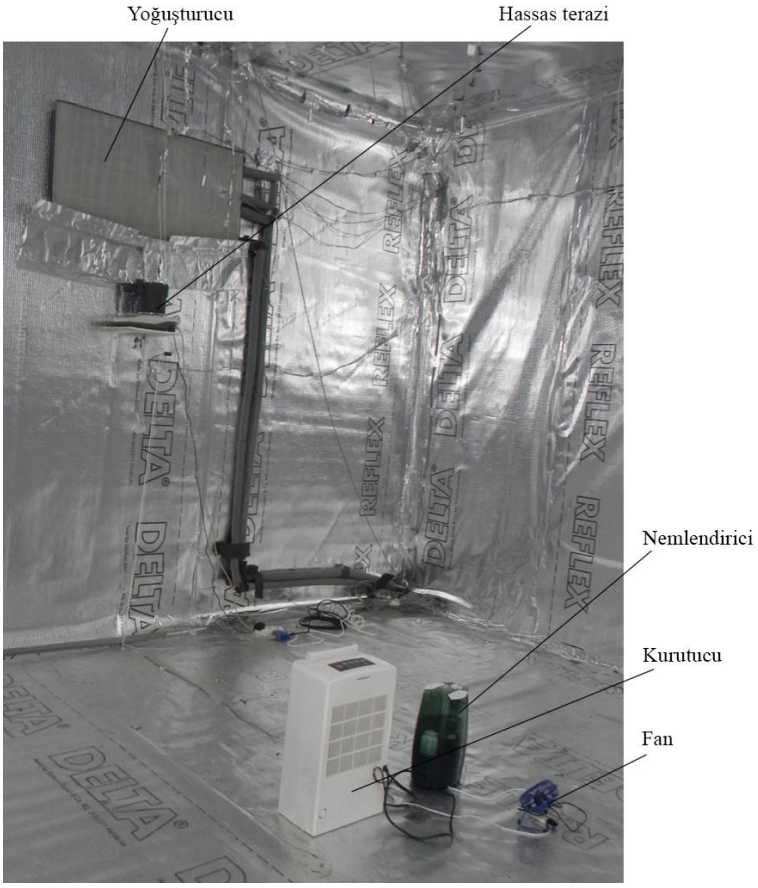
25 W ve 2 lt kapasiteli adyabatik ultrasonik nemlendirici kullanılırken nem alma için 250 W ve 6,5 lt/gün kapasiteli mekanik nem alma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.11). Mahal içerisinde üretilen nemin hacim içerisinde homojen dağılmasını sağlamak amacıyla nemlendirici önüne küçük bir fan konumlandırılmıştır. İç hacmin temsili görünümü Şekil 3.12'de ve deneyler öncesindeki oda içerisindeki nihai düzenleme Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Mekanik Kurutucu ve ultrasonik nemlendirici



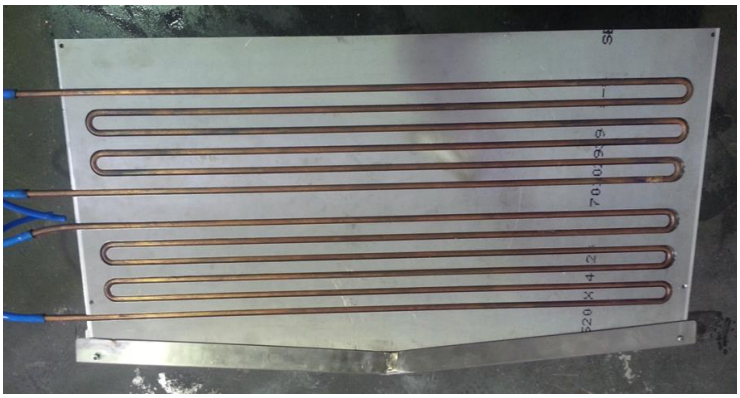
Şekil 3.12 Hacim-1 üç boyutlu görünümü



Şekil 3.13 Hacim-1 içerisindeki deney ekipmanları

3.1.4 Yoğuşturucu Plaka (Hibrid Panel)

Yoğuşmanın gerçekleşeceği yoğuşturucu plaka bakır boru ve alüminyum malzemeden oluşmaktadır. 12 mm çapındaki bakır borular, 15 mm kalınlığındaki alüminyum plaka içerisinde açılan kanallara yerleştirilmiştir (Şekil 3.14). Plakada alüminyum blok kullanılması sayesinde plakaya gönderilen suyun sıcaklığının değişiminden yoğuşturucu plakanının yüzeyi çok etkilenmemiş ve sabit yüzey sıcaklığı elde edilmiştir. Yoğuşturucunun arka ve yan tarafları iyi bir şekilde yalıtılmıştır. Plakanın arka tarafında 0,035 W/m.K ısı iletim katsayısına sahip 2 cm EPS malzeme, yan yüzeylerde ise 0,5 cm kalınlıkta yalıtım bantı kullanılmıştır. Yoğuşturucu 1 m genişliğinde, 0,5 m yüksekliğinde ve 35 mm kalınlığındadır (Şekil 3.15). Yoğuşturucu plaka ve yoğuşan suyun geçtiği her yüzey hidrofobik malzeme ile kaplanmış, bu sayede yüzeylerde film şeklinde sıvı film kalmasının önüne geçilmiştir.

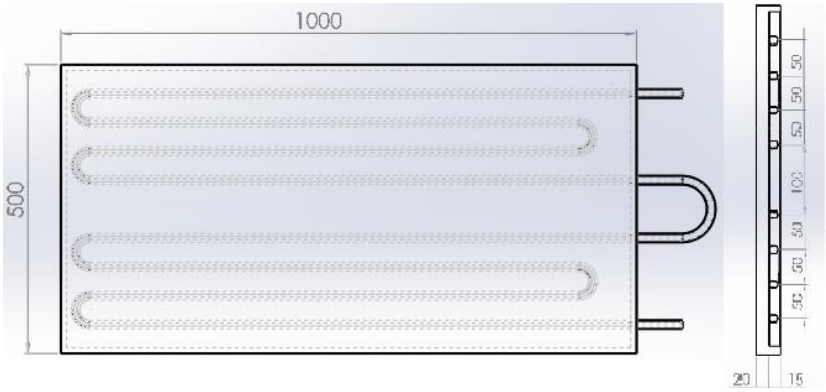


(a)



(b)

Şekil 3.14 Yoğuşturucu plaka a) bakır borular b) ön yüzey



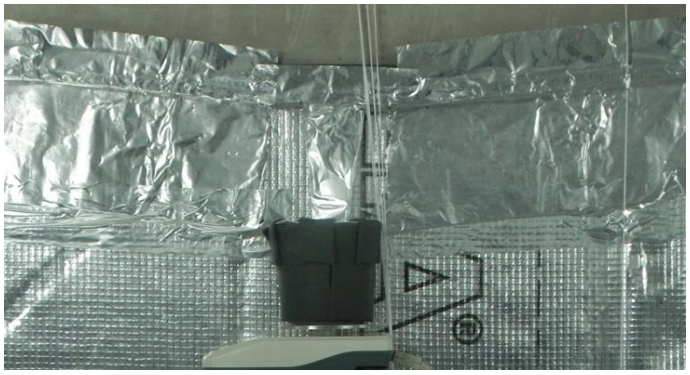
Şekil 3.15 Yoğuşturucu plaka ölçüleri

Yoğuşturucu plaka odanın batı yönündeki duvara yatayla ortada olacak şekilde, düşeyde yerden 2 m yüksekliğe ve yoğuşmanın gerçekleşeceği ön yüzeyi oda içerisine bakacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.16). Yoğuşturucu plakanın alt kısmında ise yoğuşan suyun toplandığı yoğuşma kanalları yer almaktadır. Yoğuşma kanalları plaka yüzeyinde yoğuşan suyun toplanarak hassas terazi üzerindeki ölçüm kabına gönderilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.16 Yoğuşturucu plakanın duvardaki konumu

Yoğuşan suyun toplandığı kabın çevresi tamamıyla izole edilmiştir. Ayrıca kabın içerisindeki suyun buharlaşmasının engellenmesi adına kabın çevresinde iyi bir sızdırmazlık sağlanmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Yoğuşma toplama kabı

Plakanın üst yüzeylerinde yoğuşan suyun kanal dışına damlamasını engellemek ve yoğuşan tüm suyun toplanmasını sağlamak amacıyla toplama kanallarının yüzeyinden plakaya paralel olacak şekilde alüminyum folyodan yaklaşık 5 cm yüksekliğinde bir alın oluşturulmuştur. Bu alının plaka yüzeyinden mesafesi ise hava akışını çok bozmayacak şekilde minimum (5 mm-10 mm) tutulmaya çalışılmıştır. Bu alın, plaka yüzeyinden belli bir açıda genişleyeceği şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.18).



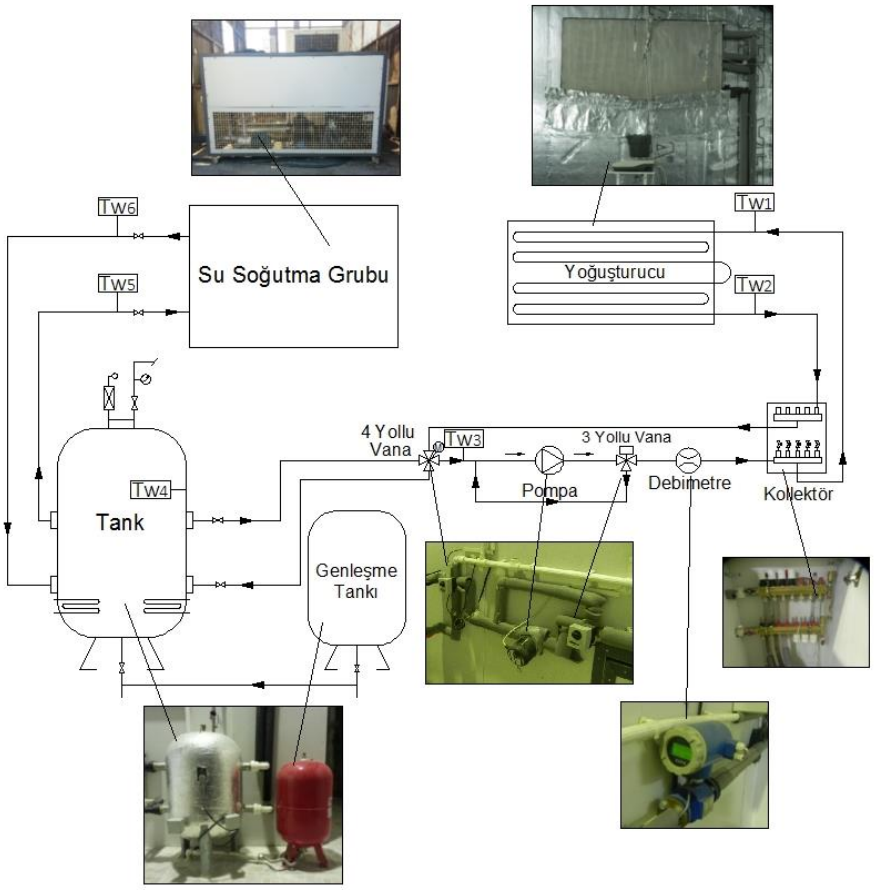
Şekil 3.18 Yoğuşan suyu toplandığı alın

Yoğuşturucu plakanın montajının tamamlanmasından sonra plaka yüzeyine yüksek miktarda su verilmesiyle sızdırma deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda sistemde herhangi bir sızdırmaya veya suyun kanal dışına damlamasına bağlı her hangi bir kayıp olduğu görülmemiştir.

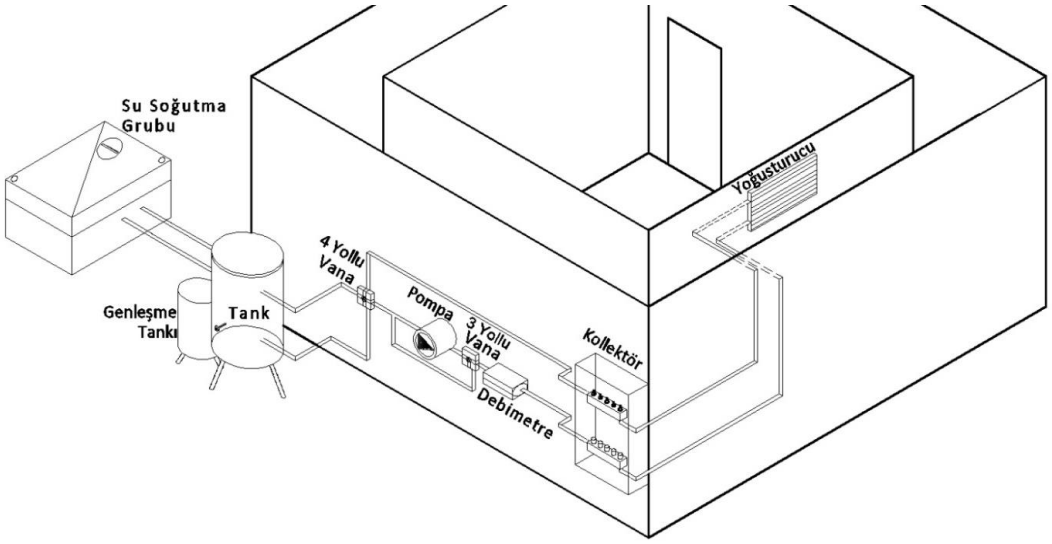
3.1.5 Su Şartlandırma Sistemi

Yoğuşturucu plakaya gönderilen suyun şartlandırıldığı sıcaklığının ve debisinin ayarlandığı ve kontrol edildiği su şartlandırma ve kontrol sistemi kullanılmıştır. Su şartlandırma sistemi sırasıyla su soğutma grubu, karıştırıcı tank ve içerisinde yer alan ısıtıcı rezistans, genleşme tankı, su sıcaklığının ayarlandığı 4 yollu vana, su debisinin ayarlandığı üç yollu vana, ultrasonik debimetre, kolektör ve yoğuşturucu plakadan oluşmaktadır. Ayrıca hidrolik sistem üzerinde yoğuşturucu plakaya giriş (T_{w1}) – çıkış (T_{w2}) noktalarından, 4 yollu vananın çıkışından (T_{w3}), karışım tankı içerisinden (T_{w4}) ve çiller giriş (T_{w5}) – çıkışından (T_{w6}) sıcaklık ölçümünün yapıldığı su sıcaklık sensörleri bulunmaktadır.

Su şartlandırma sisteminin şematik görünümü Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Hidrolik sistemin iki boyutlu şematiği



Şekil 3.20 Hidrolik sistemin üç boyutlu şematiği

Şekil 3.21'den de görüldüğü gibi, karışım tankı içerisinde belli sıcaklıklarda şartlandırılmış su tutulmaktadır. Buradaki suyun sıcaklığı istenilen şartlarda ayar edilebilmektedir. Soğutma durumunda tank istenilen sıcaklıkta 24 kW kapasiteli soğutma grubundan (Şekil 3.22) su beslenmektedir. Isıtma durumunda ise tankın

içerisinde bulunan rezistansların ısıtılmasıyla sıcak su elde edilir. Daha hassas sıcaklık kontrolü için tanktan gönderilen su önce dört yollu vanaya gelir (Şekil 3.23). Burada, gidiş hattı ile dönüş hattı arasında dört yollu vana sayesinde bir karışım sağlanır. Karışan suyun sıcaklığı plakaya gönderilecek su sıcaklığına göre ayarlanır. Tesisat yalıtımlı olmasına rağmen hattaki ısı kazançları dikkate alınarak belirlenen plaka giriş sıcaklığının 0,5 - 1 °C altında su gönderilir. Karışım tankından yoğuşma plakasına kadarki tüm hat ısı kazancı ve yoğuşma riskine karşı yalıtılmıştır.



Şekil 3.21 Genleşme tankı ve karıştırıcı tank



Şekil 3.22 Paket tipi su soğutma grubu



Şekil 3.23 Tank çıkışından sonraki dört yollu vana

Tesisatta kullanılan pompa Halm marka olup 3 kademeli bir pompadır. 3. Kademedeki maksimum kapasitesi 357 W' tır. Su, pompadan sonra üç yollu vanaya gelir (Şekil 3.24). Kullanılan üç ve dört yollu vanalar Wita marka servo motorlu 90^{o} dönebilen SM4 modeldir. Üç yollu vananın amacı, ihtiyaç duyulan debiden daha yüksek bir debiyle su gönderildiğinde akışkanın bir kısmını, debiye istenilen seviyeye getirecek şekilde pompadan önceki hatta geri göndermektir. Böylelikle hem sisteme istenilen debide su girişi olur, hem de pompadan önceki hatta akışkan gönderilerek, şartlandırılmış akışkanın tanktan gelen akışkanla karışımı sağlanır. Üç yollu vanadan sonra su, elektromanyetik bir debimetreden geçer ve burada %1 hassasiyette debi kontrolü yapılır (Şekil 3.25). Debimetreden sonra su kolektöre girer. Kullanılan kolektörler Danfoss marka olup 6 ağızlıdır (Şekil 3.26). Kolektörlerde uzaktan kontrolünü sağlayabilmek amacıyla motorlu vanalar kullanılmıştır. Deney mahalinde başlangıç şartlarının sağlanmasından sonra bu vana aktive edilerek plakaya su verilir.



Şekil 3.24 Tesisattaki sirkülasyon Pompası ve üç yollu Vana



(a)



(b)

Şekil 3.25 Tesisattaki elektromanyetik debimetre

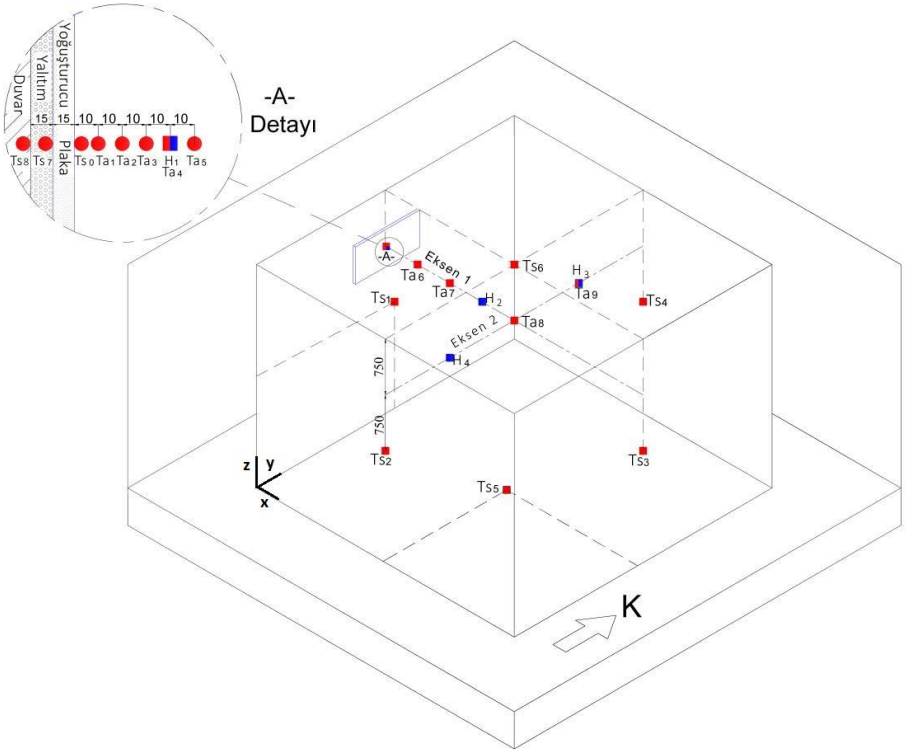


Şekil 3.26 Tesisattaki gidiş ve dönüş kolektörü

3.1.6 Deney Odası Ölçüm Sistemi

Deney odasını çevreleyen hacimlerde sıcaklık ve nem kontrolü için klimaların hava emiş noktasından sıcaklık ve nem değerleri tek bir noktadan okunmaktadır. Deneylerin yapıldığı Hacim-1 içerisinde ise farklı noktalardan hava sıcaklığı (T_a) ve bağıl nem değeri (H), yüzeylerin sıcaklıkları (T_s), yoğuşturucu plaka giriş ve çıkış sıcaklıkları (T_w) ve yoğuşan su buharı miktarı anlık olarak ölçüldü ve veriler kaydedildi. Mahal içerisinde toplamda eksen-1 ve eksen 2 üzerinde 9 noktadan hava sıcaklığı ve 4 noktadan hava bağış nem değeri ölçülmektedir. Ayrıca 9 farklı noktadan yüzey sıcaklığı ölçülmektedir. 6 adet sıcaklık sensörü yoğuşturucuya dik düzlem olan x ekseni üzerindeki sıcaklık dağılımının görülmesi amacıyla tanımlanan Eksen-1 üzerine belli aralıklarla konumlandırılmıştır. İki adet sıcaklık sensörü de mahalin tam ortasından z düzlemindeki Eksen-2 üzerine konumlandırılmıştır. Nem sensörleri ise iki tanesi eksen-1 ve iki tanesi Eksen-2 üzerine konumlandırılmıştır. Yüzey sıcaklık sensörleri mahal içerisindeki 6 yüzeye, yoğuşturucu plakaya ve plaka arka yüzeye ile oda duvarının arka yüzeyine konumlandırılmıştır.

Şekil 3.27 mahal içerisindeki sıcaklık ve nem ölçüm sensörlerinin konumları ve Çizelge 3.1'de de koordinatları verilmiştir. Burada kullanılan tüm sıcaklık ve nem sensörlerinin kalibrasyonu yapılmıştır ve bulguları Bölüm 3.2'de verilmiştir. Sıcaklık sensörlerinin kalibrasyon eğrilerinde (R^2> 0,999) değeri yakalanmış ve ölçüm hassasiyetlerinin ±0,1°C olduğu görülmüştür.



Şekil 3.27 Mahal içerisindeki sıcaklık ve nem sensör dizilimleri

Çizelge 3.1 Sıcaklık ve nem sensörlerinin konumları

Sensor	x-axis	y-axis	z-axis
T_{a1}	1	225	200
T_{a2}	2	225	200
T_{a3}	3	225	200
T_{a4}	4	225	200
T_{a5}	5	225	200
T_{a6}	50	225	200
T_{a7}	100	225	200
T_{a8}	200	225	200
T_{a9}	200	225	250
H_1	5	250	200
H_2	150	250	200
H_3	200	250	100
H_4	200	250	200

3.1.6.1 Hava Sıcaklık Sensörleri

Yukarıda konumları detaylı olarak belirtilen hava sıcaklık sensörü olarak K tipi ısıl çiftler kullanılmıştır. Isıl çiftler, iki farklı alaşım veya metalin uçlarının kaynatılması ile oluşan bir sıcaklık ölçü elemanıdır. Kaynak noktası sıcak nokta, diğer iki uç ise soğuk noktadır. Sıcak nokta ısıtıldığında, soğuk nokta ile arasında sıcaklık farkından dolayı bir gerilim

oluşur. Oluşan bu gerilim mV mertebesindedir. Sıcaklık ölçümü, oluşan bu mV değerinden yararlanılarak ölçülür. K tipi ısıl çiftlerde pozitif uç kromal ve alümel uç ise konstantandır. Kullanılan ısıl çiftin çevresi alüminyumdan ışınım bariyeri ile kaplanmıştır. Bariyerin altından ve üstünden hava akışı oluşabilmesi için boşluklar bırakılmıştır (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Hava sıcaklık sensörü

Hava sıcaklık sensörlerinden 5 tanesi yoğuşturucu yüzey yakınlarındaki sıcaklık gradyanlerinin yakalanabilmesi için, yüzeyden 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm ve 5 cm mesafelere konumlandırılmıştır. Konumlandırılan bu sensörlerin şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29 Yoğuşturucu plaka yüzeyine yakın konumlandırılan ısıl çiftler (T_{a1}-T_{a5})

3.1.6.2 Yüzey Sıcaklık Sensörü

Yukarıda belirtildiği gibi mahal içerisindeki tüm yüzeylerden (T_{s1} - T_{s6}), yoğuşturucu plakadan (T_{s0}) , plakanın arka yüzeyindeki yalıtım üzerinden (T_{s7}) ve oda duvarının dış yüzeyinden (T_{s8}) yüzey sıcaklık ölçümü yapılmaktadır. Yüzeylerden sıcaklık tek

noktadan ve yüzeylerin ortasından yapılmaktadır. Yüzey sıcaklık ölçümünde kalibre edilmiş K tipi ısıl çiftler kullanılmaktadır. Isıl çiftlerin yüzeye yapıştırılmasından sonra üzeri yalıtılmıştır. Isıl çiftlerin yüzeye tam temas ettiği ve hava sıcaklığından izole edildiğinden emin olunmuştur (Şekil 3.30, Şekil 3.31).



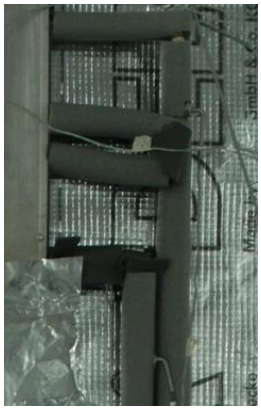
Şekil 3.30 Yoğuşturucu plaka yüzeyine konumlandırılan ısıl çift (T_{a0})



Şekil 3.31 Soğutulmayan duvarlara konumlandırılan ısıl çift (T_{s1} - T_{s6})

3.1.6.3 Su Sıcaklık Ölçüm Sensörleri

Yoğuşturucu plakanın gidiş (T_{w1}) ve dönüş (T_{w1}) hatlarından su sıcaklıkları ölçülmüştür. Bu ölçümlerde kalibre edilmiş vidalı tip NTC sensörler kullanılmıştır. Şekil 3.32'de hidrolik devreye konumlandırılan su sıcaklık sensörleri görülmektedir.

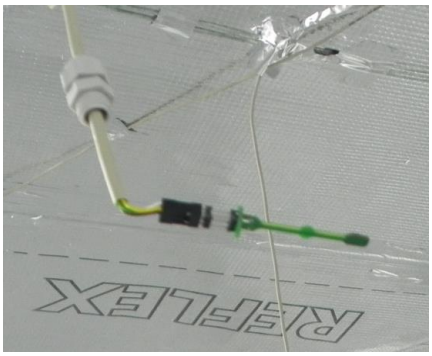


Şekil 3.32 Yoğuşturucu plaka gidiş ve dönüş hattı su sıcaklık sensörleri (T_{w1} – T_{w2})

3.1.6.4 Hava Bağıl Nem Ölçüm Sensörü

Oda içerisinde 4 farklı noktadan nem ölçümü yapılmaktadır. Nem ölçümlerinde kalibre edilmiş, TEKON marka HT15 model sıcaklık-nem transmitteri kullanıştır. ±0,3 °C doğrulukta sıcaklık ölçümü, ± %1,5 doğrulukta bağıl nem ölçümü yapabilmektedir. Sensörün tekrarlanabilirliği ise sıcaklık ölçümünde ±0,1 °C bağıl nem ölçümünde ± %0,1'dir.

Deneyde kullanılan nem sensörleri kapasitif olarak çalışmaktadır. Kapasitif sensörler, RC (Resistor-Capacitor) osilatörü ile bir kapasitif alan oluşturmaktadırlar, bu RC osilatörü havayı dielektrik madde kabul etmekte ve üzerindeki nem yoğunluğu değiştikçe kapasite değeri ve dolayısıyla direnç değeri değişmektedir. Şekil 3.33'de oda içerisinde kullanılan bağıl nem transmitteri gösterilmiştir.





Şekil 3.33 Nem ölçümlerinde kullanılan bağıl nem transmitteri

3.1.6.5 Hassas Terazi

Yoğuşturucu plaka üzerinde yoğuşan su anlık olarak hassas terazi ile tartılmaktadır. Bu ölçümlerde Kern marka PFB 600/2 model, ±0,01 g hassasiyetle 600 g'a kadar ölçüm

yapabilen hassas terazi kullanılmıştır. Ölçümler uzaktan bilgisayar üzerinden yapılmış ve 1 dakikada bir alınan ölçüm verileri kaydedilmiştir. Şekil 3.34'de deney odasında kullanılan hassas terazi görülmektedir.



Şekil 3.34 Hassas terazi

3.1.6.6 Termal Kamera

Oda içerisindeki yüzeylerin tamamının sıcaklığını genel olarak görüntülemek için, oda içerisine bir termal kamera yerleştirilmiştir. Termal kamera, deneysel yöntem bölümünde detaylı olarak anlatıldığı gibi tüm yüzey sıcaklıklarının homojen ve eşit olmasının kontrolünde birçok sıcaklık sensörü ya da ısıl çift kullanmaya alternatif çözüm olarak kullanılmıştır. Böylece yapılan ölçümlerde pratiklik ve kolaylık sağlanarak kullanılacak yüzey sıcaklık sensör sayısı azaltılabilmiştir.

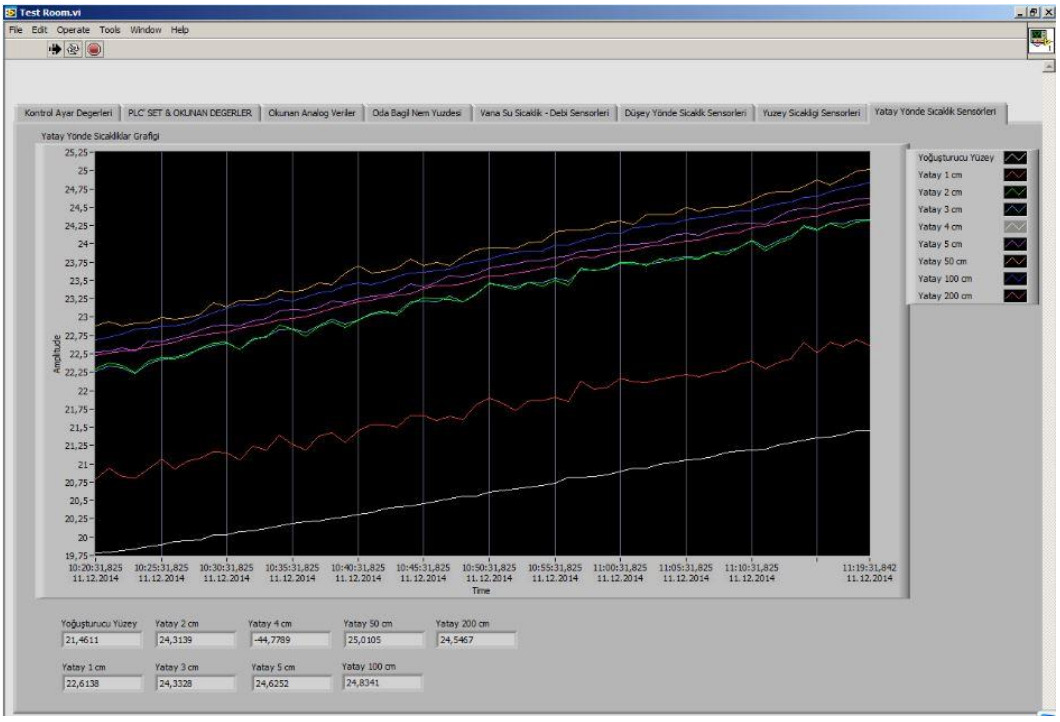
Termal kamera olarak ± %2 hassasiyette ölçüm yapabilen Optris marka PI 160 model termal kamera kullanılmıştır. Kameranın gösterdiği sıcaklık dağılımları sayesinde, yüzey sıcaklıkları arasındaki benzerlikler ve ya farklılıklar incelenebilmekte ve herhangi bir sorun olduğunda hangi bölgeye müdahale edileceği kolaylıkla belirlenebilmektedir. Deneysel sırasında ara-ara yapılan ölçümlerde yüzeylerin homojen sıcaklık dağılımına sahip oldukları tespit edilmiştir (Şekil 3.35).

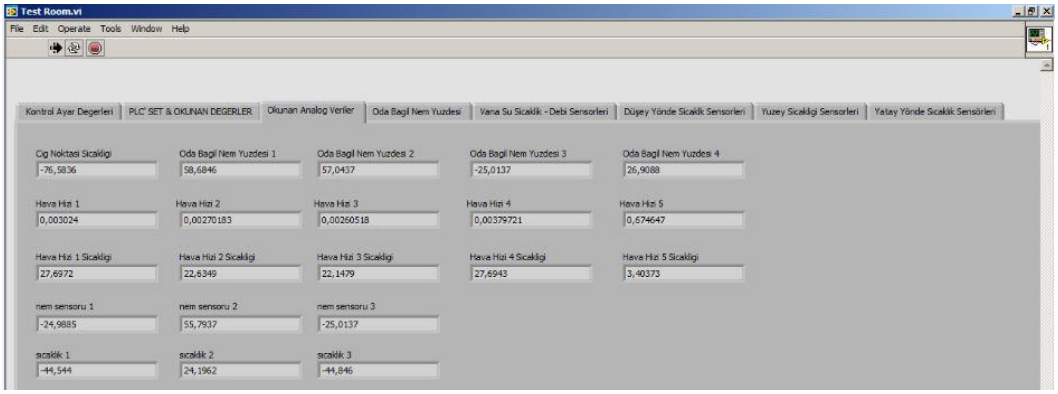


Şekil 3.35 Termal kamera

3.1.7 Veri toplama ve kontrol sistemleri

Çevre hacimlerdeki sıcaklık nem kontrolü ve hidrolik sistemdeki su sıcaklık ve debilerinin kontrolü PLC sistemi ile yapılmaktadır. Deneylerin yapıldığı Hacim-1'den alınan ölçümlerin işlenmesi ve kaydedilmesi ise National Instrument firmasının veri işleme ve toplama cihazı olan PXI sistemiyle yapılmıştır. PLC sistem ise PXI sisteminin haberleşmesinin sağlanmasıyla çevre hacimler ve hidrolik sistemin kontrolü ve iç hacimlerdeki ölçümler PXI sistemiyle yürütülmüştür. Tüm sensörlerden her 1 dakikada bir ölçümler alınmış ve kaydedilmiştir. PXI yazılımı üzerine tanımlanan grafikler ile de deney odasındaki ölçümler grafik haline getirilip anlık olarak bulguların değişimi izlenmiştir (Şekil 3.36).

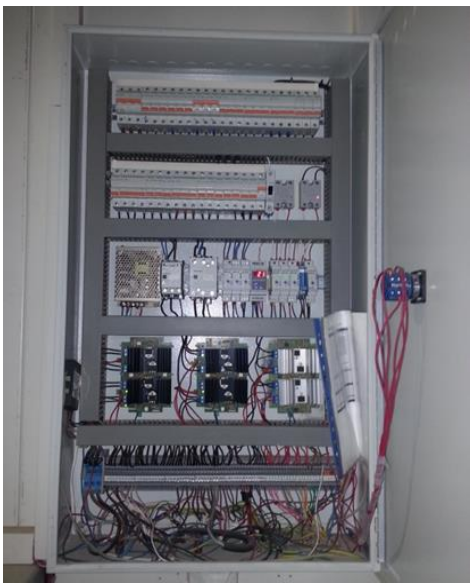




Şekil 3.36 Termal kamera

3.1.7.1 PLC Kontrol Sistemi

Deneylerin yapıldığı Hacim-1'i çevreleyen hacimlerin sıcaklık ve nem kontrolü PLC kontrol sistemiyle yapılmaktadır. Ayrıca hidrolik sistemde karışım tankı içerisindeki suyun istenilen şartlara getirilmesi, plakaya gönderilen suyun 4 yollu vana ile istenilen sıcaklığa getirilmesi, akabinde 3 yollu vananın kontrolü ile istenilen debiye getirilmesi yine PLC sistemiyle yapılmaktadır. PLC kontrol sistemi elektrik kontrol panosuna bağlı olarak çalışmaktadır. Elektrik kontrol panosu, deney odasının ihtiyacı olan tüm elektrik ve kontrol ünitelerinin bağlı olduğu panodur. Her bir hacmi şartlandıracak cihazların, hacimlerdeki elektrik ihtiyacının, hacimlerde bulunan ve güç ihtiyacını karşılaması düşünülen prizlerin, kontrol sistemini oluşturan PXI cihazının ve PLC cihazının tüm gücü bu panodan sağlanmaktadır (Şekil3.37).



Şekil 3.37 Elektrik panosu

PLC sisteminde kontrol algoritması olarak PLD kontrol algoritması kullanılmıştır.

3.1.7.2 PLD Kontrol Algoritması

Çevre hacimleri ısıtmak ve ya soğutmak için ayrı ayrı ekipmanlar kullanılmıştır. Bu ekipmanların kontrolü PLD algoritması kullanılarak yapılmıştır.

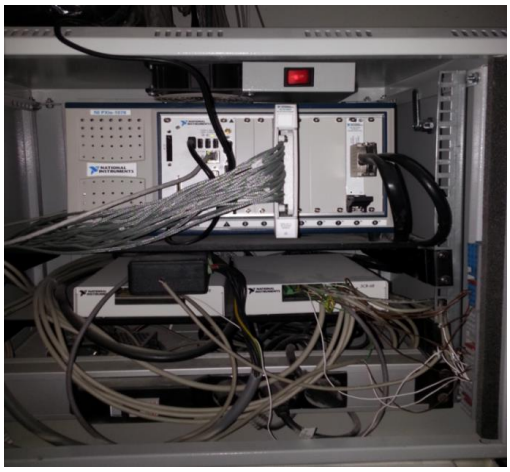
Kontrol mekanizmasında PLD algoritmasının seçilmesinin sebebi; örnekleme zamanı ve k katsayısının PLD tarafından belirlenmesinin ardından bizim bu değerlerde değişiklik yapma şansımızın olmasıdır. PLD algoritması sayesinde sıcaklığın ne hızla hangi yöne arttığı belirlenir. Özet olarak; PLD algoritması ile mevcut sıcaklıktan, hedef sıcaklığa geçiş sırasında PLD algoritması lineer doğruların eğimini hesaplayarak; mevcut sıcaklıktan ne kadar süre sonra hedef sıcaklığa ulaşacağını kestirir ve o süreye göre kendi içerisindeki hesap yöntemleri ile eğrilerin eğimini azaltarak ve ya arttırarak hedef sıcaklığa ulaşmaya çalışır. Hedef sıcaklığa tam olarak ulaşamadığı için hedef sıcaklığın biraz altında veya üzerinde durarak, hedef sıcaklığa doğru sönümlü bir dalgalanma yapar. Yani ortaya çıkan hataları PLD algoritması yumuşatmaya çalışır.

3.1.7.3 Parametre Ölçüm ve Kontrol Sistemi (PXI)

Sıcaklık, nem, hava hızı gibi fiziksel büyüklüklerin ölçülmesi ve incelenmesi için öncelikle bu analog işaretlerin sayısallaştırılması gerekir. Veri toplama işleminin mantığı algılayıcılar ve dönüştürücüler vasıtasıyla elektrik sinyaline dönüşen büyüklükler PXI' da anlamlı büyüklüklere dönüştürülerek grafiğe dökülür. Veri toplama sistemine sıcaklık sensörleri, nem sensörleri bağlanmıştır.

PXI cihazı, bir data toplama sistemidir. Realtime ve Windows ortamlarında çalışmaya müsait bir donanım yapısı olup, ihtiyaca göre iki işletim sistemi arasında geçiş yapılabilmektedir. Kendi başına çalışan bir sistem olmakla birlikte PLC ile iletişim kurarak, PLC kontrol edebilir hale de gelmektedir. Kontrol programı LabView ile yazılmakta olup, kasasına çeşitli I/O kartları takılarak giriş çıkış sayısı istenildiği miktarda arttırılabilmektedir. Mevcut sistemde, ihtiyaç duyulan tüm giriş çıkışlar LabView programı ile kontrol edilmektedir. Sistem aynı zamanda ihtiyaç duyulan sürelerde tüm giriş çıkışlarından verileri alarak kaydetmekte, daha sonra bu kaydedilen

veriler excel ortamında görülebilmektedir. PLC ile iletişimi Ethernet üzerinden sağlanmakta olup tüm ölçülen değerler PLC'den alınabilmekte ve tüm ayar değerleri PLC'ye gönderilebilmektedir (Şekil 3.38).



Şekil 3.38 PXI cihazının görünümü

Çalışmada, deney odasına ait tüm sensör sistemleri, PXI ile TeamViewer bağlantısı kullanılarak bir dizüstü bilgisayarda görülebilmektedir. Bu bilgisayardan PXI cihazına uzak bağlantı yapılarak, PLC'ye bağlı olan tüm değişkenler kontrol edilebilmekte, ayrıca PXI'ya bağlı olan sıcaklık, nem, çiğ noktası, kolektör ve debimetre bağlantıları kontrol edilebilmektedir.

3.1.7.4 Haberleşme

Veri toplaması ve kontrolü için 7 inch renkli ekran dokunmatik bir kontrolör kullanılmaktadır. Bu kontrolörün ön tarafı kullanıcı arayüzü iken arka tarafı ise PLC modülüdür. Yani bu kontrolör entegre endüstriyel bir bilgisayardır (Şekil 3.39). Diğer kontrolörlerden farkı; ekran ve PLC'nin ayrı ayrı temin edilip birbiri ile konuşturulmasına gerek kalmamasıdır. Ara yüz ekranında her bir kontrol hacmi ve hidrolik sistem için ayrı sayfalar olmakla beraber, tüm kontrol hacimleri için bir özet sayfa ve görünüme sahiptir (Şekil 3.39). Tüm bu özel entegre sistem ve ölçülen değerler labview yazılımıyla ölçülüp kontrol edilmektedir. Bu sistem aynı zamanda hacim-1'den alınan verilerin işlendiği PXI sistemiyle bağlantısı kurulduğundan deney odasındaki tüm kontroller PXI sistemi üzerinden yürütülmüştür.



Şekil 3.39 PLC cihazının ve ara yüzünün görünümü

3.2 Deneysel Ölçümler Öncesi Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde deneysel ölçümler öncesi yapılan ön çalışmalar anlatılmıştır.

3.2.1 Kalibrasyon Çalışmaları

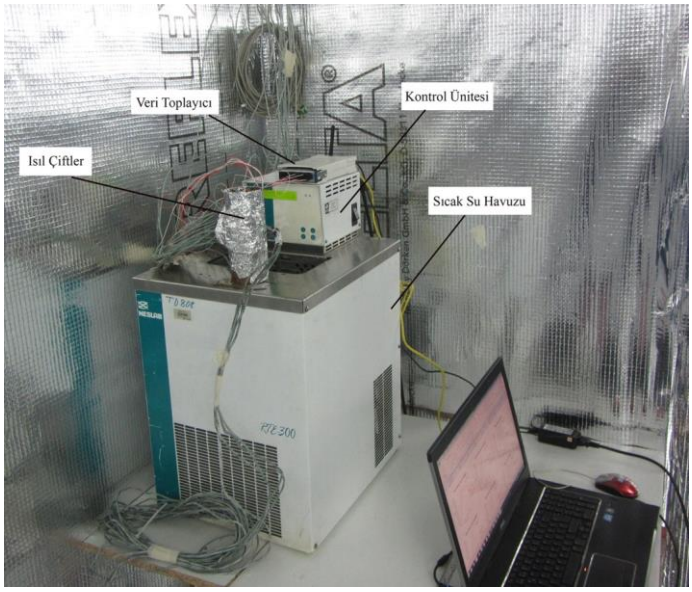
Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıdaki sebeplerden dolayı hata içerirler. Deneysel çalışmalarda ortaya çıkan hatalar iki grupta toplanabilir. Bunlar;

- Deneyi yapan araştırmacıdan kaynaklanan hatalar,
- Deney sisteminin yapısı, deneyin yapıldığı ortam, deneyde kullanılan ölçme cihazlarından kaynaklanan hatalar.

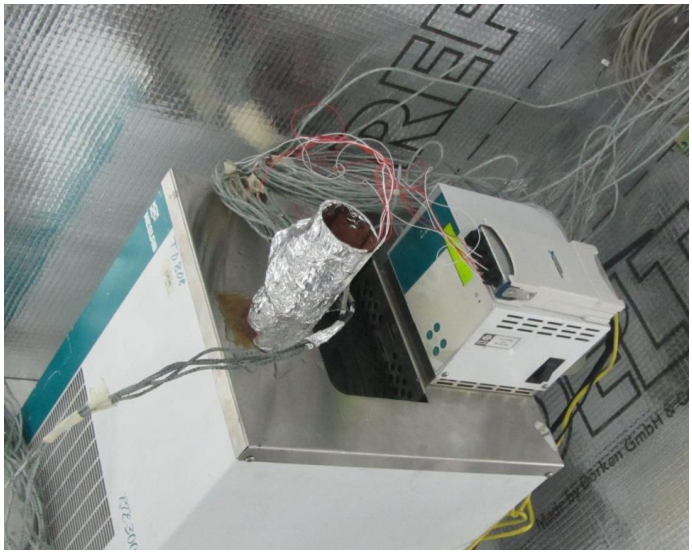
Birinci tür hatalar deneyi yapan araştırmacının tecrübe ve dikkatine bağlı olarak değişkenlik gösterir. İkinci tür hatalar ise deneyde kullanılan deneyde kullanılan cihazların zamanla ısınması, elektrik gerilimlerinin ve deneyin yapıldığı ortam şartlarının zamanla değişmesi olarak gösterilebilir. Bununla birlikte ikinci tür hataları üç farklı grupta toplayabiliriz. Bunlardan ilki, deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatından kaynaklanan hatalar, ikinci olarak; sabit ve sistematik olarak adlandırılan ve sebebi genellikle tam olarak bilinmeyen, ölçüm değerlerinin tekrar okunması sırasında ortaya çıkan hatalar, üçüncü olarak; rastgele olarak adlandırılan elektronik salınımlardan kaynaklanan hatalardır. Bu hatalar, deneyde kullanılan ölçüm cihazlarının uygun kalibrasyonu ile ortadan kaldırılabilir. Tezde kullanılan bütün sıcaklık sensörlerin kalibrasyonları yapılmıştır. Kullanılan nem sensörlerinin ve termal kameranın kalibrasyonları deneysel çalışmalar öncesi kalibrasyonları yapılmıştır. Kalibrasyon sertifikaları EK-A'da verilmiştir.

3.2.1.1 Isıl Çiftlerin Kalibrasyonu

Isıl çiftlerin kalibrasyonları Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş Isı-Akışkan ve Enerji Birimi Laboratuvarında NESLAB marka RTE-300 model -20/+200 °C sıcaklık aralığında ±0.01 °C kararlığında çalışabilen 545 W gücündeki su banyosu ile yapılmıştır (Şekil 3.40). Kalibrasyon 25 °C ve %50 bağıl nem koşullarında klimatize edilmiş deney odası şartlarında yapılmıştır. Referans sıcaklık olarak iki adet RTD sensör kullanılarak bu iki sensörün ortalaması alınmıştır (Şekil 3.41). RTD sensörler National Instruments firmasının NI 9219 model dört adet kanalı olan veri toplama ünitesi bağlanmıştır. Kalibrasyonu yapılan 21 adet ısıl çift ise NI TB-4353 modülüyle PXI'a bağlanmıştır ve dataların kaydı sağlanmıştır (Şekil 3.42). Çevre şartlarının oluşturulduğu dış hacimlerde kullanılan sıcaklık & nem sensörlerinin kalibrasyonları daha önce yapılmış olup kalibrasyon sertifikaları EK-A'da verilmiştir.



Şekil 3.40 Sıcaklık sensörlerinin kalibre edildiği sistem



Şekil 3.41 Sıcak su banyosu ve kalibre edilen sensörler



Şekil 3.42 Veri toplama cihazı

Isıl Çift Kalibrasyon Yöntemi

Isıl çiftlerin kalibrasyonuna başlamadan önce deney odasının istenilen şartlara ulaşması sağlanmıştır. Kalibrasyon sırasında 10, 20 ve 30 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık değeri kullanılmış olup kalibrasyon eğrileri çıkartılmıştır. Ölçüm süresi 30 dakika olup 15 saniye aralıklarla ölçüm alınmıştır. Ölçüme başlamak için, sıcaklık ölçerlerin rejime girmeleri, şehir şebekesindeki gerilimin düzensizliği, cihazların ve PLC nin kendi ataletleri de göz önünde bulundurularak su banyosuna daldırılan her bir ısıl çiftin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Her bir ısıl çiftin standart sapması 0,01 °C' nin altındadır.

Kalibrasyonu yapılan ısıl çiftler deney odası içerisindeki yerleşimi aşağıdaki gibidir:

- Su sıcaklık sensörleri: Bu sensörler, suyun yoğuşturucuya giriş ve çıkış sıcaklıklarını saptamak için kullanılacaktır. yoğuşturucu gidiş, yoğuşturucu dönüş, vana gidiş, vana dönüş olmak üzere dört adettir. (vana' deki sensörler kullanılmamaktadır.)
- Yüzey sıcaklık sensörleri: Bu sensörler, deney odasının iç yüzeylerindeki sıcaklıkları ölçmek amacıyla kullanılacaktır. Her bir sensör bulunduğu yüzeyin orta noktasına monte edilmiştir. Tavan yüzey, Taban yüzey, Kuzey yüzey, Güney yüzey, Doğu yüzey, Batı yüzey olmak üzere altı adettir.
- Yatay düzlemdeki sıcaklık sensörleri: Bu sensörler, batı yüzey ile doğu yüzeyi orta noktalarından birleştiren ve deney odasını simetrik iki eşit hacme ayırdığı düşünülen düzlemde ve yoğuşturucu orta noktasından yere paralel olarak çizilen doğru üzerinde sıralanmıştır. Bu sensörlerden, yatayda 0 cm (yoğuşturucu yüzeyi), 1 cm, 2 cm, 3 cm, 5 cm, 50 cm, 100 cm ve 200 cm' de olmak üzere sekiz adet bulunmaktadır.

Isıl Çift Kalibrasyon Bulguları

Yapılan kalibrasyon çalışmaları sonucunda ısıl çiftlerin kalibrasyon eşitlikleri çıkartılmış, çıkartılan eşitlikler PXI sistemindeki ölçüm yazılımına işlenmiştir. Bu şekilde sıcaklık sensörlerden alınan veriler kullanılan kalibrasyon eşitliğinde hesaplanarak doğru değerler kullanılmış. Kalibrasyon sırasında ısıl-çiftlerden ve RTD sensörlerden alınan ölçümler, kalibrasyon değerleri, kalibrasyon grafikleri ve kalibrasyon eşitlikleri EK-A'da detaylı olarak verilmiştir.

3.2.1.2 Nem Sensörlerinin Kalibrasyonu

Nem ölçümlerinde TEKON marka HT15 model sıcaklık-nem transmitteri kullanıştır. Kullanılan nem sensörleri aynı zamanda sıcaklık ölçümü de yapmaktadır. Bu yüzden nem sensörlerinin bulunduğu noktalardan aynı zamanda sıcaklık ölçümü de yapılmıştır. Nem sensörlerinin sıcaklık ve nem kalibrasyonları UKS firmasının akredite laboratuvarında 24,2 °C çevre sıcaklıklarında yapılmıştır. Her bir nem sensörü için kalibrasyonda kullanılan referans cihaz bilgileri, sıcaklık ve nem ölçüm bulguları, sapmaları ve ölçüm belirsizliği bilgileri EK-A'da detaylı olarak verilmiştir.

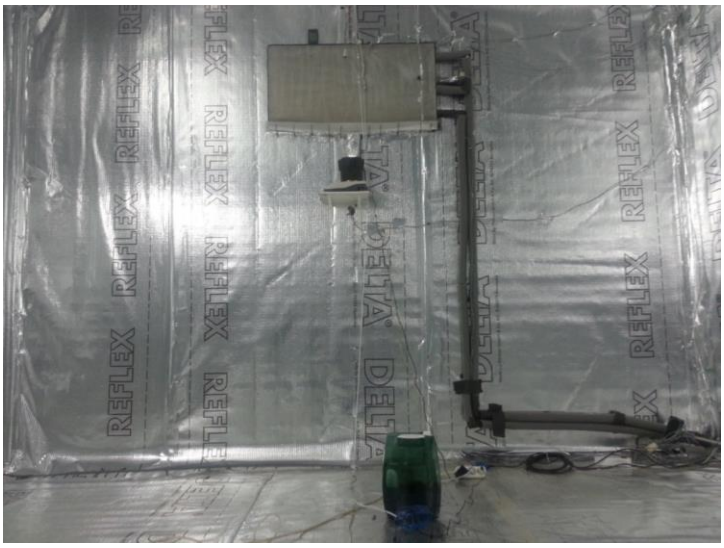
3.2.1.3 Işınım Termometresi Kalibrasyonu

Deneysel çalışmalarda, olarak Optris marka ışınım termometresi (pirometre) termal kamera kullanılmıştır. Işınım termometresi cihazının kalibrasyonu TKM firmasının akredite laboratuvarında yapılmıştır. Kalibrasyon TK27 ışınım termometresi kalibrasyon talimatına uygun olarak yapılmıştır. EK-A'da kalibrasyon çevre şartları, kalibrasyonda kullanılan cihazlar ve ölçüm bulguları yer almaktadır.

3.2.2 Deney Odası Sızdırmazlık Deneyleri

Deneylerin yapılacağı mahalde deneyler, başlangıç şartları olarak önceden belirlenen belirli sıcaklık ve bağıl nem koşullarında başlatılır. Deney odasındaki yüzey sıcaklığının sınır şartına getirilmesi ve kontrolü kendisini çevreleyen hacimlerdeki cihazlar vasıtasıyla yapılır. Çevre hacimlerdeki şartların kontrol ile oda sıcaklığı hava ve yüzey sıcaklıkları istenilen başlangıç koşullarına getirilir. Deney odası içerisindeki bağıl nem ise oda içerisindeki nemlendirici ve kurutucu ile başlangıç koşullarına getirilir.

Oda içerisinde yoğuşturucu ile nem alma yapılacağından ve yoğuşan miktarların gram mertebelerinde olmasından dolayı, deneylerin yapıldığı odadan (Hacim-1) çevre hacimlere (Hacim-2) ve aynı zamanda çevre hacimlerden deney odasına su buharı kütle transferi olmamalıdır. Mahaller arasında herhangi bir kütle transferi olması yapacağımız hassas ölçüm bulgularını direkt olarak etkileyecektir. Bu nedenle deney odasının tüm yüzeyleri özel buhar kesici kaplama ile kaplanmıştır. Nihai deneyler öncesinde de sızdırmazlık deneyleri yapılmıştır. Ayrıca bu önleme ek olarak deneyler esnasında iç hacim ile çevre hacimler yakın nem değerinde tutulmuştur. Bu önlemler sayesinde deneylerimizi etkileyecek sızdırma riskinin önüne geçilmiştir. Şekil 3.43'de buhar kesici ile kaplanmış deney odasının görüntüsü yer almaktadır.



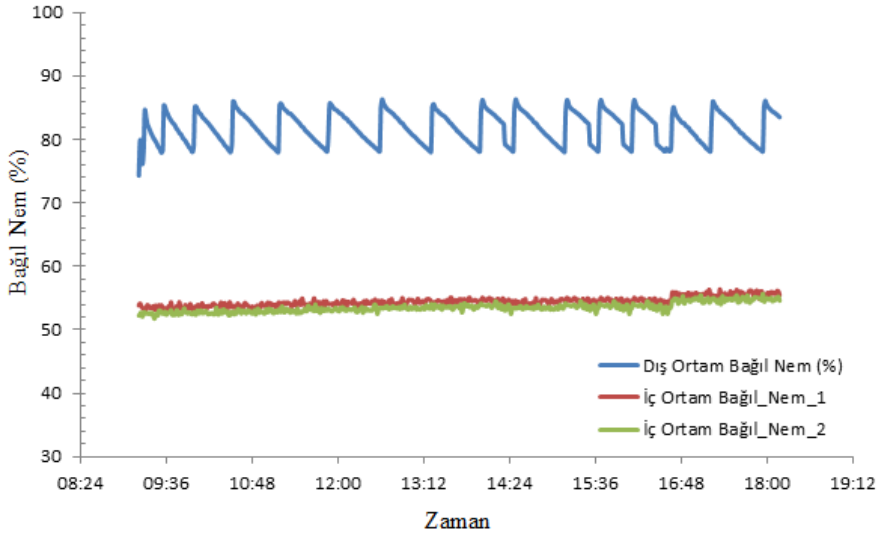
Şekil 3.43 Deney odasının buhar kesici ile kaplanması

Buhar kesici uygulaması yapıldıktan sonra oda içerisinde sızdırmazlık deneyi yapılmıştır. Sızdırmazlık deneyi boyunca oda çevresindeki hacmin bağıl nemi ortalama % 80' de tutulmuş ve oda içerisine kütle transferi olup olmadığı zamana bağlı olarak gözlenmiştir. Elde edilen ölçümler Çizelge 3.2'de verilmiştir. Oda içerisindeki bağıl nem oranı, oda içerisinde farklı noktalara konumlandırılan iki sensör kullanılarak ölçülmüştür. Dış hacimdeki (Hacim-2) bağıl nem oranı ise tek bir noktadan ölçülmüştür.

Çizelge 3.2 Sızdırmazlık deneyi bulguları

Zaman	İç Ortam Bağıl_Nem_1 (%)	İç Ortam Bağıl_Nem_2 (%)	Dış ortam Bağıl_Nem (%)
09:15	53,7	52,7	78,2
09:45	53,6	53,1	81,6
10:15	54,0	52,4	81,6
10:45	53,6	53,0	83,1
11:15	54,2	52,7	84,8
11:45	53,9	52,6	79,1
12:15	53,6	52,8	81,7
12:45	54,8	53,3	84,2
13:15	54,8	53,5	78,5
14:15	54,3	53,4	83,2
15:15	54,5	53,7	85,0
16:15	54,9	53,6	84,3
17:15	55,1	55,0	85,7
17:45	56,2	54,2	79,7

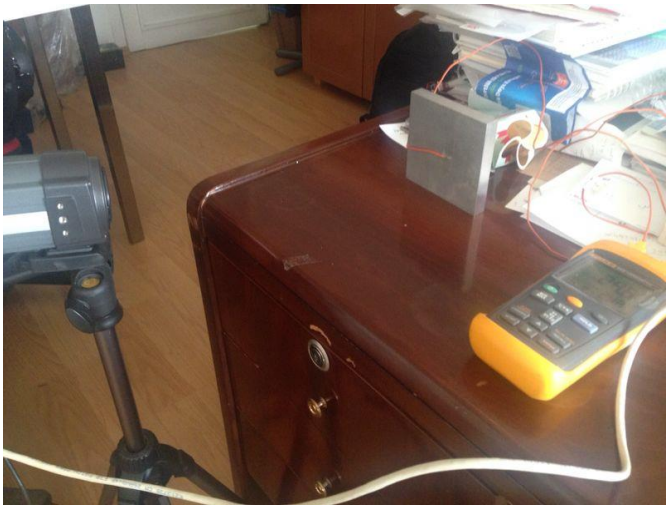
Sızdırmazlık deneyi çevre koşullarının ortalama %82 bağıl nem koşullarda yapılmıştır. Şekil 3.44'de görüldüğü gibi 9 saatlik bir deney sonucunda oda içerisindeki iki bağıl nem sensöründe de %2' den az bir artış meydana gelmektedir. Bu şartlar için hacimler arası kütle transferi 0,5 g/h olarak gerçekleşmiş olup bu değer deneylerimiz için toleranslarımızın çok altında kalmaktadır. Ayrıca deneyler esnasında çevre hacimlerin hava nem değerleri deney edilen oda içerisindeki bağıl nem ile aynı değere set edileceğinden, deneylerin yapılacağı odadan dışarıya meydana gelecek kütle transferi ihmal edilebilecek düzeyde olacaktır.



Şekil 3.44 Hacim-1 ve Hacim-2 zamana bağlı bağıl nem değişimi

3.2.3 Yoğuşturucu Plaka ve Yüzey Kaplama Malzemesinin Yayma Oranı Değerlerinin Belirlenmesi

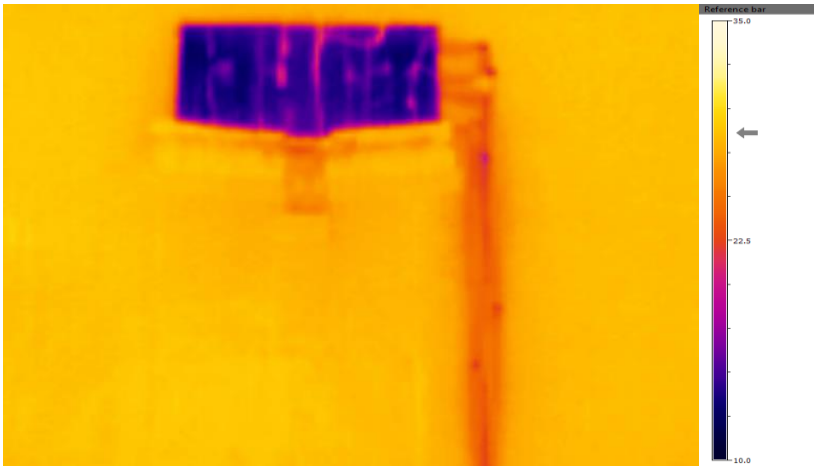
Işınımla ısı transfer katsayısı hesaplarında kullanılacak mahal içerisindeki yüzeylerin yayma oranı ε_s değerleri termal kamera ve kalibre edilmiş sensörler ile yapılmıştır. Yayma oranı değerleri ölçülen yüzeylerin sıcaklıkları ısıl çiftler kullanılarak ölçülmüştür. Daha sonra ölçülen yüzey sıcaklığı ile termal kamera sıcaklıkları eşitlenene kadar yüzey yayma oranı değeri değiştirilerek gerçek yayma oranı değerine ulaşıldı. Bulgulara göre alüminyum plakanın yayma oranı değeri 0,4, diğer yüzeylerin yayma oranı değeri 0,55 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.45 Malzemelerin yayma oranı değerlerinin ölçümü

3.2.4 Deney Odasındaki Sınır Şartlarının Sürekliliği

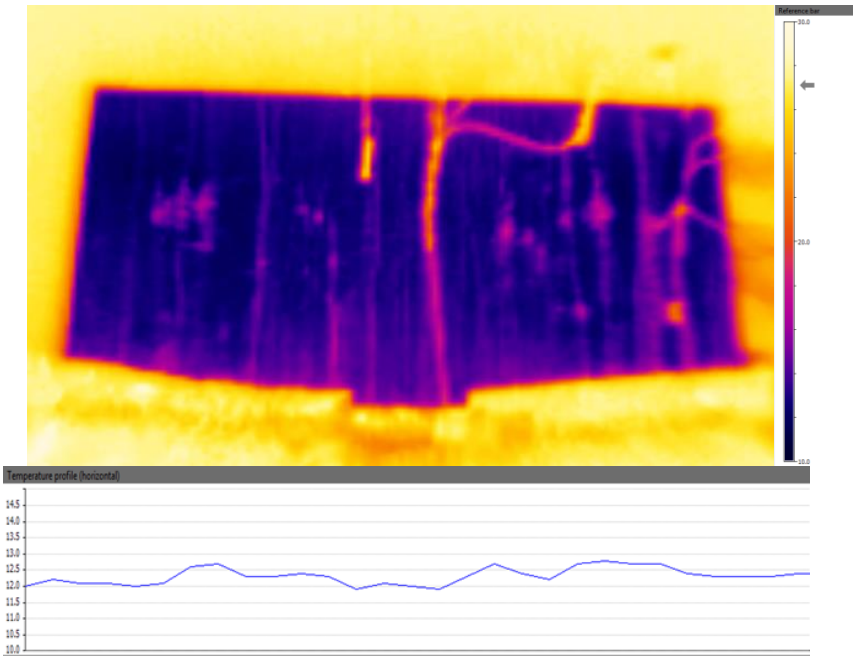
Deneylerin yapıldığı hacmi çevreleyen çevre hacimlerin sıcaklıkları 25 °C'ye ayarlanmıştır. Deneyler sırasında her bir hacimdeki hava sıcaklık değerleri ise anlık sıcaklık ölçümü yapılarak izlenmiştir. Deneylerin 15 saatin üzerinde olmasına rağmen çevre hacimleri kararlı bir şekilde istenilen sıcaklık şartlarında tutulmuştur. Tüm deneylerde hacimlerin sıcaklıkları 24,5 °C – 25,5 °C arasında tutulmuştur. Her bir deney için çevre hacimlerin zamana bağlı sıcaklık değişimi EK-B'de verilmiştir. Benzer şekilde oda içerisindeki yüzeylerde da ± 0,5 °C hassasiyetle homojen sıcaklık dağılımı elde edilmiştir (Şekil 3.46).



Şekil 3.46 Oda yüzeylerindeki sıcaklık dağılımı

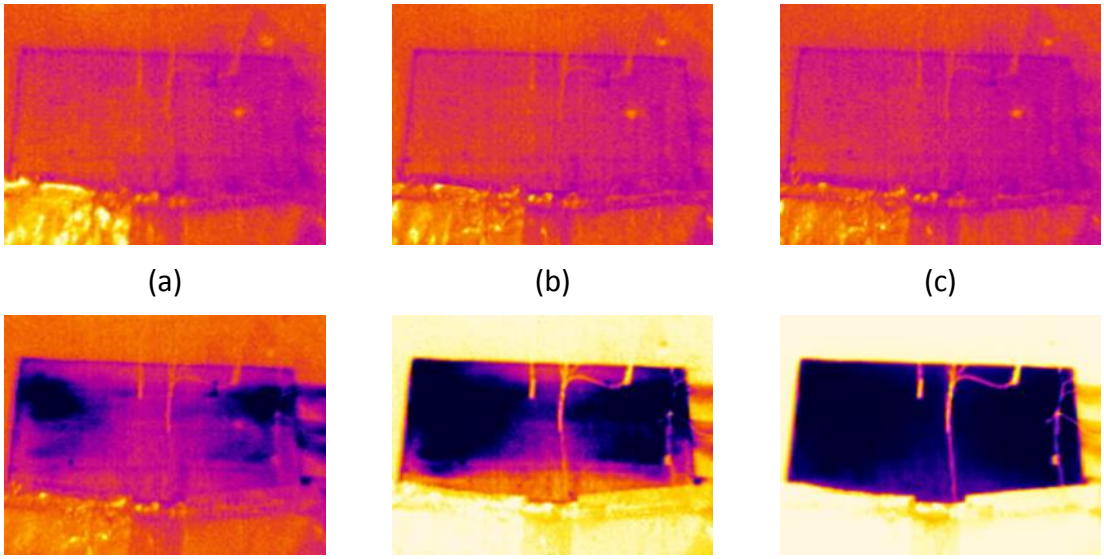
Deney süresince yoğuşturucu plaka yüzey sıcaklığı da termal kamera ile gözlemlenmiştir. Şekil 3.47'den de görüldüğü gibi sistem rejime girdikten sonra

yoğuşturucu yüzey sıcaklık dağılımı ± 0,5 °C farklılık göstermiştir. Oluşan sıcaklık farkı da yoğuşan suyun akışı esnasında suyun aktığı bölgelerde çizgisel sıcaklık düşüşünden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.47 Yoğuşturucu plaka üzerindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 3.48'de ise yoğuşturucu plaka sıcaklığının rejime girmesi öncesi zamana bağlı sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Bulgulardan da görüleceği gibi 60 dakika içerisinde yoğuşturuc plaka yüzey sıcaklığı istenilen sıcaklık şartına gelmekte ve yüzeyde homojen sıcaklık dağılımı oluşmaktadır. Ölçümler yoğuşmanın başladığı 120'inci dakika başladığından ve deney boyunca yoğuşturucu plaka sürekli soğuk suyla beslendiğinden deneyin başlangıcından sonuna kadar, homojen ve kararlı yoğuşturucu plaka sıcaklığı elde edildi diyebiliriz.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Şekil 3.48 Yoğuşturucu plaka sıcaklığının zamana bağlı değişimi: a) t = 0 dk, a) t = 10 dk, a) t = 20 dk, a) t = 30 dk, a) t = 40 dk, a) t = 60 dk

3.2.5 Deneylerin Tekrarlanabilirliği

Deneysel çalışmalar öncesinde yapılacak deneysel çalışmaların tekrarlanabilirliğini gözlemlemek amacıyla 10,9 °C ve 11,1 °C yoğuşturucu plaka yüzey sıcaklığı için aynı sınır ve çevre şartlara iki adet deneysel çalışma yürütülmüştür. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda: Deneylerin 450. dakikasında 10,9 °C plaka yüzey sıcaklığı deneyi için yoğuşan miktar 169,79 g iken, 11,1 °C plaka yüzey sıcaklığı deneyinde bu değer 163,63 g olmuştur. İki deney arasındaki fark %3,63 çıkmıştır. Bu farkın da temel nedeni; ilk deneydeki yüzey sıcaklığının ikinci deneydeki yüzey sıcaklığından bir miktar düşük olması nedeniyle beklendiği şekilde buna bağlı olarak yoğuşan miktar da bir miktar fazla çıkmıştır. Benzer şekilde ilk deneydeki (T_s=10,9 °C) plaka yüzeyinden gerçekleşen toplam ısı akısı 122,48 W/m^2 iken ikinci deneydeki (T_s=11,1 °C) toplam ısı akısı 117,46 W/m^2 çıkmıştır. Bu sonuçlar yapılan deneysel çalışmalarının tekrarlanabilirliğini göstermektedir.

3.2.6 Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda ölçümlerde ön görülen hata değerinin ön görülmesi yapılacak deneysel çalışmaların doğruluğu açısından çok önemlidir. Deneysel ölçümlerde hatalar iki yolla oluşur. Bunlar; deney odası ve ölçüm sisteminden kaynaklanan ve kaçınılmaz

olan hatalar ve bu tezde ihmal edilen deneyleri yapan kişiden kaynaklanan hatalardır [166].

Bu çalışmada yoğuşturucu plakadan olan toplam, net, ışınım, taşınım ve gizli transfer miktarları ile toplam, ışınım, taşınım ve yoğuşma ısı transfer katsayılarının belirsizlik analizleri her bir deney için yapılmıştır. Hesaplamalarda şartlandırılmış suyun termofiziksel özellikleri ve plaka geometrisi boyutlarının belirsizliği ihmal edilmiştir.

Deney düzeneğinde bir takım ölçümler yapılarak tespit edilmesi/hesaplanması gereken büyüklük P ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken ise x_1, x_2 ….. x_n olsun. Bu durumda;

$$P = P(x_1, x_2, x_3, \ldots\ldots, x_n) \tag{3.1}$$

Yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \ldots..w_n$ ve P büyüklüğünün hata oranı w_p ise, belirsizlik analizi yöntemine göre;

$$w_P = \pm\left[\left(\frac{\partial P}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_3} w_3\right)^2 + \ldots.. + \left(\frac{\partial P}{\partial x_n} w_n\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.2}$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Bağıntı incelendiğinde, deneyde en büyük hataya neden olan değişkenin kolaylıkla tespit edilebildiği anlaşılmaktadır. Bu özellik belirsizlik analizi yönteminin en önemli üstünlüğü olarak belirtilebilir.

3.2.6.1 Belirsizliklerin Tespiti

Yapılan deneysel çalışmalarda sabit başlangıç bağıl nem ve sıcaklık koşulları için farklı plaka yüzey sıcaklığının ısı transferini etkisi incelenmiş ve gizli, iletim, taşınım ve ışınımla ısı transferi miktarları tespit edilmiştir.

Deneylerde hataya neden olan bağımsız değişkenler genel olarak, boru içindeki akışkan sıcaklığı, su debisi, deney odasındaki hava sıcaklıkları ve hassas terazi ile ölçülen yoğuşan su miktarı kütlesidir.

Plaka Isıl Kapasitesi İçin Belirsizliklerin Tespiti

Soğutucu plakadan belli sıcaklıklarda şartlandırılmış suyun içerisinden geçmesiyle belli yüzey sıcaklığına ve soğutma kapasitesine ulaşır. Şartlandırılmış sudan soğutucu

plakaya transfer olan toplam ısı akısı ve oluşturulabilecek belirsizler şu şekilde ifade edilebilir:

$$q_{panel,top} = \frac{\dot{m}_{su} c_p (T_{w1} - T_{w2})}{A} \tag{3.3}$$

$$\dot{m}_{su} = \rho \dot{\vartheta}_{su} \tag{3.4}$$

$$w_{\dot{m}_{su}} = \pm \left[\left(\frac{\partial \dot{m}_{su}}{\partial \dot{\vartheta}_{su}} w_{\dot{\vartheta}_{su}} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{3.5}$$

$$w_{q_{panel,top}} = \pm \left[\left(\frac{\partial q_{panel,top}}{\partial \dot{m}_{su}} w_{\dot{m}_{su}} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_{panel,top}}{\partial T_{w1}} w_{T_{w1}} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_{panel,top}}{\partial T_{w2}} w_{T_{w2}} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{3.6}$$

Plakanın arka yüzeyinden temas ettiği yüzeye bir miktar iletimle ısı kaybı da meydana gelmektedir. İletimle olan bu ısı kaybı q_{kay} şeklinde gösterilmiştir ve belirsizliği şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{q}_{panel,net} = \dot{q}_{panel,top} - \dot{q}_{kay} \tag{3.7}$$

$$\dot{q}_{kay} = U_d \left(T_{dis} - T_{ins} \right) \tag{3.8}$$

$$w_{q_{kay}} = \pm \left[\left(\frac{\partial \dot{q}_{kay}}{\partial T_{dis}} w_{T_{dis}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_{kay}}{\partial T_{ins}} w_{T_{ins}} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{3.9}$$

$$w_{\dot{q}_{panel,net}} = \pm \left[\left(\frac{\partial \dot{q}_{panel,net}}{\partial \dot{q}_{panel,top}} w_{q_{panel,top}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_{panel,net}}{\partial \dot{q}_{kayıp}} w_{\dot{q}_{kay}} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{3.10}$$

Gizli Isı Transferi İçin Belirsizlik Tespiti

Soğutucu plaka yüzeyinden oda içerisine geçen net ısı transferi duyulur ve gizli ısı olmak üzere ikiye ayrılır. Oda içerisine geçen gizli ısı ve yoğuşma ısı transfer katsayısı için belirsizlikler aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{q}_{giz} = \frac{\dot{m}_v h_{fg} \left(T_s \right)}{A} \tag{3.11}$$

$$\dot{m}_v = \frac{m_v}{\Delta t} \tag{3.12}$$

Olduğundan,

$$\dot{q}_{giz} = \frac{m_v}{\Delta t}\frac{h_{fg}\left(T_s\right)}{A} \tag{3.13}$$

$$w_{\dot{q}_{giz}} = \pm\left[\left(\frac{\partial \dot{q}_{giz}}{\partial m_v} w_{m_v}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.14}$$

Yoğuşma Isı Transfer Katsayısı Belirsizlik Tespiti

$$\dot{q}_{giz} = h_{yoğ}\left(T_{s,doy} - T_s\right) \tag{3.15}$$

$$h_{yoğ} = \frac{\dot{q}_{giz}}{\left(T_{s,doy} - T_s\right)} \tag{3.16}$$

$$w_{h_{cond}} = \pm\left[\left(\frac{\partial h_{yoğ}}{\partial \dot{q}_{giz}} w_{\dot{q}_{giz}}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{yoğ}}{\partial T_s} w_{T_s}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.17}$$

Duyulur Isı Transferi İçin Belirsizlik Tespiti

Duyulur ısı transferi için belirsizlik tespiti aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{q}_{duy} = q_{panel,net} - \dot{q}_{giz} \tag{3.18}$$

$$w_{\dot{q}_{duy}} = \pm\left[\left(\frac{\partial \dot{q}_{duy}}{\partial \dot{q}_{panel,net}} w_{\dot{q}_{panel,net}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_{duy}}{\partial \dot{q}_{giz}} w_{\dot{q}_{giz}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.19}$$

Işınımla Isı Transferi İçin Belirsizlik Tespiti

$$q_r = \sigma\sum_{j=1}^{n} F_{\varepsilon_{s-j}}\left(T_s^4 - T_j^4\right) \tag{3.20}$$

$$w_{\dot{q}_r} = \pm\left[\left(\frac{\partial \dot{q}_r}{\partial T_s} w_{T_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_r}{\partial T_1} w_{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_r}{\partial T_2} w_{T_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_r}{\partial T_3} w_3\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial \dot{q}_r}{\partial T_6} w_{T_6}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.21}$$

Işınım Isı Transfer Katsayısı İçin Belirsizlik Tespiti

$$h_r = \frac{\dot{q}_r}{T_{aust} - T_s} \tag{3.22}$$

$$T_{aust} = \sqrt[4]{\sum_{j=1}^{n} \left(F_{s-j}\, T_j^4 \right)} \tag{3.23}$$

$$w_{T_{aust}} = \pm \left[\left(\frac{\partial T_{aust}}{\partial T_1} w_{T_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{aust}}{\partial T_2} w_{T_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{aust}}{\partial T_3} w_{T_3} \right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial T_{aust}}{\partial T_6} w_{T_6} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{3.24}$$

$$w_{h_r} = \pm \left[\left(\frac{\partial h_r}{\partial q_r} w_{q_r} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_r}{\partial T_{aust}} w_{T_{aust}} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_r}{\partial T_s} w_{T_s} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{3.25}$$

Taşınımla Isı Transferi İçin Belirsizlik Tespiti

$$\dot{q}_{taş} = \dot{q}_{duy} - \dot{q}_{rad} \tag{3.26}$$

$$w_{\dot{q}_{taş}} = \pm \left[\left(\frac{\partial \dot{q}_{taş}}{\partial \dot{q}_{duy}} w_{\dot{q}_{duy}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{q}_{yoğ}}{\partial \dot{q}_{rad}} w_{\dot{q}_{rad}} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{3.27}$$

Taşınım Isı Transfer Katsayısı İçin Belirsizlik tespiti

$$h_c = \frac{\dot{q}_{taş}}{T_a - T_s} \tag{3.28}$$

$$w_{h_{taş}} = \pm \left[\left(\frac{\partial h_{taş}}{\partial \dot{q}_{taş}} w_{\dot{q}_{taş}} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_{taş}}{\partial T_a} w_{T_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_{rad}}{\partial T_s} w_{T_s} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{3.29}$$

Toplam Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi

$$\dot{q}_{duy} = h_{top} \left(T_{op} - T_s \right) \tag{3.30}$$

$$h_{top} = \frac{\dot{q}_{duy}}{\left(T_{op} - T_s \right)} \tag{3.31}$$

$$T_{op} = \frac{h_{rad} T_{mrt} + h_{yoğ} T_a}{h_{rad} + h_{yoğ}} \tag{3.32}$$

$$T_{mrt} = \frac{T_1 A_1 + T_2 A_2 + T_3 A_3 + \ldots + T_6 A_6}{A_{top}} \tag{3.33}$$

$$w_{T_{mrt}} = \pm\left[\left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_1} w_{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_2} w_{T_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_3} w_{T_3}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_6} w_{T_6}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.34}$$

T_a ortalama hava sıcaklığı olup oda ortasına yerleştirilmiş beş sensörün ortalamasıdır. Bu durumda:

$$T_a = \frac{T_{a1} + T_{a2} + T_{a3} + T_{a4} + T_{a5}}{5} \tag{3.35}$$

$$w_{T_a} = \pm\left[\left(\frac{1}{5} w_{T_{a1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{5} w_{T_{a2}}\right)^2 + \left(\frac{1}{5} w_{T_{a3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{5} w_{T_{a4}}\right)^2 + \left(\frac{1}{5} w_{T_{a5}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.36}$$

veya:

$$w_{T_a} = \pm\left[\left(\frac{\partial T_a}{\partial Ta_1} w_{T_{a1}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_a}{\partial Ta_2} w_{T_{a2}}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial T_a}{\partial Ta_5} w_{T_{a5}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.37}$$

$$w_{T_{op}} = \pm\left[\left(\frac{\partial T_{op}}{\partial h_r} w_{h_r}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{op}}{\partial T_{mrt}} w_{T_{mrt}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{op}}{\partial h_c} w_{h_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{op}}{\partial T_a} w_{T_a}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.38}$$

$$w_{h_{top}} = \pm\left[\left(\frac{\partial h_{top}}{\partial \dot{q}_{duy}} w_{\dot{q}_{duy}}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{top}}{\partial T_{op}} w_{T_{op}}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{top}}{\partial T_s} w_{T_s}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.39}$$

Yapılan deneysel çalışmalar öncesinde belirsizlik ve ölçümlerde oluşması muhtemel hataların analizleri yapılmıştır. Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'de hata parametreleri verilmiştir. Çizelge 3.5'de ise hata analizleri bulguları verilmiştir.

Çizelge 3.3 Hata parametreleri-1

±w	**Ham Parametreler**						
	m_{su} (kg/s)	**T_{w1}**	**T_{w2}**	**$T_{dış}$**	**T_{ins}**	**m_v(g)**	**T_s**
Deney-1	0,000303	0,010805	0,020757	-0,004197	0,015781	0,010	0,003195
Deney-2	0,000304	0,010206	0,019971	-0,004076	0,015088	0,010	0,002861
Deney-3	0,000308	0,004591	0,012628	-0,004249	0,008609	0,010	0,002096
Deney-4	0,000308	0,002061	0,009398	-0,004257	0,005730	0,010	0,001013

Çizelge 3.3 Hata parametreleri-1 (devamı)

Deney-5	0,000308	-0,001789	0,004601	-0,004256	0,001406	0,010	0,000104
Deney-6	0,000310	-0,006136	-0,000527	-0,004256	-0,003331	0,010	-0,001002

Çizelge 3.4 Hata parametreleri-2

±w	**Ham Parametreler**								
	T_{s1}	T_{s2}	T_{s3}	T_{s4}	T_{s5}	T_{s6}	T_a	T_{mrt}	T_{aust}
Deney-1	0,001371	-0,00649	-0,00395	-0,0054	-0,0037	0,021494	-0,0064	0,003255	0,001686
Deney-2	0,001303	-0,00639	-0,00389	-0,0053	-0,0036	0,021844	-0,0063	0,003298	0,001656
Deney-3	0,001360	-0,00646	-0,00394	-0,0054	-0,0037	0,023082	-0,0064	0,003472	0,001680
Deney-4	0,001339	-0,00642	-0,00391	-0,0053	-0,0036	0,020838	-0,0064	0,003163	0,001669
Deney-5	0,001357	-0,00646	-0,00393	-0,0054	-0,0037	0,021055	-0,0064	0,003194	0,001679
Deney-6	0,001330	-0,00640	-0,00390	-0,0053	-0,0036	0,020623	-0,0063	0,003133	0,001665

Çizelge 3.5 Hata analizi bulguları

	Deney-1			**Deney-2**			**Deney-3**		
Parametre	**Değer**	**±w**	**%w**	**Değer**	**±w**	**%w**	**Değer**	**±w**	**%w**
q_{total}	103,26	6,0377	5,85	102,87	5,8067	5,64	92,22	3,5907	3,89
q_{net}	97,36	6,0377	6,20	96,69	5,8067	6,01	87,49	3,5907	4,10
q_{gizli}	14,99	0,0009	0,01	13,22	0,0011	0,01	12,46	0,0014	0,01
$q_{duyulur}$	82,36	6,0377	7,33	83,47	5,8067	6,96	75,03	3,5907	4,79
q_r	26,50	0,0386	0,15	26,84	0,0355	0,13	24,59	0,0295	0,12
q_c	55,86	6,0378	10,81	56,63	5,8068	10,25	50,44	3,5908	7,12
h_{cond}	3,41	0,0025	0,07	3,30	0,0024	0,07	2,86	0,0014	0,05
h_r	2,22	0,0033	0,15	2,19	0,0030	0,14	2,18	0,0027	0,12
h_c	4,70	0,5080	10,81	4,62	0,4735	10,25	4,47	0,3180	7,12
h_{tot}	6,94	0,5089	7,33	6,85	0,4767	6,96	6,72	0,3214	4,79
	Deney-4			**Deney-5**			**Deney-6**		
Parametre	**Değer**	**±w**	**%w**	**Değer**	**±w**	**%w**	**Değer**	**±w**	**%w**
q_{total}	85,69	2,6270	3,07	74,88	1,4800	1,98	66,34	1,7324	2,61
q_{net}	81,07	2,6270	3,24	70,69	1,4800	2,09	62,50	1,7324	2,77
q_{gizli}	9,25	0,0008	0,01	7,36	0,0008	0,01	6,61	0,0007	0,01
$q_{duyulur}$	71,82	2,6270	3,66	63,32	1,4800	2,34	55,90	1,7324	3,10
q_r	23,54	0,0224	0,09	21,77	0,0197	0,09	19,95	0,0224	0,11
q_c	48,28	2,6271	5,44	41,55	1,4801	3,56	35,95	1,7325	4,82
h_{cond}	3,15	0,0011	0,04	2,89	0,0003	0,01	3,25	0,0016	0,05
h_r	2,22	0,0021	0,10	2,24	0,0021	0,09	2,25	0,0026	0,11
h_c	4,54	0,2472	5,44	4,28	0,1524	3,56	4,05	0,1951	4,82
h_{tot}	6,78	0,2480	3,66	6,54	0,1530	2,34	6,32	0,1959	3,10

Belirsizlik analizi bulgularına göre ışınımla ısı transferi ve ışınımla ısı transfer katsayısı değerlerinin belirsizliği diğer parametrelere göre daha azdır. Çünkü ışınımla olan ısı transferi, deney odasındaki yüzeyler MatLab programında tanıtılarak ve yüzey

sıcaklıkları kalibre edilmiş yüzey sıcaklık sensörlerinden okunan değerler kullanılarak MatLab programına yazılan analitik formüller olarak hesaplanmıştır.

3.3 Deneysel Yöntem

Bütün deneysel çalışmalar Bölüm 3.1'de detaylı olarak tanıtılan gerçek ölçekli özel tasarlanmış deney odasında gerçekleştirilmiştir. Bütün deneylerde çevre şartları, yoğuşturucuya gidiş su sıcaklığı, debisi, başlangıç hava sıcaklığı ve nemi belirli değerlere getirilmiştir.

Deneysel çalışmaların amaçları mahal içerisine düşey olarak konumlandırılmış yoğuşturucu plaka üzerinde doğal taşınıma bağlı hava içerisindeki su buharının yoğuşması esnasında gerçekleşen ısı ve kütle transferini, yoğuşturucu plakanın nem alma kapasitesini, plakanın duyulur ve gizli ısı transfer kapasitesi ve ısı transfer katsayılarını, eş zamanlı ısı-kütle geçişi Sh-Ra, Nu-Ra korelasyonlarının oluşturulması ve mahal içerisindeki sıcaklık-nem dağılımlarına incelemektir. Bunların dışında deneysel çalışmaların bir diğer amacı yoğuşmanın çözüldüğü sayısal modeli doğrulamaktır.

Deneylere başlamadan önce deney yapılan mahal içerisindeki hava ve yüzey sıcaklıklarının istenilen sıcaklığa getirilmesi için çevre şartları (çevreleyen hacimler) belirli sıcaklıklara ayarlandı. Deney odası hava ve yüzey sıcaklıkları istenilen sınır şartlarına (±0,2 °C) getirilmesi sağlandı. İç hacmin ve yüzeylerin belirli sıcaklığa gelmesinden sonra, oda kurutucu ve nemlendirme sistemi ile istenilen başlangıç nem değerlerine ± %0,3 hassasiyetle getirildi. Kullanılan ultrasonik nemlendirici ve fan ile içeriye verilen nemin homojen dağılması sağlanmıştır.

İç hacimde istenilen şartların sağlanmasından sonra çevre hacimler de iç hacim ile aynı şartlara getirildi. Yapılan tüm deneylerde deney odasının başlangıç şartlarına getirilmesi ortalama 5-6 saat sürmüştür. Başlangıç şartlarına getirmenin bu kadar uzun sürmesinin sebebi deney odasının büyük ve birden çok hacme sahip olması ve uzun sürecek deneyler öncesi sistemin belli bir süre kararlı halde tutulmak istenmesidir. Bu şekilde başlangıç koşullarının uzun tutulmasıyla tüm hacimlerde homojen sıcaklık ve nem dağılımları ile kararlı sınır ve çevre şartları oluşturulmuştur. Son olarak yüzeylerde

homojen sıcaklık dağılımının kontrolü için termal kamera ile yüzey sıcaklık dağılımları ölçülmüştür.

İstenilen hassasiyette, istenilen çevre şartları sağlandığında ise yoğuşturucu plakaya su verilmeye başlanmıştır. Yoğuşturucu plakaya gönderilen suyun debisi her bir deney için sabit ve 0,04 kg/s olarak belirlenmiştir. Gönderilen su sıcaklığı ise istenilen yoğuşturucu yüzey sıcaklığının sağlanması için deneylere göre değişiklik göstermiştir. Yoğuşturucu plakanın yüzey sıcaklığı önemli bir parametre olduğundan yoğuşturucu plaka yüzey sıcaklığı da istenilen şartlara getirildiğinde deneyler başlatılmıştır.

Tüm deneylerde deney odasındaki tüm yüzeyler ve hava sıcaklıkları 25 °C başlangıç şartlarına getirilmiştir. Yoğuşturucu yüzey sıcaklığı ve başlangıç bağıl nem değerleri parametre olarak çalışılmıştır.

Deneyler sırasında anlık olarak sınır şartları izlenmiştir ve herhangi bir sıkıntı olduğunda anlık olarak tespit edilip müdahale edilebilmiştir.

Yoğuşturucu yüzey sıcaklığı çiğ noktası sıcaklığından düşük olduğundan plaka üzerinde yoğuşma ve buna bağlı olarak mahal içerisindeki bağıl nem değeri düşmeye başlamıştır. Yoğuşan su ise hidrofobik sıvı ile yüzeyleri kaplı toplama kanalları aracılığıyla hassas terazide toplanmıştır. Deneyler öncesinde toplama kanallarının sızdırmazlığının kontrolü için yüksek miktarda su plaka yüzeyine dökülmüş ve sızdırma olup olmadığı kontrol edilmiş herhangi bir probleme rastlanmamıştır. Deneyler esnasında da herhangi kanaldan herhangi bir buharlaşma olmaması adına yoğuşma kanalları ve toplama kabı havadan izole edilmiş sadece kanal ile plaka yüzey arasında yoğuşan suyun akacağı kadar (1 cm) boşluk bırakılmıştır. Diğer yandan toplama kabı yüzeyinde herhangi bir yoğuşma olmaması adına çevresi ısı yalıtımı ile kaplanmıştır. Bunlara ek olarak deneyler arasında herhangi bir damlama ve sızdırma olup olmadığının kontrolü için plaka altına zemine kuru havlu yerleştirilmiştir. Deneyler bittiğinde kuru havlu üzerine herhangi bir damlama olmadığı görülmüştür.

Plaka üzerinde yoğuşma oluşmaya başladıktan ancak belli bir süre sonra yoğuşan su toplama kabına gelebilmektedir. Bu yüzden deney odası belli oranda (%2-3) daha yüksek bağıl nemde başlatılmıştır ve teraziye suyun toplanmaya başlanmasından itibaren esas veriler alınmaya başlanmıştır. Geçen bu sürede yoğuşturucu plaka yüzey

sıcaklığı sabit sıcaklığa gelirken, yüzeyin yeteri kadar ıslanmasından (film tabaka oluşumunun tamamlanmasından) dolayı yoğuşan su yüzeyde tutunamadan direkt olarak hassas teraziye ulaşmıştır. Yoğuşan miktar ise hassas teraziden 1 dakika aralıklarla ölçüm alınarak anlık olarak kaydedilmiştir.

Deneyler sırasında iç hacimdeki tüm yüzey, hava sıcaklıkları ve bağıl nem değerleri, yoğuşturucu plakaya gönderilen suyun plakaya giriş ve çıkış sıcaklıkları ve debisi, yoğuşan miktar ve çevre hacimleri sıcaklık ve nem değerleri her bir zaman adımı için ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Ölçümler birer dakika aralıkla yapılmış ve tüm veriler kaydedilmiştir. Elde edilen bu verileden her bir deney için ısı ve kütle transfer bulguları zamana bağlı olarak da verilebilmiştir. Zamana bağlı veriler incelendiğinde 30 dakikalık aralıklar içerisinde bulguların kendi içerisinde çok fazla değişmediği görülmüştür. Bu yüzden zamana bağlı ifadelerde her 30 dakikalık aralıklardaki verilerin ortalaması alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Deneyler başlangıç koşullarına göre toplamda 15-40 saat arasında sürmüştür.

Fakat ısı transferi empirik bağıntılarının oluşturulduğu hesaplamalarda her bir deneyte ortak olarak sistemin rejimde bulunduğu 480-840 dakikaları aralığındaki bulguların ortalaması kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda yoğuşmanın olduğu ıslak durum için farklı yoğuşturucu yüzey sıcaklıkları ve farklı başlangıç bağıl nem koşullarına göre 10 farklı deney yapılmıştır. Yoğuşturucu yüzey sıcaklığının parametre olarak çalışıldığı deneyler 10,5 °C, 10,9 °C, 11,4 °C, 12,3 °C, 13 °C ve 14 °C ortalama yoğuşturucu yüzey sıcaklıkları için deneyler yürütülmüştür. Başlangıç bağıl nem parametresinin çalışıldığı deneylerde ise %85, %80, %75, %70 ve %65 bağıl nem başlangıç koşulları deneyler yapılmıştır. Yoğuşmanın olmadığı kuru durum için ise 11,7 °C, 14,3 °C, 14,9 °C ve 17,5 °C yüzey sıcaklıkları ve %30 bağıl nem değeri için beş farklı deneysel çalışma yürütülmüştür.

Islak durum için yapılan deneylerde yoğuşturucu plaka yüzeyinde oluşan yoğuşan akıları, miktarları ve plaka nem alma kapasitesi incelenmiştir. Farklı yoğuşturucu yüzey sıcaklığı deneylerinde ise yoğuşturucu plakanın gizli ve duyulur ısı transfer kapasiteleri, yoğuşma, ışınım ısı, toplam duyulur ısı transfer katsayıları ve eş zamanlı ısı kütle geçişi

durumu için taşınımla olan ısı ve kütle transfer katsayıları incelenmiştir. Duyulur ısı transferi hesaplamalarında zamana bağlı yoğuşma, ışınım, toplam duyulur ısı transferi hesaplanmıştır. Sürekli rejimde ise farklı yüzey sıcaklıkları için empirik ısı ve kütle transferi ifadeleri oluşturulmuştur. Farklı başlangıç nem şartları için yapılan deneylerde ise esas olarak yoğuşturucu plakanın nem alma kapasitesi ve mahal içerisindeki zamana bağlı nem değişimleri incelenmiştir. Kurum durum deneylerinde ise sadece sadece ısı transferi durum içi taşınım ısı transfer ifadeleri incelenmiştir.

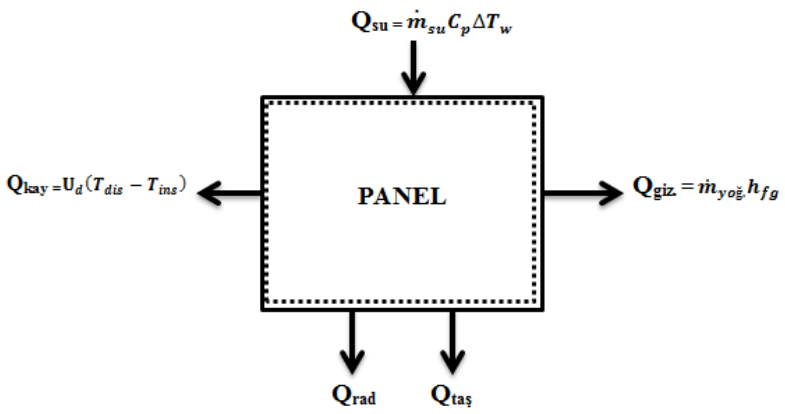
Son bölümde ıslak deneylerde mahal içerisindeki sıcaklık ve nem dağılımları incelenmiş konfor hesaplamaları yapılmıştır.

3.4 Ölçümler ve Hesaplamalar

Bu bölümde yapılan deneysel ölçümler ve hesaplama yöntemleri incelenmiştir.

3.4.1 Mahal İçerisindeki Enerji Dengesi

Sistem sınırı olarak yoğuşturucu plakayı alırsak enerji dengesi Şekil 3.49'daki gibi tanımlanabilir.



Şekil 3.49 Enerji dengesi

Kabul edilen açık sistem sınırı için enerji dengesini yazacak olursak:

$$\sum Q_g - \sum Q_ç = \dot{m}\left(h_2 - h_1\right) \tag{3.40}$$

$$\sum Q_g - \sum Q_ç = \dot{m}_{yoğ.}\left(h_ç - h_g\right) \tag{3.41}$$

$$\sum Q_g - \sum Q_ç = \dot{m}_{yoğ.} h_{fg} \tag{3.42}$$

$$\sum Q_g = Q_{Panel,top} \tag{3.43}$$

$$\sum Q_ç = Q_{kay.} + Q_{rad.} + Q_{taş.} \tag{3.44}$$

$$Q_{panel,top} = \dot{m}_{yoğ.} h_{fg} + Q_{kay.} + Q_{rad.} + Q_{taş.} \tag{3.45}$$

Özetle Eşitlik 3.45'deki belirtiği şekilde enerji dengesi kurulabilir.

Soğutucu palakadan belli sıcaklıklarda şartlandırılmış suyun geçmesiyle belli yüzey sıcaklığına ve soğutma kapasitesine ulaşır.

Şartlandırılmış sudan soğutucu plakaya transfer olan toplam ısı akısı Eşitlik (3.46) şeklinde ifade edilebilir.

$$\dot{q}_{panel,top} = \frac{\dot{m}_{su} C_p \Delta T_w}{A} \left(\mathrm{W} / m^2 \right) \tag{3.46}$$

Yoğuşturucu plakanın toplam soğutma kapasitesi $\dot{q}_{panel,top}$ yoğuşturucu plakanın hemen girişindeki ve çıkışındaki noktalardaki sıcaklıkların (T_{w1} ve T_{w2}) ve hat üzerine konumlandırılan ultrasonik debimetreden plakaya giden su debisinin ($\dot{m}_{su}$) ölçümüyle hesaplanmıştır. Burada C_p (kj/kg.K) suyun özgül ısısı ve ΔT_w (K) suyun yoğuşturucuya giriş-çıkış sıcaklık farkları, A ise yoğuşturucu plakanın alanıdır.

Eşitlik (3.46)'deki C_p (kj/kg.K) suyun özgül ısısı tablolardan okunmuştur.

Soğutucu plaka, yüzeyinden duyulur ve gizli ısı transferi ile akışkanın enerjisini deney mahaline aktarır. Duyulur ısı transferi mahal içerisine iki şekilde aktarılır; soğutulmayan yüzeylere olan ışınımla ve havaya olan taşınımla.

Aynı zamanda plakanın arka yüzeyinden temas ettiği yüzeye bir miktar iletimle ısı kaybı da meydana gelir.

Bu durumda mahal içerisine olan net ısı transferi:

$$\dot{q}_{panel,net} = \frac{\dot{m}_{su} C_p \Delta T_w}{A} - \dot{q}_{kay} \left(\mathrm{W} / m^2 \right) \tag{3.47}$$

$\dot{q}_{kay}$ plakanın arka yüzeyinden okunan T_{ins} (T_{s7}) sıcaklık değeri ve plakanın oturduğu duvarın dış yüzeyinden okunan T_{dis} (T_{s8}) sıcaklıkların farkından ve duvarın ısı transfer katsayısından U_d ($W/m^2.K$) Eşitlik (3.48)'deki şekilde hesaplanır.

$$\dot{q}_{kay} = -\mathrm{k}\frac{dT}{dx}\Big]_{ins} = \mathrm{U}_d\left(T_{dış} - T_{ins}\right) \tag{3.48}$$

Burada h_{top} (W/m^2.K) ışınımla ve taşınımla olan toplam ısı transfer katsayısını, T_s (K) yoğuşturucu yüzey sıcaklığını, T_{op} (K) operatif sıcaklığını, $\dot{q}_{kay}$ (W/m^2) plakadan olan ısı kaybı akısını ifade etmektedir.

Plakadan mahale taşınımla ve ışınımla aktarılan net ısı transferi aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir:

$$\dot{q}_{panel,net} = h_{top}\left(T_s - T_{op}\right) = h_r\left(T_{AUST} - T_s\right) + h_c\left(T_a - T_s\right) \tag{3.49}$$

Eşitliğin sağ tarafındaki ilk ifade yoğuşturucu plakadan ısıtılmayan yüzeylere olan ışınımla olan ısı transferini, ikinci ifade taşınımla olan ısı transferini ifade etmektedir.

Buradaki T_a (K) mahal içerisindeki hava sıcaklığını, T_{AUST} (K) soğutulmayan yüzeylerin ortalama sıcaklığıdır. h_c (W/m^2.K) taşınımla, h_r (W/m^2.K) ışınımla olan ısı transfer katsayısıdır. Hesaplamalarda mahalin tam ortasındaki sensörden okunan hava sıcaklığı kullanılmıştır.

Duyulur ısı transfer terimlerinin toplanmasıyla plakadan olan toplam duyulur ısı transfer miktarı Eşitlik (3.50) ve Eşitlik (3.51)'deki şekillerde ifade edilebilir.

$$\dot{q}_{duy} = h_{top}\left(T_s - T_{op}\right) + \dot{q}_{kay} \tag{3.50}$$

$$\dot{q}_{duy} = h_r\left(T_{AUST} - T_s\right) + h_c\left(T_a - T_s\right) + U_d\left(T_{dış} - T_{ins}\right) \tag{3.51}$$

Gizli transferi ise şu şekilde gerçekleşir: Yapılan kabule göre mahal içerisindeki nemli hava ilk önce soğuk yüzeye sahip duvar ile temas oluşturur ve sonradan denge oluşana yoğuşma devam eder.

İlk önce duyulur ısı transferi gerçekleşir. T_∞ sıcaklığına sahip nemli hava yüzeye temas ettiğinde φ_∞ bağıl nemi sabit kalacak şekilde sıcaklığı duvar yüzey sıcaklığı olan T_s değerine düşer. Daha sonra nemli havanın bağıl nemi φ_∞ sabit T_s sıcaklığında φ_s değerine düşerek gizli ısı transferi de gerçekleşmiş olur.

Yoğuşmaya bağlı olarak plakadan olan gizli transferi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\dot{q}_{giz} = \frac{\dot{m}_v h_{fg}\left(T_s\right)}{A} \tag{3.52}$$

Burada $\dot{m}_v$ yoğuşan su buharı akısı, $h_{fg}\left(T_s\right)$ duvar yüzey sıcaklığındaki su buharının faz değişim entalpisidir ve tablolardan okunmuştur.

Soğutucu plakadan transfer olan toplam ısı transferi ise ışınım, taşınım ve gizli ısı transferi şeklindedir. Soğutucu plaka ile oda içerisindeki genel enerji dengesi aşağıdaki şekillerde ifade edilebilir:

$$\frac{\dot{m}_{su} C_p \Delta T_w}{A} = h_{top}\left(T_s - T_{op}\right) + \frac{\dot{m}_v h_{fg}\left(T_s\right)}{A} + U_d\left(T_{dış} - T_{ins}\right) \quad \left(W/m^2\right) \tag{3.53}$$

Eşitlik (3.53) düzenlendiğinde en genel enerji dengesi:

$$\frac{\dot{m}_{su} C_p \Delta T_w}{A} = h_r\left(T_{AUST} - T_s\right) + h_c\left(T_a - T_s\right) + \frac{\dot{m}_v h_{fg}\left(T_s\right)}{A} + U_d\left(T_{dış} - T_{ins}\right) \quad \left(W/m^2\right) \tag{3.54}$$

Eşitlik (3.54) ölçümlerin ortalamasının alındığı zaman aralığı ile çarpıldığında Eşitlik (3.55) elde edilir. Deneylerde dt zaman adımı ölçüm verilerinin değişmediği maksimum zaman adımı olan 30 dakika seçilmiştir.

$$dt.\left[\frac{\dot{m}_{su} C_p \Delta T_w}{A} = h_r\left(T_{AUST} - T_s\right) + h_c\left(T_a - T_s\right) + \frac{\dot{m}_v h_{fg}(T_s)}{A} + U_d\left(T_{dış} - T_{ins}\right)\right].dt \tag{3.55}$$

Her bir zaman aralığında Eşitlik (3.55)'deki ölçülen bütün değişkenlerin 30 dakikalık aralıklardaki ortalamaları kullanılmıştır. Bu durumda Eşitlik (3.55) yeniden aşağıdaki formu alır:

$$\frac{\dot{m}_{su} c_p \Delta T_w}{A} = h_r\left(T_{AUST} - T_s\right) + h_c\left(T_a - T_s\right) + \frac{\dot{m}_v h_{fg}(T_s)}{A.dt} + U_d\left(T_{dış} - T_{ins}\right) \quad \left(W/m^2\right) \tag{3.56}$$

Eşitlik (3.56)'nın sol tarafındaki ilk ifade olan toplam plakadan olan ısı transferi plakaya giren-çıkan su sıcakları sıcaklıkları ve debisi ölçülerek hesaplanır. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk ifade olan ışınım olan ısı transferi ölçülen yüzey sıcakları yardımıyla hesaplanır. Eşitliğin sağ tarafındaki 3. ifade olan gizli ısı transferi 30 dakikalık aralıkta yoğuşan toplam su buharı miktarın zaman adımına bölünmesiyle hesaplanır. Eşitliğin sağ tarafındaki 4. ifade olan plaka ısı kaybı hesabı ölçülen plaka arka yüzey sıcaklığı, duvar dış yüzey sıcaklığı ve duvar U_d kullanılarak hesaplanır.

3.4.2 Yoğuşturucu Plaka Isı Akıları ve Isı Transfer Katsayıları Hesabı

Bu bölümde duyulur ve gizli ısı transfer miktarları ve ısı transfer katsayıları hesaplama yöntemleri incelenmiştir.

3.4.2.1 Işınım Isı Transfer Katsayısı Hesabı

Işınımla olan ısı transfer katsayısının hesabında kullanılan ısıtılmayan yüzeylerin ortalama sıcaklıkları (AUST) yüzeyler arasındaki görme faktörleri kullanılarak hesaplanmıştır [167, 168]. Yoğuşturucu yüzeyinden tek bir notadan (T_s), soğutulmayan duvar yüzeyindeki sıcaklıklar (T_{AUST}) her bir yüzeyin ortasına yerleştirilen K-tipi sıcaklık sensörleriyle yapılmıştır.

Isıtılmayan yüzeylerin ortalama sıcaklıkları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$AUST = \sqrt[4]{\sum_{j=1}^{n}\left(F_{s-j}\ T_j^4\right)} \tag{3.57}$$

Görme faktörü ifadesi:

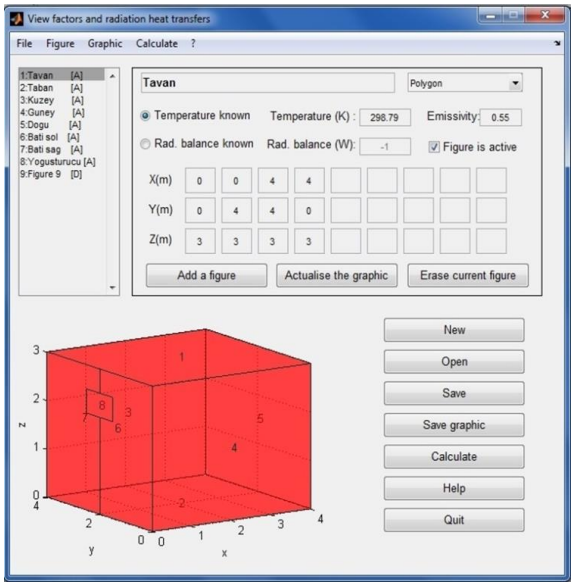
$$F_{\varepsilon_{s-j}} = \frac{1}{\left[\left(1-\varepsilon_s\right)/\varepsilon_s\right]+\left(1/F_{s-j}\right)+\left(A_s/A_j\right)\left[\left(1-\varepsilon_j\right)/\varepsilon_j\right]} \tag{3.58}$$

$$F_{s-j} = \frac{1}{A_i}\int_{A_i}\int_{A_j}\frac{\cos\theta_i\cos\theta_j}{\pi R^2}dA_i dA_j \tag{3.59}$$

Işınımla ısı transfer katsayısı yüzeyler arasında gerçekleşen net ısı transferi hesaplanarak elde edilir. Yoğuşturucu plaka ile soğutulmayan yüzeyler arasında gerçekleşen ısı transferi Eşitlik (3.60) kullanılarak hesaplanır.

$$\dot{q}_{rad} = h_r\left(T_{AUST}-T_s\right) = \sigma\sum_{j=1}^{n}F_{\varepsilon_{s-j}}\left(T_s^4-T_j^4\right) \tag{3.60}$$

Eşitlik (3.60)'nin sağ tarafındaki ifade görme faktörleri ve yüzeyler arasındaki ışınımla olan ısı transferleri MatLab programında üç boyutlu olarak çizilen oda modelinde, oda yüzeyleri ve ölçülen yüzey sıcaklıkları tanımlanarak hesaplanmıştır (Şekil 3.50).



Şekil 3.50 Matlab ışınım hesap programı

Programda yapılan hesaplamalara göre yüzeyler arasındaki görme faktörleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Kullanılan programdaki çizim özelliğinden dolayı, yoğuşturucu plakanın bulunduğu batı duvar yüzeyi iki yüzey (Batı-1, Batı-2) olarak tanımlandığından görme faktörleri ve ısı transferi ayrı-ayrı hesaplanarak incelenmiştir.

Çizelge 3.6 Yüzeyler arasındaki görme faktörleri

Yüzeyler	Tavan	Zemin	Kuzey Duvar	Güney Duvar	Doğu Duvar	Batı-1 Duvar	Batı-2 Duvar	Plaka
Tavan	0,0000	0,2827	0,1793	0,1793	0,1793	0,0841	0,0841	0,0112
Zemin	0,2827	0,0000	0,1793	0,1793	0,1793	0,0871	0,0871	0,0052
Kuzey Duvar	0,2391	0,2391	0,0000	0,1628	0,1795	0,0421	0,1312	0,0062
Güney Duvar	0,2391	0,2391	0,1628	0,0000	0,1795	0,1312	0,0421	0,0062
Doğu Duvar	0,2391	0,2391	0,1795	0,1795	0,0000	0,0777	0,0777	0,0075
Batı-1 Duvar	0,2339	0,2423	0,0879	0,2738	0,1621	0,0000	0,0000	0,0000
Batı-2 Duvar	0,2339	0,2423	0,2738	0,0879	0,1621	0,0000	0,0000	0,0000
Plaka	0,3577	0,1664	0,1481	0,1481	0,1796	0,0000	0,0000	0,0000

Eşitlik (3.60)'den ışınım ısı transfer katsayısı (h_r) çekilirse;

$$h_r = \frac{\dot{q}_{rad}}{T_{AUST} - T_s} = \frac{\sigma \sum_{j=1}^{n} F_{\varepsilon_{s-j}} \left(T_s^4 - T_j^4 \right)}{T_{AUST} - T_s} \tag{3.61}$$

3.4.2.2 Toplam duyulur ısı transfer katsayısı hesabı

Yoğuşturucu plakadan mahal içerisine ışınımla ve taşınımla olan toplam ısı transfer miktarı Eşitlik (3.62)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{q}_{duy} = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{taş} \tag{3.62}$$

Buradan h_{top} çekilirse,

$$h_{top} = \frac{\dot{q}_{duy}}{T_{op} - T_s} \tag{3.63}$$

h_{top} ölçümler sonucunda hesaplanan $\dot{q}_{duy}$ ve ölçülen operatif sıcaklık (T_{op}) ve yoğuşturucu yüzey sıcaklığından direkt olarak hesaplanabilmektedir. Operatif sıcaklık ifadesi Eşitlik (3.64)'deki şekilde hesaplanır [167].

$$T_{op} = \frac{\left(h_r x T_{MRT}\right) + \left(h_c x T_a\right)}{h_r + h_a} \tag{3.64}$$

3.4.2.3 Taşınımla Olan Isı Transferi Katsayısı Hesabı

Taşınımla olan ısı transferi miktarı, hesaplanan ışınımla olan ısı transferi miktarını, hesaplanan toplam ısı transferi miktarından çıkartılarak hesaplanmıştır:

$$\dot{q}_{taş} = \dot{q}_{top} - \dot{q}_{rad} \tag{3.65}$$

Yoğuşturucu plaka ile oda arasında hava sıcaklığı ve yüzey sıcaklığına bağlı olarak gerçekleşen taşınımla olan ısı transferi Eşitlik (3.66)'deki şekilde hesaplanmıştır:

$$h_c = \frac{\dot{q}_{taş}}{T_a - T_s} \tag{3.66}$$

3.4.2.4 Yoğuşma Isı Transferi Katsayısı Hesabı

Hesaplanan gizli ısı transfer miktarı kullanılarak yoğuşma ısı transfer katsayısı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\dot{q}_{giz} = h_{yoğ}\left(T_{b,sat} - T_s\right) \tag{3.67}$$

$$h_{yoğ} = \frac{\dot{q}_{giz}}{T_{b,sat} - T_s} \tag{3.68}$$

Burada $h_{yoğ}$ (W/m^2.K) yoğuşma ısı transfer katsayısı, $T_{b,sat}$ (K) sınır tabaka dışındaki havanın plaka yüzey sıcaklığındaki doyma sıcaklığıdır. Yoğuşma ısı transfer katsayısı yoğuşan su buharı miktarından hesaplanan gizli ısı transferi $\dot{q}_{giz}$, ölçülen yoğuşturucu plaka sıcaklığı (T_s) ve bu sıcaklık hesaplanan hava doyma sıcaklığı ($T_{b,sat}$) kullanılarak Eşitlik (3.68)'den hesaplanmıştır. Çalışmalarımızda sıvı filminin direncinin etkisi ihmal edilmiştir.

3.4.3 Eş zamanlı Isı ve Kütle Geçişi, Isı ve Kütle Taşınım Katsayıları Hesabı

Bu bölümde eş zamanlı ısı ve kütle geçişi ve kütle taşınım katsayıları incelenmiştir.

3.4.3.1 Doğal Taşınım ve Kaldırma Kuvveti Etkili Akışlar

Doğal taşınım ve kaldırma kuvveti etkili akış ifadeleri aşağıdaki şekildedir.

Kaldırma Kuvveti

Momentum ve enerji geçişini tanımlayan Eşitlikler korunum ilkelerinden elde edilir. Doğal ısı taşınımı, akışkan içindeki yoğunluğun, değişimi sonucunda yerçekimi ivmesi nedeniyle ortaya çıkar. Gerçekte yoğunluğun sıcaklıkla $\Delta\rho$ kadar değişiminin, durgun bölgedeki ρ_∞ yoğunluğuna oranı $\frac{\Delta\rho}{\rho_\infty} << 1$ çok küçüktür. Fakat bu küçük değişim, momentum eşitliğindeki dış kuvveti oluşturur.

Momentum eşitliğindeki basınç ifadesi $\frac{\partial p_\infty}{\partial y} = -\rho_\infty \cdot g$ şeklinde ifade edilir.

Momentum eşitliklerinde Boussinesq yaklaşımı kullanılmıştır. Boussinesq yaklaşımı yoğunluk değişiminin akışkan hareketini gerçekleştiren kaldırma kuvvetine etkisini göz ününe alan yaklaşımdır ve iki kısımdan oluşur. Birinci olarak, momentum eşitliğindeki yoğunluk terimi dışındaki bütün terimlerde, sıcaklığın fiziksel özelliklere olan etkisi ihmal edilir; ikinci olarak yoğunluğun sıcaklıkla değişimi:

$$\Delta\rho = \rho_\infty - \rho = \rho\beta(T - T_\infty) \tag{3.69}$$

Hesaplanır. Bu eşitlikte:

$$\beta = \frac{1}{\nu}\left(\frac{d\nu}{dT}\right)_P = \frac{1}{\nu_\infty}\frac{\nu - \nu_\infty}{T - T_\infty} = \frac{\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_\infty}}{\frac{1}{\rho_\infty}}\frac{1}{T - T_\infty} = \frac{\rho_\infty - \rho}{\rho(T - T_\infty)} = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{d\rho}{dT}\right)_P \tag{3.70}$$

Yazılabilir.

β akışkanın sıcaklık farkına bağlı hacimsel ısıl genleşme katsayısıdır. İdeal gazlarda $\beta = 1/T$ değerinde olup, T Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır.

Doğal taşınımla kütle geçişinin bir türü, yüzeyde oluşan yoğuşmayı artıran ısı kaynaklı doğal taşınım akışlarıdır. Düşey plaka yüzeyinde gerçekleşecek yoğuşma çevresindeki havanın sıcaklığından düşük olması durumunda oluşacak doğal taşınım etkisi ile artar. Bu durumda aynı anda doğal taşınımla ısı ve kütle geçişi olur. Isı ve derişiklik etkilerinin beraber olduğu bu durumda, yoğunluk farkının basit ve uygun bir yolla ifadesi aşağıdaki şekilde yapılır:

$$\Delta\rho = \rho_\infty - \rho = \rho^l \beta\left(T - T_\infty\right) + \rho^l \beta^*\left(C - C_\infty\right) = \Delta\rho_t + \Delta\rho_c \tag{3.71}$$

ρ^l =uygun bir yoğunluk seviyesi, β *ve* β^* ise seçilen ρ^l'ne göre eşitliği doğrulamak için gerekli olan değerlerdir. Geçiş süreci boyunca yoğunluk T ve C ile lineer olarak değişiyorsa, basit olarak:

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{d\rho}{dT}\right)_{p,C} \tag{3.72}$$

$$\beta^* = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{d\rho}{dC}\right)_{p,T} \tag{3.73}$$

Birçok akışkan ve akış şartları için (3.71)÷(3.73) eşitlikleri, özelikle $T_\infty - T_s$ ve $C_\infty - C_s$'nin küçük olduğu değerlerde iyi yaklaşımlardır. Isıl kaldırma etkisi için (3.70) ve (3.71) Eşitlikleri Boussinesq yaklaşımıdır.

Fakat kontrol bölgesinde, T ve C'nin büyüklüklerine göre, yoğunluk değişimi lineer değil ise, β ve β^*'ın (3.73) eşitliğinde doğru temsil edilmelerini sağlamak daha karışık olacaktır. Bu olay herhangi bir akışkanda yüksek sıcaklık ve/veya derişiklik farklarında

oluşacaktır. Örnek olarak 4 ^{0}C'de yoğunluğun en yüksek değere ulaştığı bir durumu ele alalım. $T_s = 0^0$ C ve $T_\infty = 6^0$ C için yoğunluk değişimi lineer olmayacaktır. $\beta(t)$ 6 ^{0}C'de pozitif, 4 ^{0}C civarımda sıfır, ve 0 ^{0}C'de negatif olacaktır. Bu durumda Eşitlik (3.71) deki gibi yaklaşım yeterli olmaz, bir yoğunluk eşitliği kullanılması gerekir.

Ayrıca Eşitlik (3.71)'de akışı harekete geçiren yoğunluk farkını oluşturan iki etki vardır. Bunlar ısı ve kimyasal difüzyondur. Akışı harekete geçiren toplam yoğunluk farkını sağlayan, kimyasal ve ısıl difüzyonun bağıl önemini ölçen bir " N " katsayısı tanımlanmıştır.

$$N = \frac{Gr_{LC}}{Gr_L} = \frac{\beta^*\left(C_\infty - C_s\right)}{\beta\left(T_\infty - T_s\right)} = \frac{\Delta\rho_c}{\Delta\rho_t} \tag{3.74}$$

Kütle geçişi olmaması durumunda N katsayısı sıfır, ısı geçişinin olmaması durumunda ise sonsuz olur. Her iki etkinin birbirini destekler yönde birleşerek, akışı oluşturması halinde pozitif ters yönde olmaları halinde ise negatif değer alacaktır.

3.4.3.2 Isı ve Kütle Taşınım Katsayıları

Herhangi bir akışta, analiz sonucu veya deneysel olarak, belirlenen büyüklükler ısı akısı veya hız alanı büyüklükleridir. Yüzeydeki, ısı taşınım katsayısı da ısı geçişi ve bilinen sıcaklıklar cinsinden ifade edilmiştir:

$$Q_{taş} = hA\left(T_\infty - T_s\right) \tag{3.75}$$

Burada T_0 ve T_∞ yüzey ve akışkan sıcaklıklarını, A ise akışkanla temas eden toplam yüzey alanını ifade etmektedir. Ayrıca ısı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı olarak aşağıdaki şekilde de ifade edilmiştir:

$$Nu = \frac{hL}{k} \tag{3.76}$$

Isı geçişi için kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranı boyutsuz Grashoff sayısı ile tanımlanmıştır:

$$Gr_L = \frac{g\beta\left(T_\infty - T_s\right)L^3}{\nu^2} \tag{3.77}$$

Benzer bulgular kütle geçiş katsayısı için elde edilebilir:

İçinde $C_{A,\infty}$ derişikliğinde A maddesini ihtiva eden bir akışkan, bir yüzey üzerinden akıyorsa ve yüzeyde A'nın derişikliği $C_{A0} \neq C_{A\infty}$ değerinde ise, taşınımla kütle geçişi olacaktır. Burada da A'nın mol akısı, kütle geçiş katsayısı ve derişiklik farkı ile gösterilebilir.

$$N_A = h_m A\left(C_{A,s} - C_{A,\infty}\right) \tag{3.78}$$

$$n_A = \bar{h}_m A\left(\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}\right) \tag{3.79}$$

Ayrıca taşınımla kütle geçiş katsayısı, yüzeydeki boyutsuz derişiklik gradyanı Sherwood sayısı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} \tag{3.80}$$

Kütle geçişi için kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranı boyutsuz Grashof sayısı ile tanımlanmıştır

$$Gr_{LC} = \frac{g\beta^*\left(C_s - C_\infty\right)L^3}{\nu^2} \tag{3.81}$$

3.4.3.3 İdeal Gaz Karışımları

Bir maddenin basıncı, sıcaklığı ve özgül hacmi arasındaki ilişkiyi veren bağıntıya hal eşitliği adı verilir. Bu eşitliklerin en basit ve en çok bilineni ideal gaz hal eşitliğidir. Bu eşitlik belirli sınırlar içinde gazların P-v-T ilişkisini oldukça hassas bir biçimde verir.

$$P = R\left(\frac{T}{v}\right) \tag{3.82}$$

$$R = \frac{R_u}{M} \tag{3.83}$$

Eşitlik (3.82) ideal gaz hal eşitliğidir ve eşitliğe uyan gazlar ideal gaz diye adlandırılmaktadır.

Atmosferik hava; azot, oksijen ve küçük miktarlarda başka gazlardan oluşan bir karışımdır ve bir miktar da su buharı içerir. İçinde su buharı olmayan hava ise kuru hava

olarak bilinmektedir. Atmosferik havayı su buharıyla kuru havanın bir karışımı olarak ele almak çözümlemede kolaylık sağlar çünkü kuru havanın kütlesi sabit kalırken, su buharının miktarı, buharlaşma ve yoğuşma sonucu değişir. Havadaki su buharı diğer karışanın, yani kuru havanın varlığından etkilenmez ve $Pv = RT$ ideal gaz eşitliğini sağlar. Uygulamada karşılaşılan sınırlar içinde, atmosferik hava %1'den daha az bir hatayla mükemmel bir gaz olarak kabul edilebilir. Bu durumda atmosferik hava basıncı, kuru havanın ve su buharının kısmi basınçlarının toplamı olan, ideal bir gaz karışımı olarak incelenebilir.

$$P = P_v + P_a \tag{3.84}$$

Hava ve su buharı karışımının toplam yoğunluğu ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\rho = \rho_v + \rho_a \tag{3.85}$$

$$\rho_v = \frac{P_v}{\frac{R_u}{M_V}.T} \tag{3.86}$$

$$\rho_a = \frac{P_a - P_v}{\frac{R_u}{M_a}.T} \tag{3.87}$$

Elde edilen deney verileri kullanılarak yüzey, dış ortam ve ara yüzeydeki akışkan yoğunlukları ilgili sıcaklıklar için bu eşitlikler ile hesaplanacaktır.

Bağıl Nem

Havanın içerdiği su buharı miktarının (m_v), aynı sıcaklıktaki havada bulunabilecek en çok su buharı miktarına (m_g) oranı bağıl nem olarak ifade edilir ve φ ile gösterilir.

$$\varphi = \frac{m_v}{m_d} = \frac{P_v V/(R_v T)}{P_{vd} V/(R_v T)} = \frac{P_v}{P_{vd}} \tag{3.88}$$

Bağıl nem kuru hava için 0, doymuş hava için 1 değerindedir. Yapılan deneysel çalışmada ortamın bağıl nemi ölçülmüş ve yoğunluk hesaplamalarında kullanılmıştır.

3.4.3.4 Kullanılan Hesap Yöntemi

Kütle geçişinin de olduğu ıslak halde, serbest taşınım şartlarında akışı sağlayan kaldırma kuvveti sıcaklık ve derişiklik farkından dolayı oluşmaktadır. Ortam sıcaklığında, su buharı ve kuru hava karışımı yoğunluğu ile yüzey sıcaklığındaki gaz-buhar karışımı yoğunluğu arasındaki fark, akışı sağlayan toplam yoğunluk farkıdır. Bu çalışmada karışımın yüzey ve ortam şartlarında oluşturduğu yoğunluk farkı belirlenmiş ve tek bir Grashoff sayısı ile ifade edilmiştir [157].

Hava-su buharı karışımı, ideal bir gaz olarak kabul edilmiştir. Bu durumda atmosferik hava basıncı, kuru havanın ve su buharının kısmi basınçlarının toplamı olarak ifade edilir.

$$P = P_v + P_a \tag{3.89}$$

Sınır tabakada sıcaklık ve derişiklik dağılımını lineer kabul ederek, sınır tabaka dışında, plaka yüzeyinde ve sınır tabaka ortalama sıcaklığındaki karışımın basıncı sırasıyla

$$P_\infty = P_{v,\infty} + P_{a,\infty} \tag{3.90}$$

$$P_s = P_{v,s} + P_{a,s} \tag{3.91}$$

$$P_f = P_{v,f} + P_{a,f} \tag{3.92}$$

$$P_v = \varphi . P_{v,d} \tag{3.93}$$

Deneylerden elde edilen bağıl nem verileri kullanılarak, Eşitlik (3.93) ile ortam, yüzey ve ortalama film sıcaklığındaki hava-buhar karışımında kısmi basınçlar hesaplanmıştır. Hesaplanan kısmi basınç değerleri ve ölçümler sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri yardımıyla bu noktalardaki yoğunluklar belirlenmiştir.

Sınır tabaka dışında sırasıyla, su buharı, hava ve hava-buhar karışımının yoğunlukları:

$$\rho_{v\infty} = \frac{P_{v\infty}}{\frac{R_u}{M_v}.(T_\infty + 273)} \tag{3.94}$$

$$\rho_{a\infty} = \frac{P_\infty - P_{v\infty}}{\frac{R_u}{M_a}.(T_\infty + 273)} \tag{3.95}$$

$$\rho_{\infty} = \rho_{v\infty} + \rho_{a\infty} \tag{3.96}$$

Yüzey sıcaklığında sırasıyla su buharı, hava ve hava-buhar karışımının yoğunlukları:

$$\rho_{vs} = \frac{\rho_{vs}}{\frac{R_u}{M_v}\left(T_s + 273\right)} \tag{3.97}$$

$$\rho_{as} = \frac{P_s - P_{vs}}{\frac{R_u}{M_v}\left(T_s + 273\right)} \tag{3.98}$$

$$\rho_s = \rho_{vs} + \rho_{as} \tag{3.99}$$

Ortalama film sıcaklığında sırasıyla su buharı, hava ve hava-buhar karışımının yoğunlukları:

$$\rho_{vf} = \frac{P_{vf}}{\frac{R_u}{M_v}.(T_f + 273)} \tag{3.100}$$

$$\rho_{af} = \frac{P_f - P_{vf}}{\frac{R_u}{M_a}.(T_f + 273)} \tag{3.101}$$

$$\rho_f = \rho_{vf} + \rho_{af} \tag{3.102}$$

Elde edilen yoğunluk değerleri kullanılarak karışımın yoğunluk farkı oranı ve Grashof sayısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [157]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_{\infty} - \rho_s}{\rho_f} \tag{3.103}$$

$$Gr = 9,81.L^3.\frac{\Delta\rho}{\rho}.\frac{1}{\nu^2} \tag{3.104}$$

Serbest taşınım şartlarında düşey bir plaka yüzeyinden sadece ısı geçişinin incelendiği ve hava-su buharı karışımının ideal bir gaz olarak kabul edildiği durumda, yoğunluk farkı oranına göre hesaplanan Gr sayısı ile, sıcaklık farkı ve ısıl hacimsel ısıl genleşme katsayısına bağlı hesaplanan Gr sayıları karşılaştırılmış ve değerlerin eşit olduğu belirlenmiştir.

$$Gr = g.L^3.\frac{\Delta\rho}{\rho}.\frac{1}{\nu^2} = \frac{g\beta(T_\infty - T_s)L^3}{\nu^2} \quad (3.105)$$

Bu eşitliği gösteren kuru durum için yapılan bir deneyin bulguları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 Gr sayılarının kıyaslanması

Plaka yüzey sıcaklığı, T_s	°C	11,6
Ortam Sıcaklığı, T_∞	°C	22,7
Ortalama ortam bağıl nemi, φ	%	40
Toplam yoğunluk etkisi, Δρ/ρ	-	0,038
Net ısı transferi, Q_{net}	W	15,2
Işınımla olan ısı transferi, Q_{rad}	W	12,5
Taşınımla olan ısı transferi, $Q_{taş}$	W	2,6
Nusselt sayısı, Nu	-	9,29
Taşınım katsayısı, h	$W/m^2.K$	0,47
Sıcaklık farkına göre Gr	**-**	**2,067E+08**
Yoğunluk farkına göre Gr'	**-**	**2,069E+08**

Bu bulgu yapılan yeni yaklaşımın ve hesaplamaların doğruluğunu göstermektedir. Eş zamanlı ısı kütle geçişinin incelendiği deneyler için de Gr sayısı yoğunluk farkı oranına göre (Eşitlik 3.105) hesaplanmıştır.

Hesaplanan Gr sayısı kullanılarak Ra ve $Ra^{'}$ değerleri:

$$Ra = Gr.Pr \quad (3.106)$$

$$Ra^{'} = Gr.Sc \quad (3.107)$$

Amaçlanan Nu = f(Ra), Sh= f($Ra^{'}$) formunda korelasyonların oluşturulabilmesi için Nu ve Sh sayıları da bilinmelidir. Bölüm 3.4.1'de detaylandırılan düşey bir plaka için enerji eşitlikleri kullanılarak Nu ve Sh sayıları hesaplanır.

Kütle taşınım katsayısının hesaplanabilmesi için ise Q_{giz} değeri kullanılır. Yoğuşmadan kaynaklanan ısı geçişi yüzey ile ortam şartları arasındaki derişiklik farkından kaynaklanmaktadır ve yoğunluk değerleri ile Eşitlik 3.108 ile ifade edilir.

$$Q_{giz} = h_m h_{fg} \Delta\rho_c A \quad (3.108)$$

$$\Delta\rho_c = \rho_{v,\infty} - \rho_{v,s} \quad (3.109)$$

$$h_m = \frac{Q_{giz}}{h_{fg}\Delta\rho_c A} \tag{3.110}$$

Elde edilen kütle ve ısı taşınım katsayıları kullanılarak Nu ve Sh sayıları deneysel belirlenir.

$$Nu_L = \frac{h.L}{k} \tag{3.111}$$

$$Sh_L = \frac{h_m.L}{D_{AB}} \tag{3.112}$$

Yapılan tüm hesaplamalarda yoğunluk dışındaki tüm fiziksel değerler ortalama film sıcaklığında alınmıştır. Film sıcaklığı da ortalama sıcaklık olarak kabul edilmiş ve Eşitlik (3.113) ile hesaplanmıştır.

$$T_f = T_s + 0,5\left(T_\infty - T_s\right) \tag{3.113}$$

Enerji dengesi, duyulur ve gizli ısı transferleri, ısı transfer katsayıları ve boyutsuz Nu, Ra, Sh hesaplarında oluşturulan Excel hesap şablonu oluşturulmuştur. Isı transferi hesaplarında ve bağıntıların oluşturulması için gerekli değerler her deney için ayrı hesaplanmıştır.

BÖLÜM 4

DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde Bölüm 3'de detaylı olarak anlatılan deneysel yöntem kullanılarak elde edilen bulgular detaylı olarak irdelenmiştir.

Yoğuşma deneylerinde toplamda 10 farklı deneysel çalışma yürütülmüştür. Yürütülen deneysel çalışmalarda iki farklı parametre incelenmiştir. Bunlar: Farklı yoğuşturucu plaka yüzey sıcaklığı ve farklı başlangıç bağıl nem değeridir. Farklı yüzey sıcaklığı ve farklı başlangıç bağıl nem değerleri için, plaka üzerinde gerçekleşen yoğuşma miktarları, yoğuşma akıları ve kütle transfer katsayıları incelenmiştir. Farklı yüzey sıcaklığı deneylerinde ise plaka üzerinde gerçekleşen duyulur ve gizli transfer miktarları ve ısı transfer katsayıları incelenmiştir. Ayrıca yoğuşmanın olduğu tüm deneylerde düşey plakada serbest taşınım şartlarındaki ısı kütle-geçişi incelenmiş ve Ra-Sh ve Ra-Nu bağıntıları oluşturulmuştur.

Yoğuşma deneylerinde yürütülen deneysel çalışmaların özeti Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Yürütülen yoğuşma deneyleri

Sınır Şartları		**Farklı Plaka Yüzey Sıcaklığı**					**Farklı Başlangıç Bağıl Nem Oranı**				
		D1	**D2**	**D3**	**D4**	**D5**	**D6**	**D7**	**D8**	**D9**	**D10**
T_s	(°C)	10,5	10,9	11,4	12,3	13	14	10,5	10,5	10,5	10,5
$\varphi_{H,0}$	(%)	75	75	75	75	75	75	85	80	70	65
$T_{a,0}$	(°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
$T_{sw,0}$	(°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

Yoğuşmanın olmadığı durum deney için 5 farklı yüzey sıcaklığı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular kullanılarak Ra-Nu bağıntısı oluşturulmuştur.

Yoğuşmanın olmadığı kuru durum için yapılan deneyler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Yürütülen kuru deneyler

Sınır Şartları		**D11**	**D12**	**D13**	**D14**	**D15**
T_s	(°C)	11,5	11,7	14,3	14,9	17,5
$\varphi_{H,0}$	(%)	40	40	40	40	40
$T_{a,0}$	(°C)	25	25	25	25	25
$T_{sw,0}$	(°C)	25	25	25	25	25

Yapılan deneysel çalışmaların bulguları dört bölümde incelenecektir:

- Yoğuşma deney bulguları
- Sayısal modelin doğrulanması
- Serbest Taşınım Şartlarında Düşey Plakada Sadece Isı Geçişinin İncelenmesi
- Serbest taşınım şartlarında düşey plakada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelenmesi

4.1 Yoğuşma Deney Bulguları

Bu bölümde yoğuşturucu plaka üzerinde su buharın yoğuşması esnasında gerçekleşen kütle transferi bulguları incelenmiştir.

Bu bölümde yoğuşturucu plaka üzerinde su buharın yoğuşması esnasında gerçekleşen kütle transferi bulguları incelenmiştir.

Her bir deney için aşağıdaki parametreler incelenmiştir:

- Zamana bağlı yoğuşma debilerinin incelenmesi
- Toplam yoğuşma miktarlarının kıyaslanması
- Yoğuşma akılarının su buharı kısmi basınç farklarına göre ifadesi

Plaka yüzeyinde gerçekleşen yoğuşma miktarı 1 dakika aralıkla alınan ölçümler ile incelenmiştir. Zamana bağlı bulgularda ise, Bölüm 3'de de bahsedildiği gibi belirlenen zaman adımı olan her 30 dakika boyunca alınan verilerin ortalamaları kullanılmıştır. Yoğuşma akısının hesabında da aynı şekilde 30 dakikada yoğuşan toplam su buharı miktarının birim zaman adımına bölünmesiyle yoğuşma debisi hesaplanmıştır. Çizelge

4.3'de kütle transferi deney bulgularının özeti yer almaktadır. Tablodaki yoğuşma debi ve akıları 900 dakika boyunca alınan verilerin ortalamasıdır.

Çizelge 4.3 Ortalama değerlere göre yoğuşma deney bulguları

Ölçümler		**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**D5**	**D6**	**D7**	**D8**	**D9**	**D10**
$T_{s,ort}$	(°C)	10,6	10,9	11,4	12,2	13,0	14,0	10,4	10,3	10,3	10,7
$T_{a,ort}$	(°C)	22,9	23.1	23.1	23,4	23,3	23,5	23,1	23,1	22,9	23,3
$m_{top,yoğ}$	(g)	246,6	228,1	227,2	207,9	177,0	156,6	323,4	289,0	188,1	167,7
$\dot{m}_{yoğ}$	(kg/s) x10^{-5}	0,45	0,42	0,41	0,38	0,32	0,29	0,60	0,53	0,33	0,31
$\dot{m}_{yoğ,akı}$	(kg/m^2.s) x10^{-5}	0,9	0,84	0,82	0,76	0,64	0,58	1,2	1,06	0,66	0,62

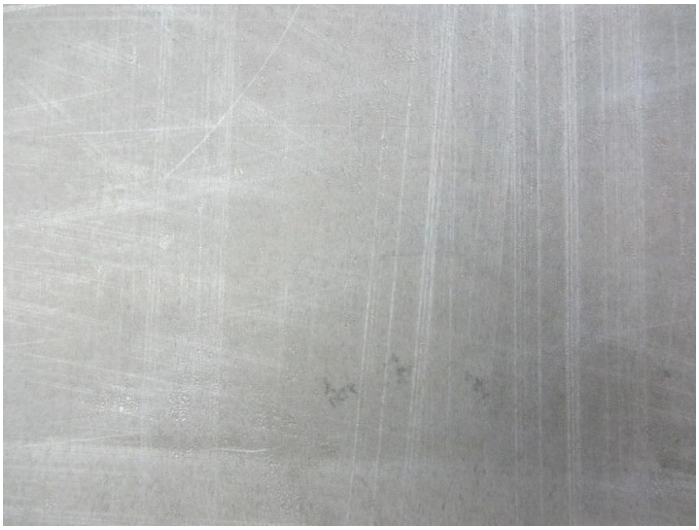
Çizelde 4.3'de $T_{s,ort}$ ortalama yüzey, $T_{a,ort}$ ortalama hava sıcaklığını, $m_{top,yoğ}$ toplam yoğuşma miktarı, $\dot{m}_{yoğ}$ ortalama yoğuşma debisi, $\dot{m}_{yoğ,akı}$ ortalama yoğuşma akısını ifade etmektedir.

Tüm deneylerde görülen ortak bulgu doyma sıcaklığının altında yüzey sıcaklığına sahip yoğuşturucu plaka üzerinde su buharının yoğuşmasıyla mahal içerisindeki bağıl nem oranı zamanla azalmaktadır. Bu azalma başlangıçta hızlı iken bağıl nem değerinin belli bir değerin altına düşmesiyle bağıl nemdeki düşüş miktarı da azalmıştır.

Yoğuşma debisi ise, gerçekleşen yoğuşmaya bağlı olarak hava içerisindeki su buharının kütle oranının azalmasıyla zamana bağlı olarak azalmıştır. Yoğuşma debisinin azalmasının diğer önemli nedeni ise, yoğuşturucu plaka yüzeyine yakın bölgelerde kuru hava miktarının zamanla birikmesi ve kuru havanın su buharı difüzyonuna direnç oluşturmasıdır.

Yoğuşma dinamiklerinin daha iyi anlaşılması adına Deney-1 şartlarında özel bir deney yapılarak deney süresince ara ara görseller alınmıştır. Plaka üzerinde zamana bağlı gerçekleşen yoğuşma aşağıdaki görseller üzerinden şu şekilde yorumlanabilir:

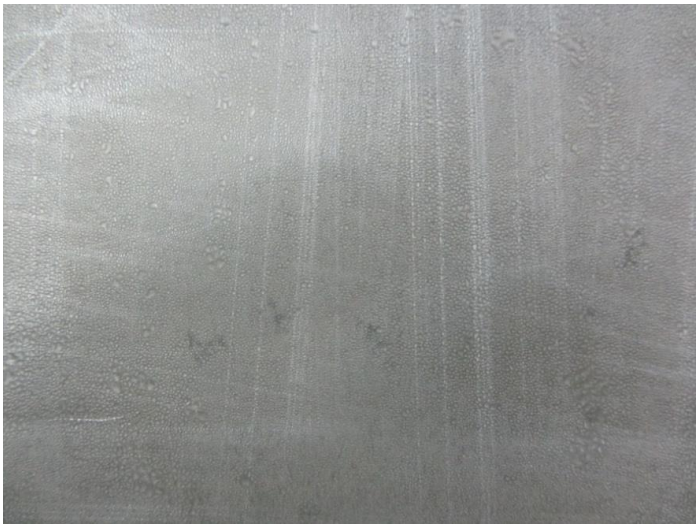
Yoğuşturucu plaka yüzeyi istenilen yüzey sıcaklık şartlarına gelmesiyle plaka yüzeyinde sıvı filmi oluşmaya başlamıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Plaka üzerinde yoğuşma 30. dakika

Yüzey hidrofik özelliklere sahip olmasına rağmen yüzeyde damlacıklar oluşana kadar sıvı film kalınlığı artmıştır. Sıvı film kalınlığı deneyler sırasında ölçülmemiştir fakat 0,1 mm mertebeleri civarında olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda da bu sıvı filminin düşey plakada doğal taşınım şartlarında kalınlığının 0,1 mm'nin altında olduğu belirtilmiştir [139]. Ayrıca literatürde oluşan bu sıvı filminin oluşturduğu termal direncin ara yüzey sıcaklık düşüne olan etkisinin 0,003 K mertebelerinde olduğu belirtilmiştir [150].

60. dakikadan sonra sıvı filmi belli bir süre kalınlaştıktan sonra yoğuşmanın devam etmesiyle beraber yüzeyde küçük damlacıklar oluşmaya başlamıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Plaka üzerinde yoğuşma 60. dakika

Yüzeyde oluşan küçük damlacıklar zamanla büyüyerek daha büyük damlacıklar oluşturmaya ve yerçekiminin etkisiyle hareket ederek teraziye dolmaya başlamıştır. Yüzeydeki filmin damlacığa dönüşmesi ve yoğuşan suyun terazide toplanmaya başladığı süre, plaka yüzey sıcaklığı ve mahal içerisindeki bağıl nem miktarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Daha düşük plaka yüzey sıcaklıklarında ve daha yüksek bağıl nem değerlerinde yoğuşma hızı ve miktarının artmasına bağlı olarak yüzeylerde damlacık oluşumu ve yoğuşan suyun teraziye ulaşması da hızlanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Plaka üzerinde yoğuşma 75. dakika

İlk damlacıkların oluşması esnasında plaka üzerindeki homojene yakın damlacık oluşumu, zamanla komşu damlacıkların birleşmesiyle plaka üzerinde damla boyutlarının artmasına sebebiyet vermiştir. Bu yüzden ilk damlacık oluşumundan belli zaman sonra yüzeylerdeki damlacık boyut dağılımı heterojen hal almıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Plaka üzerinde yoğuşma 90. dakika

Belli boyuta ulaşan su damlalarının teraziye hareket etmesiyle beraber damlaların geçtiği yüzeylerde sıvı filmin ortadan kalktığı görülmüştür. Damlaların yüzeyde sıvı filmini de kendisine katarak sürüklemesiyle damla büyüklüğünün arttığı ve sonrasında bölünerek yeni damlacıklar oluşturarak teraziye hareket ettikleri görülmüştür. Damlacıkların var olan sıvı filmini de sürükleyerek teraziye götürmesi, yoğuşma debilerinde anlık salınımlara sebep olmuştur (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Plaka üzerinde yoğuşma 120. dakika

Damlaların yüzeydeki sıvı filmini süpürmesiyle ve su buharının yüzeyde sürekli yoğuşmasına bağlı olarak yeni sıvı filmi oluşmakta ve sonrasında bu sıvı film gelişerek yeni damlacıklar oluşturmakta, bu damlacık belli bir büyüklüğü ulaşmasıyla teraziye hareket ettiği görülmüştür. Bu döngü deneyler süresince tekrarlanmıştır. Yoğuşma debisinin azalmasıyla bu döngünün gerçekleşme süresi de uzamıştır. Bu dakikadan sonra aynı anda yoğuşturucu plakanın bir bölgesinde sıvı film gelişirken, bir bölgesinde damlacık oluşmakta ve gelişmekte ve diğer bir bölgesinde damlacığın yeterli büyüklüğe ulaşmasıyla harekete başladığı görülmüştür (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Plaka üzerinde yoğuşma 150. dakika

Zamanla yoğuşma akısının azalmasıyla yüzeyde sıvı film gelişmesi de azalmakta ve buna bağlı olarak damlacık oluşum hızı azalmaktadır. Şekil 4.7'den de görüldüğü gibi yeni film oluşum hızının yavaşlamasına bağlı olarak damlacık sayısının azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.7 Plaka üzerinde yoğuşma 180. dakika

Deneylerin başında hemen hemen tüm yüzeylerden teraziye yoğuşan suyun hareket ettiği görülürken, zamanla sıvı filminin gelişiminin yavaşlamasına bağlı olarak bazı bölgelerde yoğuşan suyun harekenin olmadığı görülmüştür (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Plaka üzerinde yoğuşma 210. dakika

Yoğuşan miktarın zamana bağlı sürekli azalmasıyla ve film oluşumun yavaşlamasıyla başlangıçta görülen küçük boyutta fakat sayısı çok olan damlacık yerine damlacık boyutu büyük ve sayısı az damlacıkların oluştuğu görülmüştür. Oluşan damlacıkların önünde büyüyerek hareket edeceği sıvı film olmamasından dolayı hareket etmesi de yavaşlamıştır. Bu durum yüzeyde bir miktar yoğuşan suyun depolanmasına sebebiyet vermiştir. (Şekil 4.9, Şekil 4.10).



Şekil 4.9 Plaka üzerinde yoğuşma 240. dakika



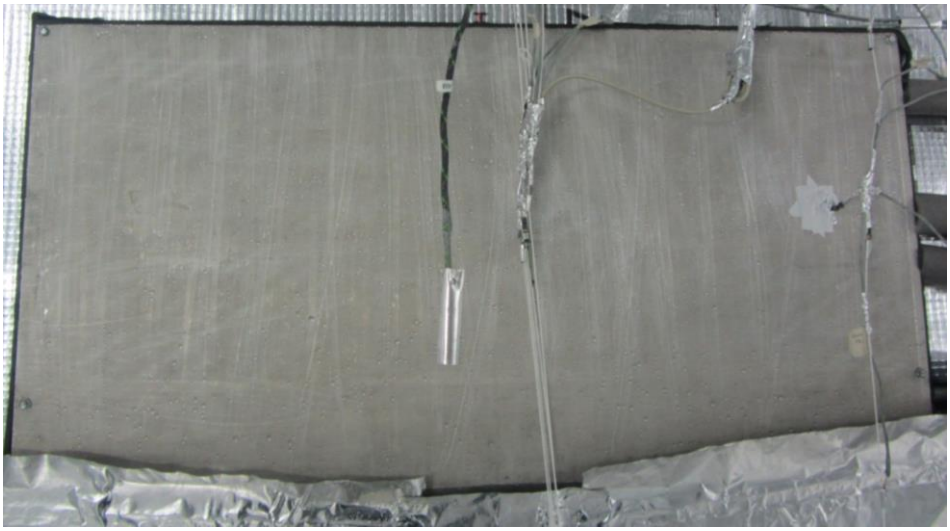
Şekil 4.10 Plaka üzerinde yoğuşma 300. dakika

Yüzeyde yoğuşmanın iyice azalmasına bağlı olarak film oluşum hızı başlangıca kıyasla ciddi oranda azalmış ve sonucunda damlacık sayısı yani teraziye gelen su miktarı zamanla azalmıştır (Şekil 4.11).



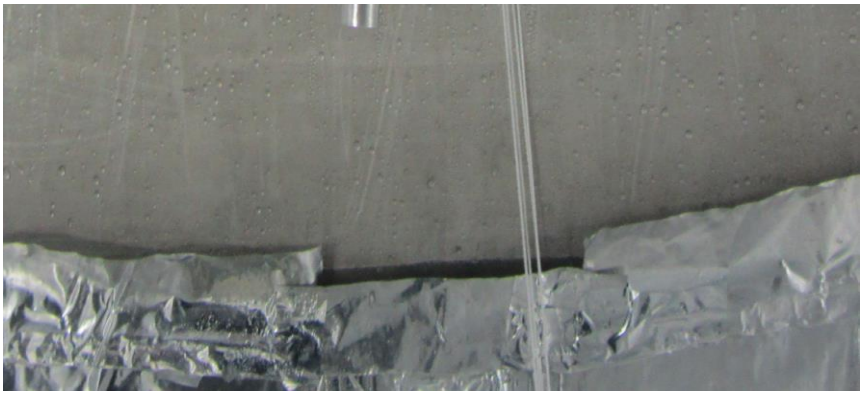
Şekil 4.11 Plaka üzerinde yoğuşma 480. dakika

Şekil 4.12'de plaka üzerindeki genel yoğuşma durumu görülmektedir. Plaka yüzeyinde homojen ve kararlı sıcaklık dağılımı sayesinde tüm plaka yüzeyinde deneyler boyunca yoğuşma gerçekleştiği görülmüştür. Alınan izolasyon önlemleri sayesinde de plakanın ön yüzeyi dışındaki hiçbir bölgede yoğuşma gerçekleşmemiştir.



Şekil 4.12 Plaka üzerinde genel yoğuşma görünümü

Şekil 4.13'de yoğuşan suyun kanallarda toplanması görülmektedir. Deneysel yöntem bölümünde detaylandırılan önlemler sayesinde yoğuşan suyun buharlaşma dışında tamamı hassas terazide toplanabilmiştir.



Şekil 4.13 Plaka üzerinde yoğuşan suyun toplanması

4.1.1 Zamana Bağlı Yoğuşma Debilerinin İncelenmesi

Bu bölümde zamana bağlı yoğuşma debilerinin incelenmesi, sayısal ve analitik hesaplamalarla karşılaştırılmaları yapılmıştır. Deneyler esnasında yüzeyde yoğuşan su buharı anlık olarak toplanıp tartılamamaktadır. Su buharı yüzeyde yoğuşmasında sonra hassas terziye ulaşıp ölçüm bulgularına dahil olması için belli bir zaman geçmektedir. Ayrıca yüzeyde damlacık ve film dağılımları homojen olmamakta ve yoğuşma belli bir düzen içerisinde gerçekleşmemektedir. Yüzeyde farklı büyüklüklerde ve sayıda dağılım gösteren damlacıklar, hareketleri sırasında daha önceden yüzeyde oluşmuş damlacıkları da hareketlendirerek anlık yoğuşma pikleri de oluşturabilmektedir.

Ölçümler esnasında teraziye belli bir süre (1-2 dakika) yüzeyde yoğuşan miktardan daha az su gelirken, belli zamanlarda yukarıda bahsedilen dinamiklerden kaynaklanan anlık yoğun su gelişi (beklenen duruma göre) olabilmektedir. Dolayısıyla küçük aralıklarda alınan ölçüm bulguları düzensiz dağılım göstermekte ve belli bir belirsizlik oluşturmaktadır.

Zamana bağlı ölçümler, hesaplamalar ilk 900 dakika için yapılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi; birim zaman aralığı 30 dakika gibi yeterli genişlikte bir zaman adımı seçilmiştir. Dolayısıyla her bir yoğuşma debisi hesaplanırken alınan 30 değerin ortalaması kullanılmıştır. Aralığın bu şekilde seçilmesiyle deneylerdeki anlık salınımlar ortadan kaldırılarak belirtilen belirsizlikler bir nebze ortadan kaldırılmıştır. Bu yöntem deneysel salınımları önemli ölçüde azaltılmasına rağmen bulgularda nedeni açıklanabilen bir miktar salınımlar yine gözlenmiştir.

Bulgulara bakıldığında beklendiği gibi tüm deneylerde zamana bağlı yoğuşma debileri belli bir eğilim ile azalmıştır. Sayısal ve analitik hesaplamalarda ise herhangi bir salınım görülmemiş, yoğuşma debilerinin zamana bağlı olarak logaritmik azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Çizelge 4.4'de görüldüğü gibi 900 dakika boyunca hesaplanan sayısal ortalama yoğuşma debisi, deneysel ortalama yoğuşma debisinden yaklaşık % 7 - % 13,5 arasında fazla çıkmıştır. Analitik olarak hesaplanan potansiyel yoğuşma debisi hesabı ise 10 deneyin 9'unda deneysel ölçümlerden % 3 ile % 6,5 arasında fazla çıkmıştır. Bir deneyde ise % 1 oranında düşük çıkmıştır. Genel eğilim olarak görünen sayısal ve analitik yoğuşma debisi hesabının deneysel akılardan fazla çıkmasının ön görülen nedeni, yüzeyde yoğuşan su buharının sıvı olarak yüzey tarafından bir miktar depolanmasıdır.

Analitik hesaplamalarda Eşitlik (4.1)'de ifade edilen su buharının difüzyonla olan kütle transferi eşitliği kullanılmıştır.

$$m_v'' = \left(m''\right)_{dv} = -\rho D \left.\frac{\partial w_v}{\partial n}\right|_{n=0} \tag{4.1}$$

Burada ρ (kg/m^3) karışımın ortalama yoğunluğu, w_v (kg_{sb}/kg_h) su buharı kütle oranı, D (m^2/s) kütle transfer katsayısıdır.

Hesaplamalarda sınır tabaka dışındaki kütle oranı ile, yüzey şartlarındaki kütle oranının yatay yöndeki dağılımı lineer kabul edilmiştir. Bu kabul ile:

$$m_v'' = \left(m''\right)_{dv} = -\rho D \frac{w_\infty - w_s}{\Delta x} \tag{4.2}$$

Burada w_∞ sınır tabaka dışındaki su buharı kütle oranı, w_s ise yüzey şartlarındaki su buharı kütle oranı, Δx ise nem sensörünün yüzeyle olan yatay yöndeki mesafesidir.

Su buharı kütle oranları ideal gaz kabulüyle aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\varphi = \frac{m_v}{m_d} = \frac{P_v V/\left(R_v T\right)}{P_{vd} V/\left(R_v T\right)} = \frac{P_v}{P_{vd}} \tag{4.3}$$

$$P_v = \varphi . P_{v,d} \tag{4.4}$$

$$w_v = 0,662 \frac{P_{v,i}}{\left(101,325 - \left(0,378 P_{v,i}\right)\right)} \tag{4.5}$$

Sınır tabaka dışındaki su buharı kütle oranının w_∞ hesaplanmasında yüzeyden yatayda 4 cm uzaklıkta bulunan nem sensöründen (H_1) alınan bağıl nem değeri ve aynı noktadan ölçülen sıcaklık değeri (T_{a4}) kullanılmıştır. Yüzey şartlarındaki su buharı kütle oranının w_s hesabında yoğuşturucu plakanın yüzeyinden ölçülen sıcaklık değeri (T_{s0}) kullanılmıştır. Su buharı doyma basınçları P_{vd} ölçülen sıcaklıklara bağlı olarak tablolardan okunmuştur.

Çizelge 4.4 Ortalama yoğuşma akısı ve yoğuşma debisi kıyaslaması

			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
Ortalama Yoğuşma Debisi - Deneysel	$\dot{m}_{yoğ,den}$	(kg/s) x 10^{-5}	0,46	0,42	0,42	0,39	0,33	0,29	0,60	0,50	0,35	0,31
Ortalama Yoğuşma Debisi - Sayısal	$\dot{m}_{yoğ,cfd}$	(kg/s) x 10^{-5}	0,51	0,47	0,45	0,42	0,36	0,31	0,66	0,58	0,40	0,33
Ortalama Yoğuşma Debisi - Hesap	$\dot{m}_{yoğ,anl}$	(kg/s) x 10^{-5}	0,47	0,44	0,42	0,40	0,35	0,30	0,63	0,54	0,37	0,32
Toplam Yoğuşma - Deneysel	$m_{yoğ,den}$	(g)	264	228	227	208	177	156	323	272	188	167
Toplam Yoğuşma - Sayısal	$m_{yoğ,cfd}$	(g)	273	254	244	225	194	169	356	313	217	180
Toplam Yoğuşma - Hesap	$m_{yoğ,anl}$	(g)	255	236	225	217	186	161	341	289	197	175

Deneylerden elde edilen yoğuşma debilerinin zamana bağlı değişimlerini incelediğimizde, tüm deneyler arasında benzer bir eğilim elde edilmiştir.

Zamanla yoğuşmanın etkisiyle mahal içerisindeki bağıl nemin azalmasıyla plaka yüzeyi ile mahal içerisindeki su buharı kısmı basınç farkları giderek azalmakta ve buna bağlı olarak yoğuşan miktar logaritmik olarak azalma eğilimi göstermiştir. Tüm deneylerdeki ilk 120 dakikada görülen piklerin sebebi ise, yüzeyde film tabakasının doygunluğa ulaşmasının ardından yoğuşan suyun damlacık haline gelerek ölçüm kabına hareket etmesi ve yüzeyde depolanan sıvı filmi de sürüklemesinin etkisidir (Şekil 4.14 - 4.20). Belli bir süre geçtikten sonra ise deneysel yoğuşma debisi bir sabit değer aralığında seyir göstermiştir. Yüzeyde yeniden film oluşmasına bağlı olarak yoğuşan suyun depolanması ve sonra tekrar ölçüm kabına gelen su miktarının anlık olarak artış göstermesi deney boyunca görülmektedir. Bu salınımlar sürekli devam etmekle beraber zaman içerisinde yoğuşmanın azalması ve film oluşma hızının yavaşlamasıyla azalmakta ve 600. dakikadan sonra ise yoğuşma belli bir rejime gelmektedir.

Analitik hesaplar sonucunda ise oluşturulan yoğuşma eğrisi, yüzeyde yoğuşan su miktarının hangi evrelerde depolandığı ve hangi evrelerde yoğun bir şekilde ölçüm kabına hareket ettiği konusunda fikir vermektedir.

Deneyin ilk 450 dakikasında deneysel ortalama yoğuşma akısının olması gerekenin üzerinde olduğu, sonraki 450 dakikada ise altında olduğu görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, ilk 450 dakikada yüzeydeki suyun ölçüm kabına ilk hareketiyle başlangıçta yüzeyde depolanan suyun da ölçüm kabına ilerlemesidir. Bu durumun diğer bir nedeni ise nem sensörünün bulunduğu nokta ile yüzey arasındaki su buharı kütle oranı dağılımın doğrusal olduğu kabulüdür. Gerçekte ise bu dağılım paraboliktir. Yani yüzeye yakın bölgelerdeki kütle oranı gradyani gerçekte daha keskindir. Eğer yüzeyden itibaren birçok noktadan bağıl nem ölçümü yapılarak bu kütle oranı dağılım profili tam olarak yakalanabilseydi analitik olarak hesaplanan su buharı kütle transferi miktarı deneysel ve sayısal eğilime daha yakın çıkacaktı; ilk 120 dakikadaki teorik yoğuşma artarken diğer dakiklardaki yoğuşan miktar azalacaktı.

Sonraki 450 dakikada ise yüzeyde damlacık ve film şeklinde su buharının bir miktar depolanmasına bağlı olarak ölçüm kabına hareket eden yoğuşan su miktarında azalma görülmüştür.

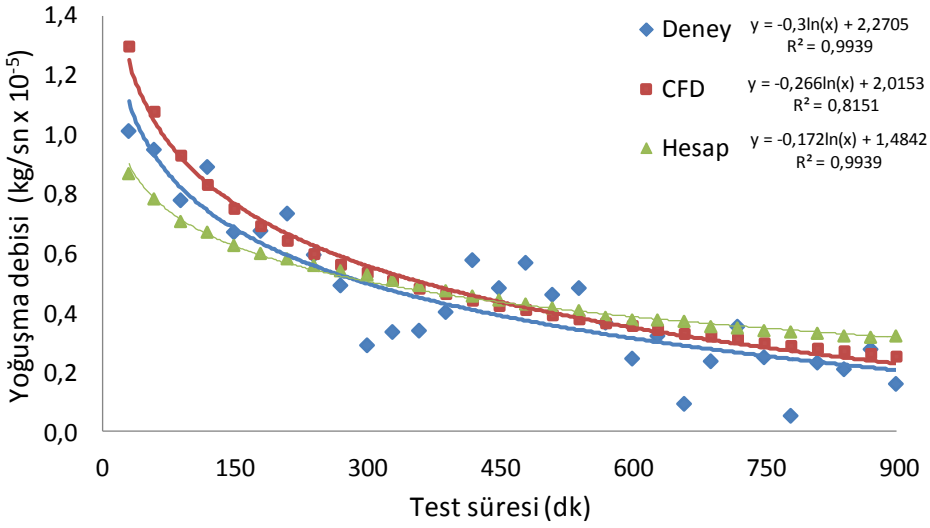
900. dakikadan sonra, yüzeyde depolanan miktarın azalmasıyla analitik olarak yoğuşan miktar ile ölçülen yoğuşan miktarların çok yakın bir eğilimde gitmesi beklenmektedir.

Sayısal çalışmalara baktığımızda ise genel değişim uyumluluk göstermekle beraber bazı sapmalar da gerçekleşmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki temel sapma ise tüm deneylerde görülen deneylerin başlangıcında ölçülen ortalama yoğuşan miktarın, sayısal olarak hesaplanan ortalama yoğuşmadan yüksek olması, deneylerin son kısımlarında ise hesaplanan yoğuşmanın daha yüksek olmasıdır. Bu durumun nedeni ise yukarıda detaylı olarak anlatılan deneysel yoğuşma ölçüm dinamikleridir.

Aşağıdaki grafiklerde deneysel ölçülen, sayısal ve analitik olarak hesaplanan yoğuşma debileri karşılaştırma grafikleri görülmektedir.

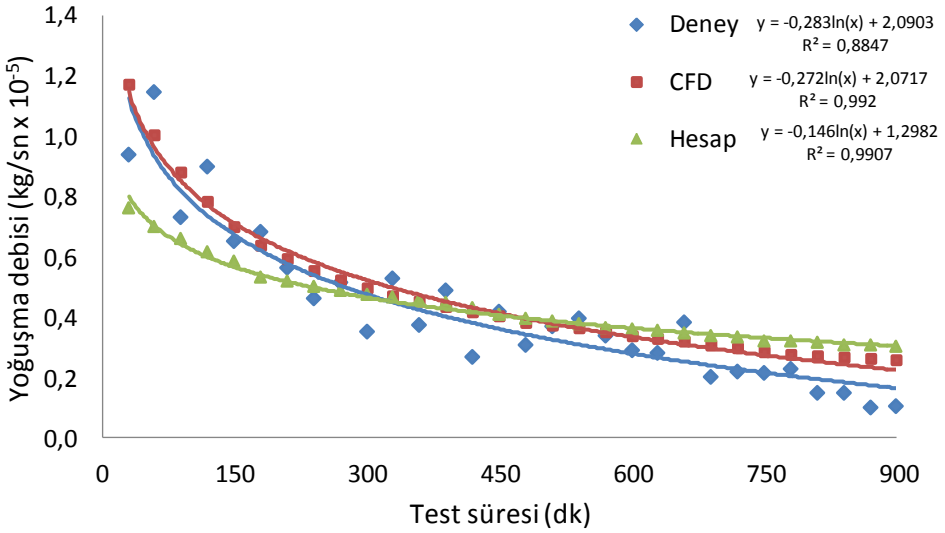
Şekil 4.14'de Deney 1'deki zamana bağlı yoğuşma debisinin değişimi görülmektedir. Bulgulara göre ilk 360 dakika için yoğuşma debisi hızlı düşüş göstermiş, 360. ve 690. dakikalar arasında azalış oranı azalsa da devam etmiş, 690. dakikadan sonra yoğuşma debisi sabitlenmiştir. Yoğuşma debisinin en fazla olduğu ilk 120 dakikadaki ortalama yoğuşma debisi 0,92 x 10^{-5} kg/s iken, 120-240 dakikaları arasında yoğuşma debisi %22 azalarak 0,72 x 10^{-5} kg/s olmuştur. 240-690 dakikaları arasında %54 azalarak 0,43 x 10^{-5} kg/m^2.s olmuştur. Yoğuşma debisinin çok değişmediği 690-900 dakikaları arasında ise ortalama yoğuşma debisi başlangıçtaki duruma göre %78 azalarak 0,22 x 10^{-5} kg/s olmuştur.

Sayısal hesaplamalar ile deney ölçümlerin genel değişim eğilimi uyumluluk göstermekle beraber bazı sapmalar da gerçekleşmiştir. 300 – 400 ve 600 – 900 dakikaları arasında deneysel debi sayısal çalışmaların altında kalırken, 400 – 560 dakikaları arasında sayısal çalışmaların üzerinde seyir göstermiştir.



Şekil 4.14 Deney-1 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması

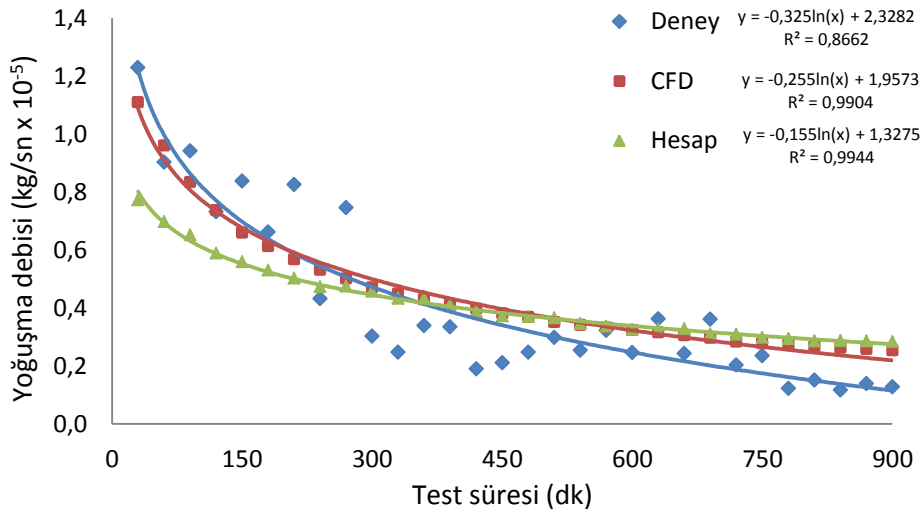
Deney-2'deki yoğuşma debisindeki azalış Deney-1'e göre daha düzenli olmuştur. 630-660 dakikaları arasındaki veri hariç, ön görülen azalma eğiliminden çok fazla sapma görülmemiştir. İlk 360 dakika düşüş hızlı olurken, 360-690 dakikaları arasında düşüş hızı yavaşlamış, 690-900 dakikaları arasında ise yoğuşma debisi sabitlenme eğilimi göstermiştir. İlk 120 dakikadaki ortalama yoğuşma debisi 0,91 x 10^{-5} kg/s iken, 690-900 dakikaları arasında bu değer %83 azalarak 0,16 x 10^{-5} kg/s olmuştur. Deneysel ölçümler ile sayısal hesaplamalar kıyaslandığında; ilk 660 dakika deneysel ölçümler ile sayısal bulguların eğilimleri yakın seyir gösterirken 700 – 900 dakikaları arasında deneysel ölçümler sayısal hesap bulgularının altında kalmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Deney-2 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması

Deney-3'de ise ilk 420 dakikada yoğuşma debisi hızlı bir şekilde düşerken ilk deneylerden daha erken sabitlenmiştir. 420-720 arasında belli süre yoğuşma debisi yatayda ilerlerken 720-900 dakikaları arasında yine bir miktar azalma olmuştur. Yoğuşma debisinin azalış gösterdiği ilk 420 dakikadaki ortalama yoğuşma debisi 0,62 x 10^{-5} kg/s iken, 420-900 dakikalarında değer 0,22 x 10^{-5} kg/s'dir (Şekil 4.16).

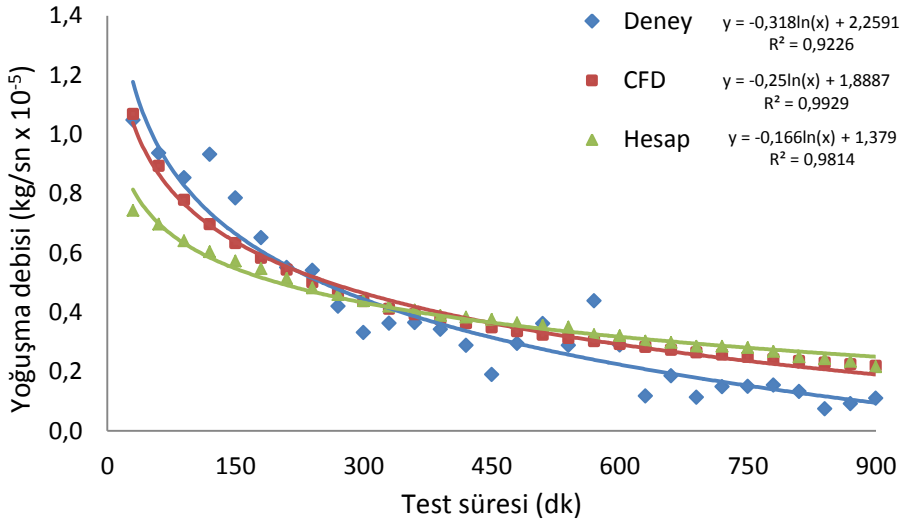
Sayısal ve deney bulgular arasındaki sapma ilk iki deneye göre daha fazla olmuştur. 120 – 240 dakikaları arasındaki bulgular hariç deney bulguları sayısal eğilimin altında seyir izlemiştir.



Şekil 4.16 Deney-3 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması

Deney-4'de yoğuşma debisi, ilk 300 dakika doğrusala yakın bir şekilde azalmış, 300-600 dakikaları arasında azalma hızı yavaşlamış, 600 – 900 dakikaları arası ise hemen hemen hiç değişmemiştir İlk 300 dakikadaki ortalama yoğuşma debisi, 0,7 x 10^{-5} kg/s iken, 300-900 arası bu değer kg/s 0,22 x 10^{-5} kg/s olmuştur (Şekil 4.17).

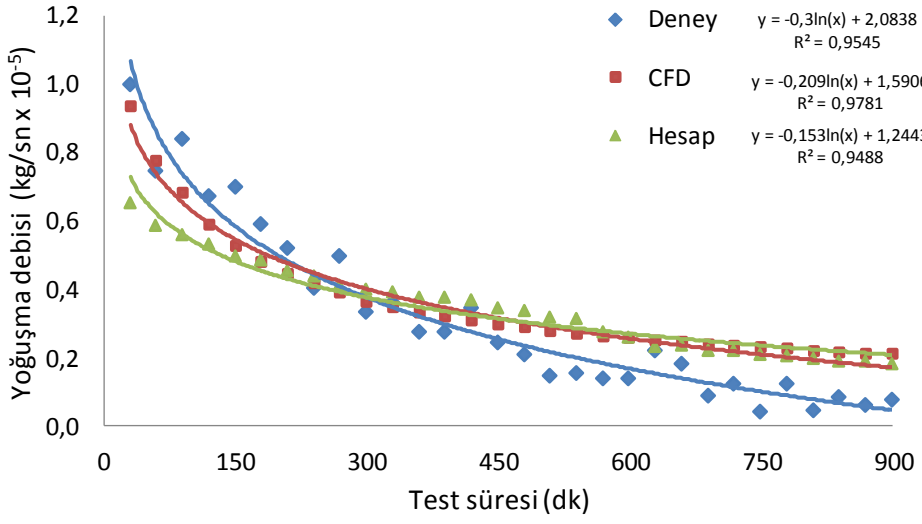
Sayısal bulgular incelendiğinde, ilk 240 dakika deneysel ölçümler sayısal çalışmaların üzerinde olurken, 240. dakikadan sonra genel olarak sayısal çalışmaların altında seyir göstermiştir.



Şekil 4.17 Deney-4 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması

Deney-5 bulguları ilk dört deneyle benzer genel eğilim göstermiştir. Bulgulara göre yoğuşma debisi daha düzenli azalma eğilimi göstermiştir İlk 480 dakika yoğuşma debisi düzenli bir şekilde azalırken, 480-900 dakikaları arasında yoğuşma debisi çok fazla değişmemiştir. İlk 480 dakikadaki ortalama yoğuşma debisi, 0,50 x 10^{-5} kg/s iken, 480-900 arası bu değer 0,11x 10^{-5} kg/s'ye kadar düşmüştür (Şekil 4.18).

Ayrıca ilk 320 dakika deneysel ölçümler sayısal çalışmaların üzerinde olurken, 320. dakikadan sonra genel olarak sayısal çalışmaların altında seyir göstermiştir.

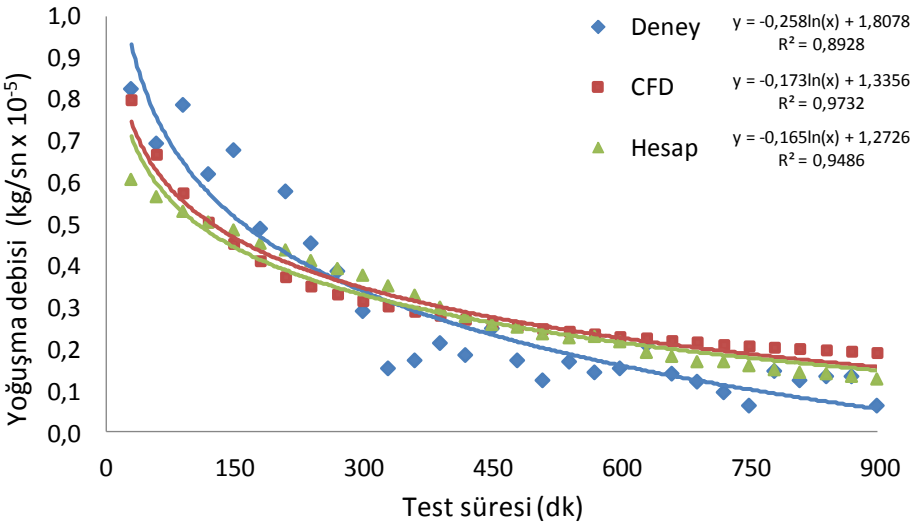


Şekil 4.18 Deney-5 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması

Deney-6'da yoğuşturucu plaka yüzey sıcaklığı deneylerdeki en yüksek değer 14 °C'ye ayarlanmıştır. Bu yüzden bulgular incelendiğinde ilk deneylere göre yoğuşma

debisindeki azalmanın yanında, debinin sabitlenme süresi de daha erken olmuştur. Bulgulara göre 300. dakikadan sonra yoğuşma debisinin çok az değiştiği görülmüştür. İlk 300 dakikadaki ortalama yoğuşma debisi, 0,58 x 10^{-5} kg/s iken, 300-900 arası bu değer 0,14x 10^{-5} kg/s'ye kadar düşmüştür (Şekil 4.19).

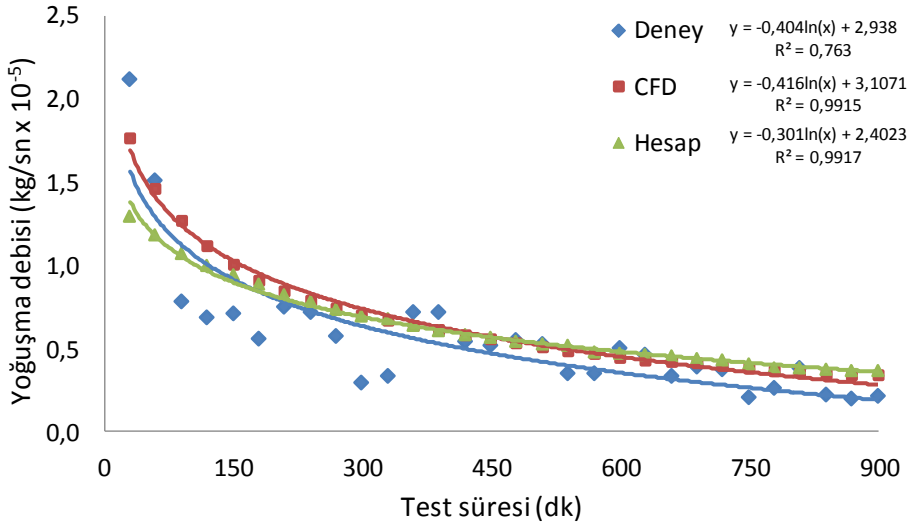
Benzer şekilde yüzey sıcaklığının 14 °C olduğu deneylerde de ilk 240 dakika deneysel ölçümler sayısal hesapların üzerinde olurken, 240. dakikadan sonra genel olarak sayısal çalışmaların altında seyir göstermiştir.



Şekil 4.19 Deney-6 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması

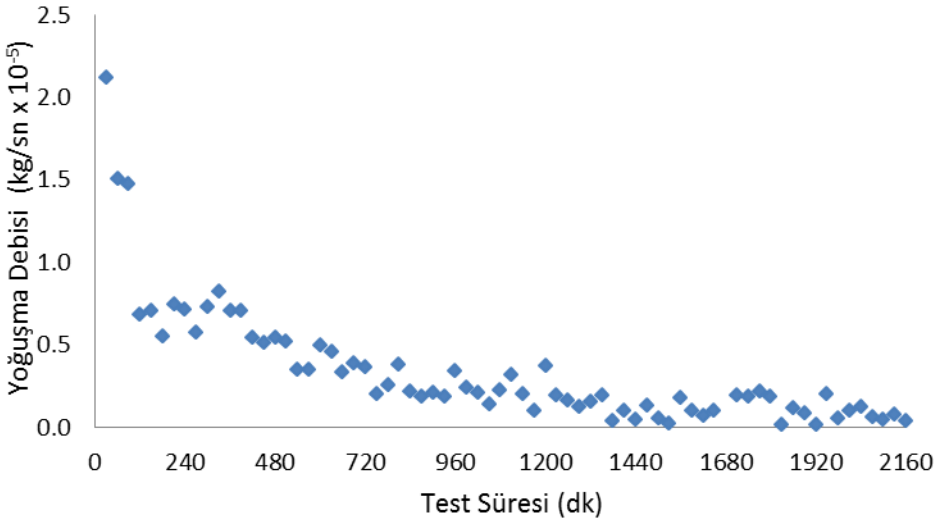
Deney-7'de başlangıç bağıl nem değeri %85 olarak ayarlanmıştır. Bağıl nemin yüksek başlatılmasından dolayı deney süresi de uzun tutulmuştur. Bulgulara göre ilk 960 dakikada yoğuşma debisi belli bir eğilimde azalırken 960. dakikadan sonra yoğuşma debisinin zamanla değişimi azalmıştır. En yüksek miktarda yoğuşma bu deneyde görüldüğünden su bu kütle oranı azalma hızı da en fazla bu deneyde görülmüştür. Buna bağlı olarak ilk 120 dakikadaki yoğuşma debisindeki en yüksek değişim bu deneyde görülmüştür. İlk 960 dakikadaki yoğuşma debisi 0,58 kg/s iken, 960-2160 arası bu değer 0,13x 10^{-5} kg/s'ye kadar düşmüştür (Şekil 4.20, Şekil 4.21).

Başlangıç bağıl nem değerinin % 85 olduğu bu çalışmada, deneysel bulgulardaki 30. 360. 390. 600. dakikalarındaki veriler haricindeki diğer tüm ölçümler sayısal çalışmanın altında bir eğilim göstermiştir.



Şekil 4.20 Deney-7 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması

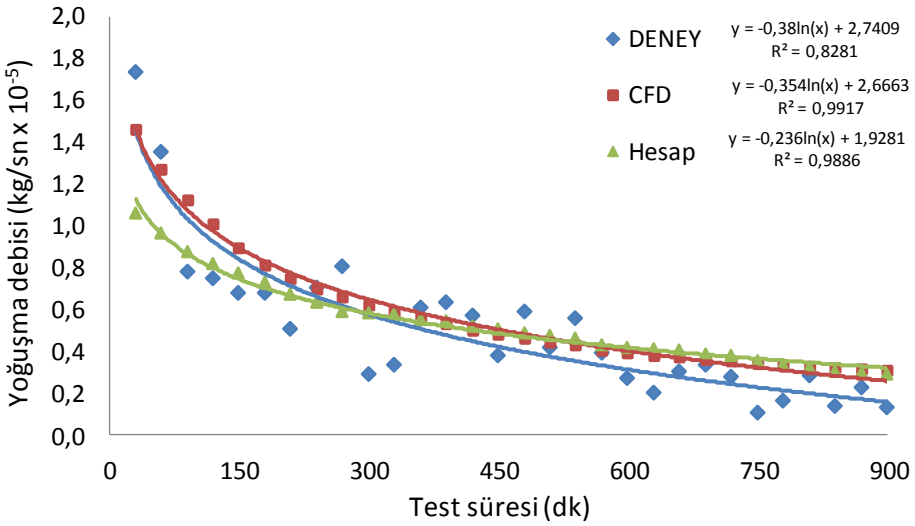
Şekil 4.21'de Deney-7'nin 900. dakikadan sonrasında alınan yoğuşma ölçümlerini de içeren bulgular gösterilmiştir. Bulgulara bakıldığında bu deneyde 960. dakikadan sonra yoğuşma debisi ortalama sabit bir değerde devam ettiği görülmektedir. Diğer deneylerde de deneyler 900. dakikadan sonra devam ettirilseydi benzer eğilim görülecekti.



Şekil 4.21 Deney-7 zamana bağlı yoğuşma debisinin değişimi

Deney-8'de başlangıç bağıl nem değeri %80 olarak ayarlanmıştır. Bulgulara göre 800. dakikaya kadar yoğuşma akısı belli bir eğilimde azalırken 800. dakikadan sonra yoğuşma yataya yakın bir eğilim göstermiştir. İlk 800 dakikadaki yoğuşma debisi 0,57 kg/s iken, 800-900 arası bu değer 0,15 x 10^{-5} kg/s'ye kadar düşmüştür (Şekil 4.22).

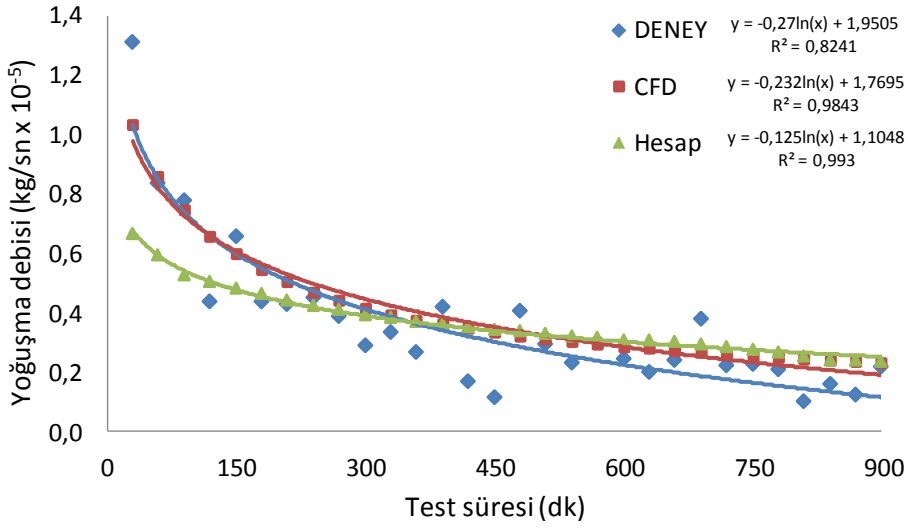
Başlangıç bağıl nem değerinin % 80 olduğu bu çalışmadaki bulgular incelendiğinde deneysel ölçümlerdeki başlangıçtaki birkaç pik değer ve 360-560 dakikaları arasındaki ölçümler haricinde sayısal çalışmaların altında bir seyir izlemiştir.



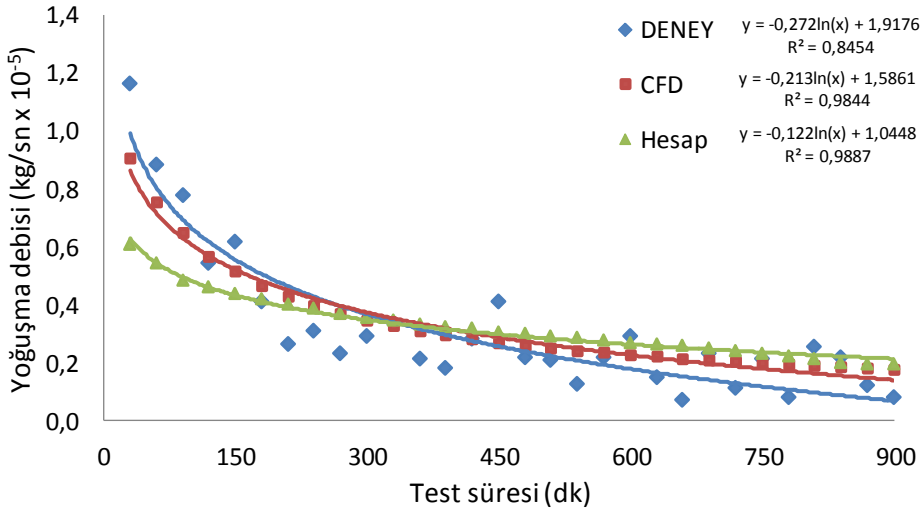
Şekil 4.22 Deney-8 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması

Deney-9 ve Deney-10 bulguları benzer bir eğilim göstermiştir. Bulgular incelendiğinde başlangıç nem oranın ilk 8 deneyten düşük olmasından dolayı, yoğuşma debisi 320. dakikadan sonra yatay bir seyir izlemiştir. Yoğuşma debisindeki değişimin yatay bir eğilim göstermesi bu deneylerde daha erken gerçekleşmiştir. Deney-9'da ilk 320 dakikadaki yoğuşma akısı 0,52 x 10^{-5} kg/s iken Deney-10'da 0,51 x 10^{-5} kg/s olduğu görülmüştür. 320-900 dakikaları arasında ise Deney-9'da ortalama yoğuşma debisi 0,18 x 10^{-5} kg/s, Deney-10'da 0,15 x 10^{-5} kg/s olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.23, Şekil 4.24).

Başlangıç bağıl nem değerinin % 70 olduğu çalışmadaki bulgular incelendiğinde deneysel ölçümlerdeki başlangıçtaki pik değer ve 150. 390. 480. ve 690. dakikalarındaki ölçümler haricinde sayısal çalışmaların altında bir seyir izlemiştir. Başlangıç bağıl nem değerinin % 65 olduğu çalışmadaki bulgular incelendiğinde ise genel eğilim Deney-7.8.9'dakilere benzerlik göstermiştir. İlk 150 dakika ve sonrasındaki ara-ara gerçekleşen pikler hariç deneysel bulgulardaki genel eğilim sayısaldaki eğilime yakın gerçekleşmiştir.



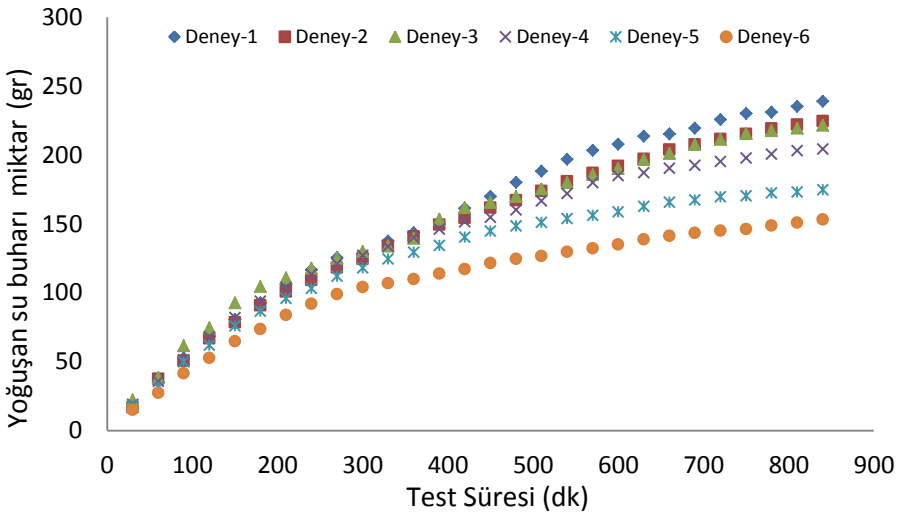
Şekil 4.23 Deney-9 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.24 Deney-10 zamana bağlı yoğuşma debilerinin karşılaştırılması

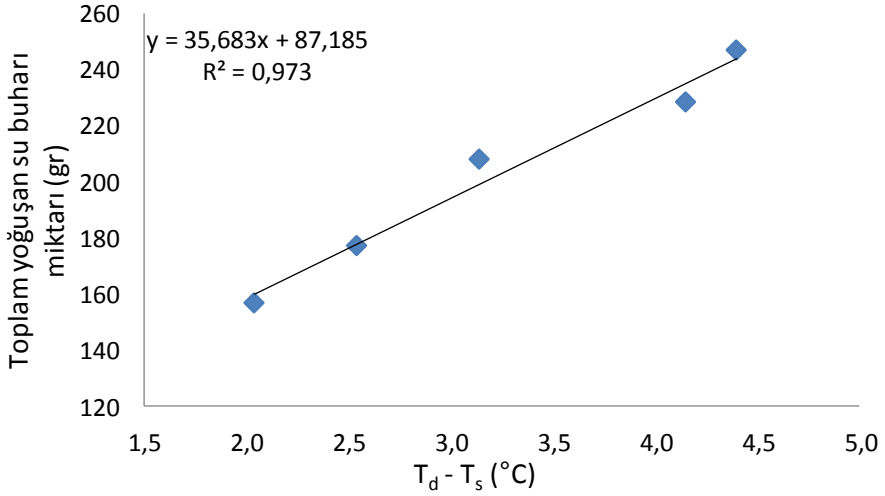
4.1.2 Toplam Yoğuşma Miktarların Kıyaslanması

Bu bölümde deneylerde terazide toplanan yoğuşan su buharı miktarlarındaki değişimler incelenmiştir. Her bir deneydeki toplam yoğuşan miktar artışı yoğuşma debisindeki azalmaya bağlı olarak azalmıştır. İlk 300 dakikada yoğuşan miktar doğrusala yakın olarak artış gösterirken 700. dakikadan yoğuşan miktardaki artış hızı iyice azalmıştır (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 Farklı yüzey sıcaklıkları için zamana bağlı yoğuşan buhar miktar değişimi

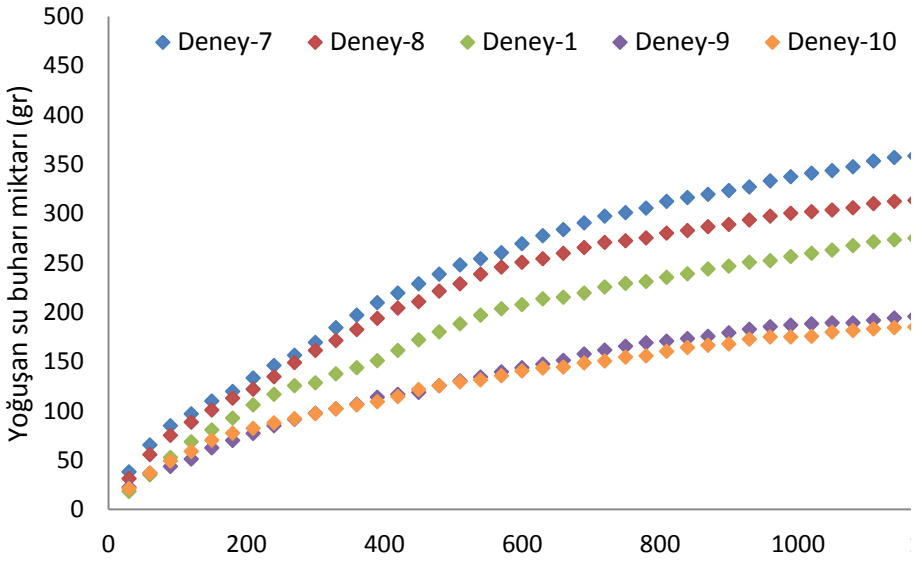
Yüzey sıcaklığının yoğuşmaya etkisi yüzey sıcaklığı (T_s) ile yüzey şartlarındaki havanın doyma sıcaklığı (T_{doy}) arasındaki farka bağlı olarak değişmektedir. Yüzey sıcaklığı ile doyma sıcaklığı arasındaki fark arttığında yüzeyde gerçekleşen yoğuşma miktarı da artmaktadır. Yüzey sıcaklığı ile doyma sıcaklığı arasındaki fark 4,4 °C (Deney-1) olduğunda 840. dakikakaya kadar toplam yoğuşan miktar 239 g, fark 4,1 °C (Deney-2) olduğunda 224 g, fark 3,9 °C (Deney-3) olduğunda 221 g, fark 3,1 °C (Deney-4) olduğunda 204 g, fark 2,5 °C (Deney-5) olduğunda 174 g, fark 2 °C olduğunda (Deney-6) 153 gramdır. Yüzey sıcaklığı ile doyma sıcaklığı arasındaki fark 2 °C'den 4,4 °C'ye çıkmasıyla yoğuşan miktar %28 oranında artmıştır (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 Doyma sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı farkının toplam yoğuşma miktarına olan etkisi

Şekil 4.27'de oda içerisindeki başlangıç bağıl nem değerinin toplam yoğuşan buhara miktara olan etkisi görülmektedir. Beklendiği şekilde oda içerisindeki başlangıç bağıl nem değerinin artmasıyla yoğuşan buhar miktarı artmaktadır. Başlangıç bağıl nem oranının artmasıyla oda içerisindeki su buharı kütle oranı artmakta ve sonucunda yüzey ile sınır tabaka dışındaki su buharı kısmi basınç farkı artmaktadır. Yüzey ile sınır tabaka dışındaki kısmi basınç farkının artmasıyla da difüzyonla olan su buharı kütle geçiş hızı ve miktarı artmaktadır.

Başlangıç bağıl nem oranının değişiminin toplam yoğuşan miktar üzerindeki etkisi, yüzey sıcaklığı değişiminin etkisinden daha fazla olduğu görülmüştür. Başlangıç bağıl nem değeri %85 (Deney-7) olduğunda 1200. dakikaya kadar toplam yoğuşan miktar 365 g, bağıl nem değeri %80 (Deney-8) olduğunda 315 g, bağıl nem değeri %75 (Deney-1) olduğunda 276 g, bağıl nem değeri %70 (Deney-9) olduğunda 197 g, bağıl nem değeri %65 olduğunda (Deney-10) 174 g gramdır. Başlangıç bağıl nem değerinin %85'den %65'e düşmesiyle yoğuşan miktar %49 oranında azalmıştır.



Şekil 4.27 Farklı başlangıç nem değerlerine göre zamana bağlı toplam yoğuşma miktarı

4.1.3 Yoğuşma Akılarının Su Buharı Kısmi Basınç Farklarına Göre İfadesi

Burada yapılan hesaplamalarda sisteminin sürekli hale geldiği 480-840 dakikaları arasındaki verilerin ortalamaları alınmıştır.

Oda içerisinde bağıl nem değerini Eşitlik (4.6)'deki şekilde ifade edilebilir:

$$\varphi = p_i / p_{doy} \quad (4.6)$$

Su buharı kısmi basınçları (P_i) sıcaklığa bağlı olarak tablolardan interpolasyon yapılarak okunmuştur. Kullanılan sıcaklık değerleri ise deneysel ölçümlerden elde edilmiştir. Yüzeydeki su buharı kısmi basınç hesabında yüzey sıcaklığı ($T_{s,0}$), mahal içerisindeki su buharı kısmi basıncı hesabında ise sınır tabaka dışından ($T_{a,4}$) alınan sıcaklık ölçüm verileri kullanılmıştır. Bağıl nem değeri için ise yüzeye en yakın noktandan (H_4) alınan ölçümler kullanılmıştır.

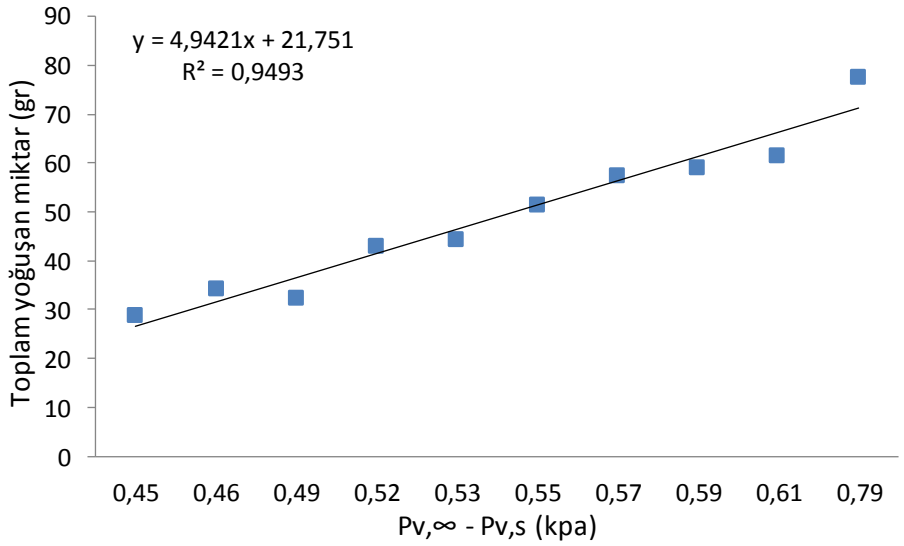
Yüzeydeki su buharı kısmi basıncı ($P_{s,i}$) su buharı doyma basıncına ($P_{s,d}$) eşit olmaktadır. Sınır tabaka dışındaki su buharı kısmi basıncı ($P_{a,i}$) ile yüzeydeki su buharı kısmi basıncı arasındaki fark su buharının yüzeye difüzyonunu ve sonucunda yüzeyde yoğuşmasına sebep olmaktadır. Çizelge 4.5'de elde edilen bulguların özeti yer almaktadır.

Çizelge 4.5 Su buharı kısmi basınç farklarının yoğuşmaya etkisi

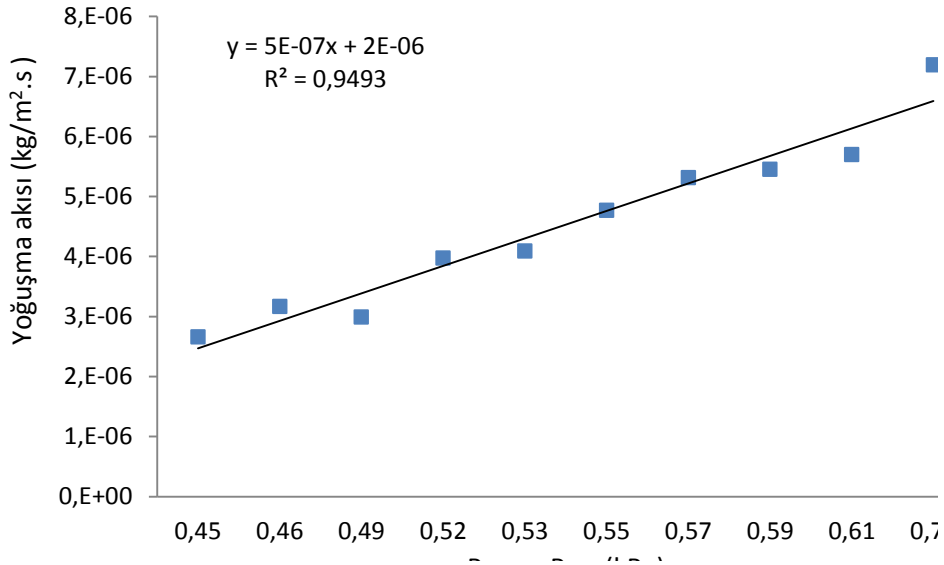
Deneyler		**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**D5**	**D6**	**D7**	**D8**	**D9**	**D10**
T_s	(°C)	10,6	10,9	11,4	12,2	13,0	14,0	10,3	10,3	10,2	10,7
T_a	(°C)	22,5	22,6	22,7	22,8	22,7	22,9	22,3	22,1	21,9	22,1
φ_{ort}	(%)	67,5	68,3	69,2	70,8	72,5	74,3	74,9	69,1	66,3	65,4
$P_{s,i}$	(kPa)	1,28	1,31	1,36	1,45	1,52	1,61	1,25	1,25	1,24	1,30
$P_{a,i}$	(kPa)	1,87	1,88	1,91	1,98	2,01	2,06	2,04	1,86	1,76	1,76
$P_{a,i} - P_{s,i}$	(kPa)	0,59	0,57	0,55	0,53	0,49	0,45	0,79	0,61	0,52	0,46
m_{top}	(g)	58,9	57,41	51,51	44,19	32,28	28,74	77,67	61,52	42,89	34,22
$\dot{m}_{yoğ}$	(kg/m^2.s)	2,7E-6	2,6E-6	2,4E-6	2,1E-6	1,5E-6	1,3E-6	3,6E-6	2,8E-6	1,9E-6	1,6E-6

Şekil 4.28'de su buharı kısmı basınç farkına bağlı olarak 480-840 dakikaları arasında toplam yoğuşan su buharı miktarı değişimi yer almaktadır. Şekil 4.29'da ise aynı aralık için buhar basıncı farkına bağlı olarak yoğuşma akısının değişim grafiği verilmiştir.

Bulgular incelendiğinde su buharı kısmi basıncının artmasıyla doğrusal eğilimde yoğuşan miktarın da arttığı görülmüştür.



Şekil 4.28 Su buharı kısmi buhar basınç farkına bağlı yoğuşan miktar değişimi



Şekil 4.29 Su buharı kısmi buhar basınç farkına bağlı yoğuşma akısı değişimi

4.2 Sayısal Modelin Doğrulanması

Bu bölümde geliştirilen sayısal modelin doğrulanması çalışmaları yürütülmüştür. Sayısal çalışmaların sınır şartları deneysel şartlar ile aynı verilmiştir. Deney bulguları ile aynı şatlarda yürütülen sayısal çalışmaların bulguları karşılaştırılmıştır. Yürütülen 10 farklı deney ve analiz çalışmaları sonucunda ilk 900 dakikadaki yoğuşan toplam su buharı miktarları bulguları karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma bulguları ve gerçekleşen sapmaların nedenleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

İlk 900 dakika boyunca gerçekleşen toplam yoğuşma miktarları bulguları incelendiğinde; sayısal çalışmalarda hesaplanan toplam yoğuşma miktarı her analiz için deneysel ölçümlerden fazla çıkmıştır. Oluşan bu farkın temel nedeni; sayısal çalışmalarda yoğuşan su miktarlarının anlık olarak hesaplanabilmesine karşın, deneysel çalışmalarda deneyler bittiğinde yüzeyde hala bir miktar teraziye ulaşmamış plaka yüzeyinde depolanmış su bulunmasıdır.

Deneylerdeki ortak gözlem; 720-900 dakikaları arasında yoğuşan su buharı miktarı ilk 120 dakikaya göre %70 - %80 oranında azalmaktadır. Deney tamamlandığında yoğuşturucu plakaya suyun gönderilmesi kesilmiştir fakat yüzeyde kalan suyun miktarının ölçümlere dahil edilebilmesi için ölçümler bir miktar daha devam ettirilmiştir. Miktarı az da olsa (~% 3) yüzeyde kalan su damlacıkları da bu şekilde hesaba katılmıştır. Teraziye ulaşan su miktarı hemen durma noktasına geldiğinde ölçümler durdurulmuştur.

Bunun dışında hassas teraziye gelen su miktarı tamamlansa da yüzeyde ve kanallarda hala bir miktar sıvı damlacık ve film kaldığı gözlemlenmiştir. Kalan sıvı miktarının belirlenmesi amacıyla yüzeydeki ve kanallardaki kalan su da bir bezle alınarak ağırlığındaki değişiminden bünyesindeki su miktarı hesaplanmıştır. Yüzeyde kalan su miktarının da oranı yaklaşık toplam yoğuşan miktarın yaklaşık %8 - %12'una denk geldiği görülmüştür. Dolayısıyla hassas terazide ölçülen toplam yoğuşma miktarının yaklaşık %10 - %15 kadar daha fazlası yüzeylerde ve kanalda kaldığı tespit edilmiştir.

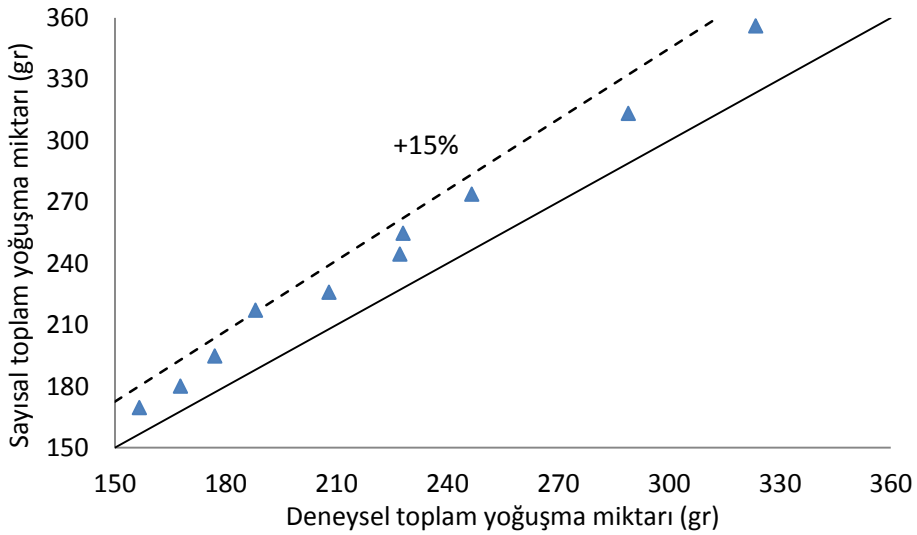
Diğer yandan deneylerin başında yüzeyde su filmi oluşmasına rağmen terazide yoğuşma 30 dk – 60 dk sonra başlamıştır. Terazideki ölçümler ise ölçüm kabına gelen ilk su ile başlatılmıştır. Dolayısıyla yoğuşma ölçümleri yüzeyde film varken başlatılmış ve yüzeyde hala bir miktar film varken bitirilmiştir. Yoğuşma ölçümleri başlamadan yüzeyde oluşan sıvı filmin (sonraki dakikalarda yapılan yoğuşma ölçümleri ışığında) yaklaşık toplam yoğuşmanın %10'una karşılık geldiği görülmüştür. Deneyler bitirildiğinde yüzeyde depolanan sıvı filmi, yoğuşma ölçümleri öncesinde depolanan sıvı filminden az olduğundan, bu fark kadar olan kısım (~% 5) da fazladan yoğuşan toplam miktara dahil olmuştur.

Bu bilgiler ışığında özetle deneysel olarak ölçülen su buharı miktarının, deneylerin yapıldığı süreçte yoğuşan fiili miktardan %5 - %10 oranında daha az olduğu ön tespit edilmiştir. Ölçümlerde buharlaşma ile plaka yüzeyinden uzaklaşan su buharı miktarı ise dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla sayısal çalışmalarda hesaplanan toplam yoğuşma miktarının deneysel çalışmalardan yüksek çıkması beklenen bir durumdur.

Deney bulguları incelendiğinde, sayısal ve deneysel çalışmalar arasındaki sapma %6,8 - %13,4 arasında olmuştur. En düşük sapma başlangıç bağıl nem değerinin en az ve dolayısıyla yoğuşan miktarın en az olduğu CFD-10 bulgularında olmuştur. Tüm bulgular irdelendiğinde de sayısal çalışmalarla hesaplanan toplam yoğuşan miktarın deneysel olarak ölçülen toplam yoğuşma miktarından ortalama %8,9 oranında fazla çıktığı görülmüştür. Bunun da karşılığı deneysel çalışmalarda ölçülen toplam yoğuşan miktar, hesaplanan sayısal toplam yoğuşan miktarın ortalama 22 g altında kalmıştır. Özet karşılaştırma bulguları Çizelge 4.6'da ve Şekil 4.30'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Sayısal ve deneysel toplam yoğuşan miktarların karşılaştırılması

Deneysel Toplam Yoğuşan Miktar (g)		**Sayısal Toplam Yoğuşan Miktar (g)**		**Fark (g)**	**Fark (%)**
Deney-1	246,68	CFD-1	273,87	27,2	9,9
Deney-2	228,11	CFD-2	254,73	26,6	10,5
Deney-3	227,20	CFD-3	244,52	17,3	7,1
Deney-4	207,97	CFD-4	225,88	17,9	7,9
Deney-5	177,06	CFD-5	194,82	17,8	9,1
Deney-6	156,67	CFD-6	169,56	12,9	7,6
Deney-7	323,46	CFD-7	356,10	32,6	9,2
Deney-8	289,02	CFD-8	313,37	24,4	7,8
Deney-9	188,10	CFD-9	217,09	29,0	13,4
Deney-10	167,80	CFD-10	180,02	12,2	6,8



Şekil 4.30 Sayısal ve deneysel toplam yoğuşan miktarların karşılaştırılması

Çizelge 4.7'de deney başlangıç ve bitiş sıcaklık ve bağıl nem ve hava sıcaklıkları değerlerine göre termodinamik denge ile yoğuşması gereken miktar ile deneylerde yoğuşan miktarlar karşılaştırılmıştır. Deneysel ölçümlerden elde edilen toplam yoğuşma miktarı deneylerde gerçekleşen sıcaklık ve bağıl nem değerine göre yoğuşması gereken miktardan ortalama % 8,1 daha düşük çıkmıştır. Bu fark daha önce de belirtildiği gibi yüzeylerde ve kanallarda kalarak hesaplara dahil olmayan miktarlardan kaynaklanmaktadır. Sayısal çalışmalardan elde edilen yoğuşma miktarları termodinamik hesaptan elde edilen hesaptan ortalama % 2,3 oranında artı yönde sapmıştır.

Çizelge 4.7 Termodinamik hesaplar ile deneysel ölçümlerin kıyaslanması

	Hava Sıcaklığı, $T_{a,0}$ (°C)	Bağıl Nem Oranı $\varphi_{H3,0}$ (%)	Özgül Nem, $w_{v,0}$, (g/kg)	Hava Sıcaklığı, $T_{a,900,}$ (°C)	Bağıl Nem Oranı $\varphi_{H3,900,}$ (%)	Özgül Nem, $w_{v,900}$ (g/kg)	Yoğuşması gereken miktar, (g)	Deneysel Yoğuşan Miktar, (g)	Fark (g)	Fark (%)
D1	24.37	75,71	14,3	22,11	56,75	9,32	284,4	246,68	37,7	13
D2	24.48	74,96	14,25	23.04	56,95	9,90	248,4	228,11	20,3	7,1
D3	24.25	75,83	14.22	22,97	59,55	10,18	234,7	227,20	7,5	3,3
D4	24.99	74,84	14.67	23,17	60,80	10,66	229,0	207,97	21.0	9,1
D5	24.30	75,90	14.35	23,13	63,19	11,02	190,7	177,06	13,6	7,2
D6	24.78	74,38	14.41	23,48	65,64	11,53	166,4	156,67	9,7	6,2
D7	25,19	84,47	16.86	22,97	61,29	10,61	352,5	323,46	29,0	8,2
D8	24,98	80,62	15.80	22,80	58,66	10,05	306,6	289,02	17,6	5,7
D9	24,84	71,49	13.88	23,19	57,37	10,05	214,3	188,10	26,2	12,2
D10	25,08	66,86	13.08	23,01	56,82	9,85	184,4	167,80	16,6	9,0

4.3 Serbest Taşınım Şartlarında Düşey Plakada Sadece Isı Geçişinin İncelenmesi

Bu bölümde 5 farklı deneysel çalışma yürütülmüştür. Hesaplamalarda yoğuşma deneylerinde izlenen yöntem kullanılmıştır. Mahal içerisindeki başlangıç bağıl nem değeri ve plaka yüzey sıcaklıkları plaka üzerinde yoğuşma gerçekleşmeyecek aralıklarda seçilmiştir.

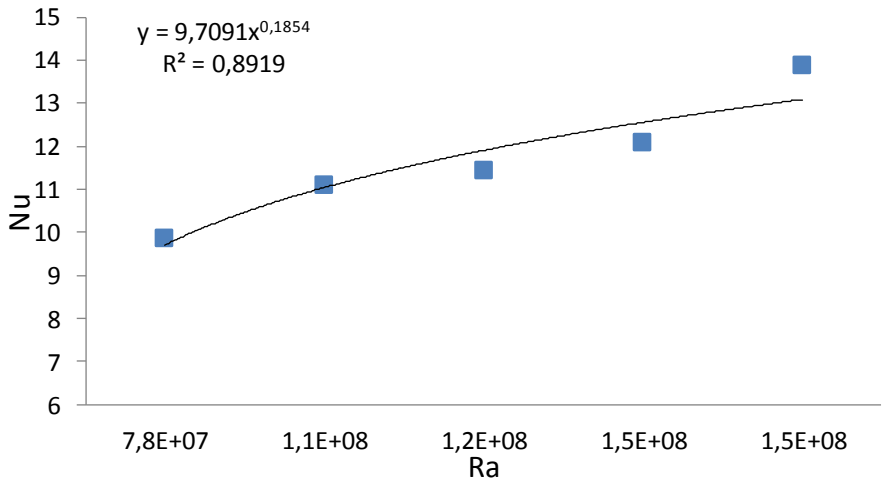
Yoğuşma gerçekleşmeyen bu deneylerde sistemin rejime girme süresi daha hızlı gerçekleşmiştir. Isı transferi korelasyonlarının oluşturulduğu veriler sistemin sürekli hale yaklaştığı 120-600 dakikaları arasından alınmıştır. Elde edilen bulguların özeti Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 Sadece ısı geçişi deneyleri için hesap özeti tablosu

			D11	D12	D13	D14	D15
Plaka yüzey sıcaklığı	T_s	°C	11,5	11,7	14,3	14,9	17,5
Ortam Sıcaklığı	T_a	°C	23,4	23,4	23,4	23,6	23,7
Net ısı transferi	Q_{net}	W/m^2	17,61	16,97	13,30	12,66	11,74
Işınımla olan ısı transferi	Q_{rad}	W/m^2	13,46	13,27	10,61	10,17	10,17
Taşınımla olan ısı transferi	$Q_{taş}$	W/m^2	4,15	3,59	2,70	2,50	1,57
Grashoff sayısı	Gr x 10^8	-	2,19	2,18	1,66	1.57	1,05
Isı geçişi için Rayleigh sayısı	Ra x 10^8	-	1,55	1,54	1,19	1,13	0,778
Isı taşınım katsayısı	h	$W/m^2.K$	0,71	0,62	0,58	0,57	0,51
Nusselt sayısı	Nu	-	13,87	12,08	11,44	11,09	9,86

Sadace ısı geçişi durumu için literatürde daha önce yapılan çalışmalarda Nu sayısının Ra sayılarına bağlı olarak değişimi $y = a.x^b$ fonksiyonu şeklinde tanımlandığından bu çalışmada da aynı fonksiyon üzerinden korelasyonlar oluşturulmuştur.

Şekil 4.31'de farklı Ra sayıları için elde edilen Nu değerlerinin değişimi verilmiştir. Bulgulara göre $7,78 \times 10^7 < Ra < 1,55 \times 10^8$ aralığı için $Nu_L = 9,709 \times Ra^{0,1854}$ korelasyonu oluşturulmuştur.



Şekil 4.31 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı geçişinin olduğu hal için Ra – Nu değişimi

4.4 Serbest Taşınım Şartlarında Düşey Plakada Eş Zamanlı Isı ve Kütle Geçişinin İncelenmesi

Bu bölümde Bölüm 3'de detaylı olarak anlatılan deneysel yöntem, ölçümler ve hesaplama metodolojileri kullanılarak yapılan duyulur ve gizli ısı transfer hesaplama bulguları verilmiştir. Tüm deneyler için hesaplamalar yapılmış, yüzey sıcaklığının parametre olduğu ilk 6 deneyin tüm hesaplama bulguları ve hesaplamalarda kullanılan ölçüm verileri Ek-C'de verilmiştir.

Bu bölümde verilen bulgular aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir:

- Zamana bağlı toplam, duyulur ve gizli ısı akıları değişimi
- Zamana bağlı duyulur, taşınım ve ışınım ısı akıları değişimi
- Sürekli rejim için ampirik ısı transfer katsayıları korelasyonları
- Serbest taşınım şartlarında düşey plakada eş zamanlı taşınımla gerçekleşen ısı ve kütle geçişi için oluşturulan korelasyonlar

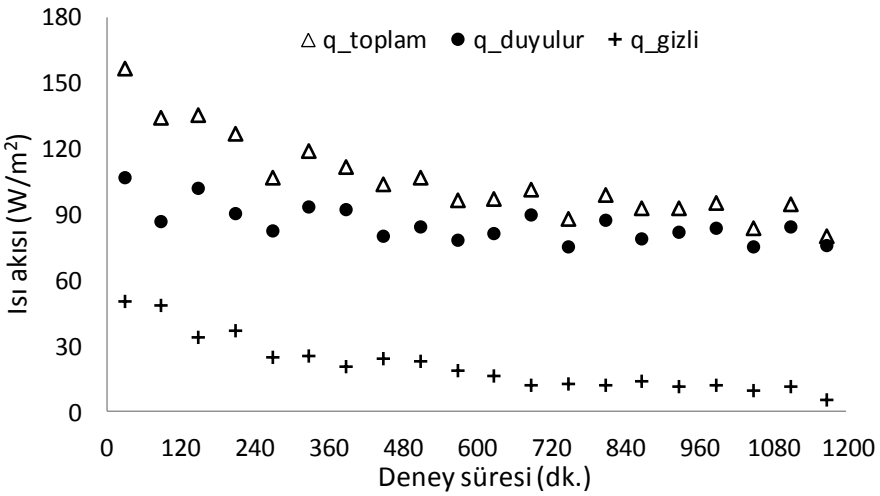
Zamana bağlı hesaplamalarda 30 dakikalık ölçümlerin ortalamaları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Sürekli reji için ampirik ısı transfer katsayısı hesaplamalarında ise deneylerin kararlı rejime geçtiği 480-840 dakikaları arasındaki ölçüm verilerinin ortalamaları alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

4.4.1 Zamana Bağlı Duyulur ve Gizli Isı Akıları Değişimi

Bu bölümde farklı plaka yüzey sıcaklıklarının parametre olarak çalışıldığı deneysel çalışmalar için zamana bağlı olarak toplam, duyulur ve gizli transfer akılarının değişimi hesaplanmıştır. Toplam ısı akısı duyulur ve gizli ısı akısının toplamıdır. Net duyulur ısı akısı hesabında ise yoğuşturucu plakadan iletimle olan ısı kayıpları çıkartılmıştır.

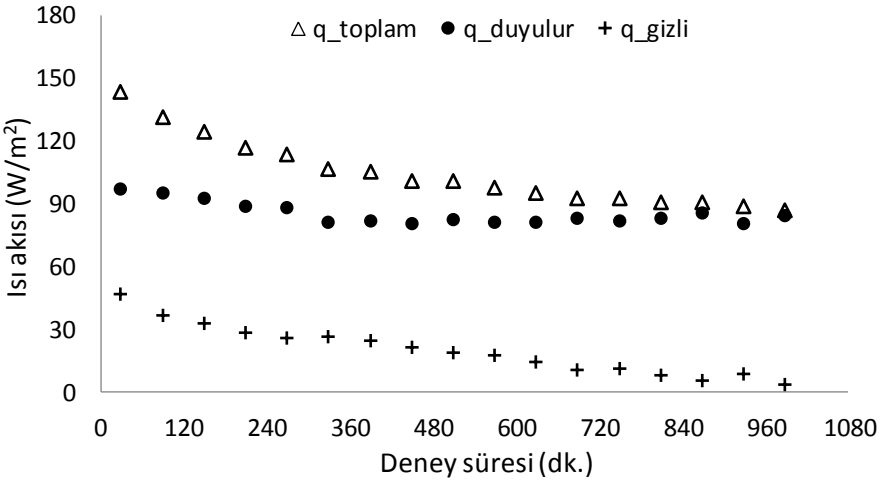
Alınan ölçümler ve sonrasında yapılan hesaplamalara göre toplam, duyulur ve gizli transfer akıları zamanla düşmektedir. Duyulur ısı transferi miktarlarının zamana bağlı olarak azalmasının sebebi yoğuşturucu planın soğutma etkisiyle mahal içerisindeki havanın ve yüzeylerin sıcaklığının azalması ve buna bağlı olarak taşınımla ve ışınımla olan ısı transferinin azalmasıdır. Gizli ısı transferinin azalmasının nedeni ise gerçekleşen yoğuşmadan dolayı oda içerisindeki su buharı kütle oranının zamana bağlı azalmasıyla yüzeyde gerçekleşen yoğuşma akıların azalmasıdır. Bulgular irdelendiğinde gizli ısı transferi miktarındaki zamana bağlı azalma duyulur ısı transferine göre daha hızlı gerçekleşmektedir. Gerçekleşen azalma ağırlıklı olarak 480. dakikaya kadar gerçekleşmiştir. 480. dakikadan sonra ise duyulur ve gizli transfer miktarları çok fazla değişmemektedir. Bulgularda görülen bazı anlık sapmalar yoğuşma ısı akısındaki sapmalardan kaynaklanmaktadır. Yoğuşma ısı akısındaki sapma ise bir önceki bölümde de bahsedilen yoğuşma akısında anlık meydana gelen artış ve azalışlardan kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.32'de Deney-1 için zamana bağlı ısı akısı değişimleri görülmektedir. Toplam duyulur ve gizli ısı akılarında benzer bir azalış eğilimi görülmektedir. İlk 30 dakikada 156 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 80 $W/m^{2,}$'ye kadar düşmektedir. Aynı şekilde duyulur ısı akısı başlangıçta 106 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 75 $W/m^{2,}$'ye kadar düşmüştür. En büyük düşüş gizli ısı transfer akısında gerçekleşmiştir. Başlangıçta 50 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 5 $W/m^{2,}$'ye kadar düşmüştür.



Şekil 4.32 Deney-1 (Ts=10,5 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi

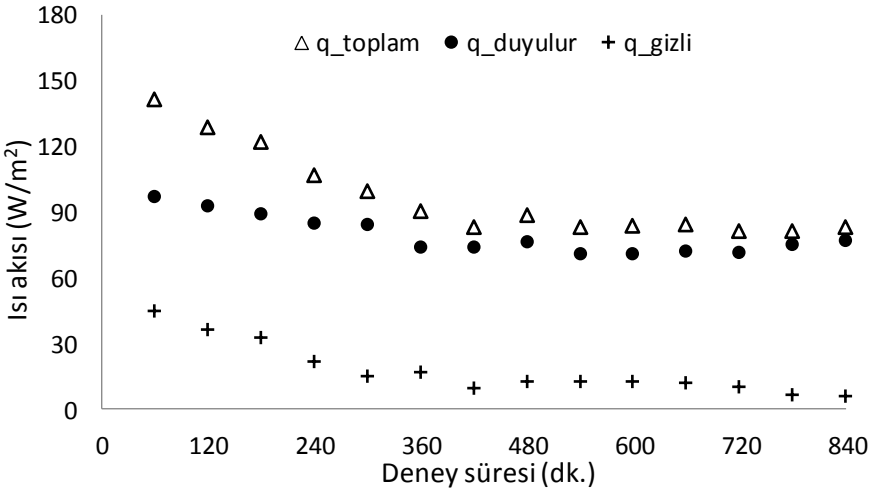
Şekil 4.33'de Deney-2 için zamana bağlı ısı akısı değişimleri görülmektedir. Bulgular irdelendiğinde ısı akılarında beklenene göre çok yakın bir azalış eğilimi görülmektedir. Duyulur ısı akısı 360. dakikadan itibaren neredeyse değişmezken, toplam ısı akısı gizli ısı akısının azalmasına bağlı olarak bir miktar daha azalmıştır. İlk 30 dakikada 142 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 86 W/m^{2,}'ye kadar düşmektedir. Aynı şekilde duyulur ısı akısı başlangıçta 96 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 84 W/m^{2,}'ye kadar düşmüştür. Gizli ısı akısı ise başlangıçta 46 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 3 W/m^{2,}'ye kadar düşmüştür.



Şekil 4.33 Deney-2 (Ts=10,9 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi

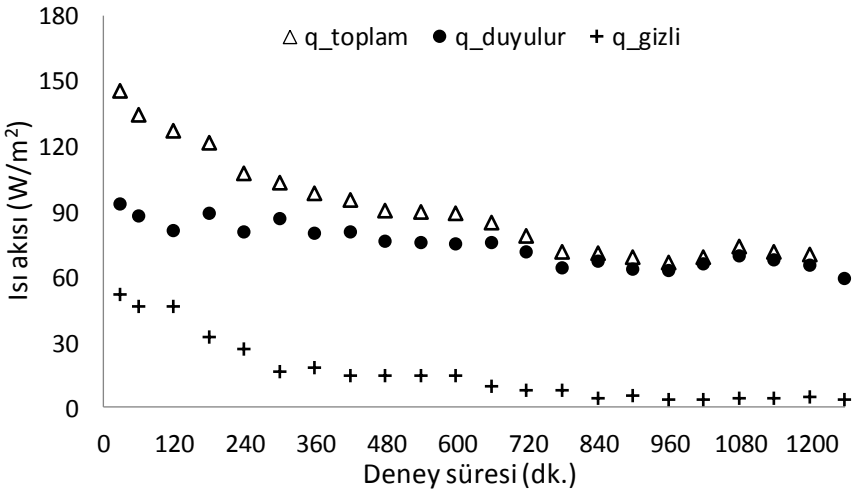
Şekil 4.34'de Deney-3 için zamana bağlı ısı akısı değişimleri görülmektedir. 360 dakikadan sonra sistemin rejime girdiği duyulur ve gizli ısı akılarının çok değişmediği görülmektedir. İlk 30 dakikada 140 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 87

W/m^{2,}ye kadar düşmektedir. Aynı şekilde duyulur ısı akısı başlangıçta 96 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 74 W/m^{2,}ye kadar düşmüştür. Gizli ısı akısı ise başlangıçta 44 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 6 W/m^{2,}ye kadar düşmüştür. İlk 3 deneyin yüzey sıcaklık farkları az olduğundan bu deneyde elde edilen akıların ilk 2 deney bulgularıyla gayet yakın olduğu görülmektedir.



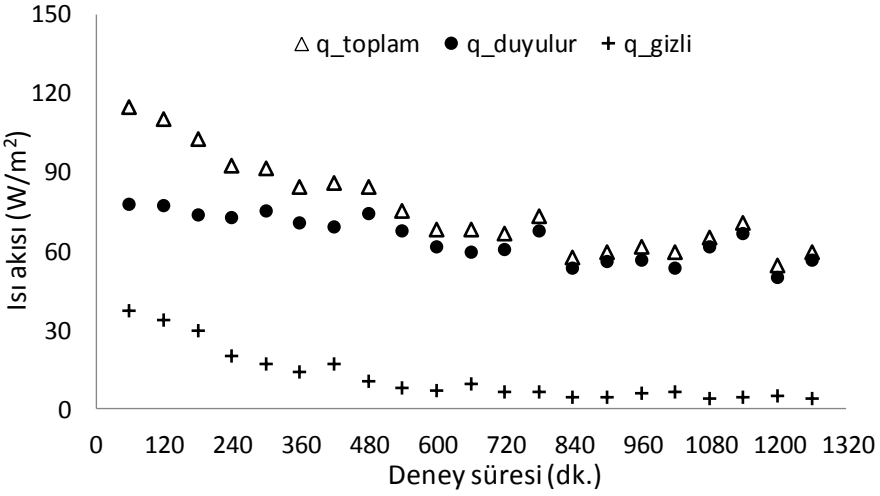
Şekil 4.34 Deney-3 (Ts=11,4 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi

Şekil 4.35'de Deney-4 için zamana bağlı ısı akısı değişimleri görülmektedir. Bulgular incelendiğinde akıların değişim eğiliminin ilk 3 deney kadar düzgün olmadığı görülmektedir. Bunun da esas nedeni bu deneydeki yoğuşma akılarındaki salınımın fazla olmasıdır. İlk 300 dakikadaki yoğuşma akısındaki hızlı azalma toplam ısı akısındaki hızlı azalmaya neden olmuştur. Yoğuşma akısının ilk 300 dakikada yüksek olması taşınımla olan ısı akısının bir miktar beklenenden az çıkmasına neden olmuştur. Toplam ısı akısı ilk 30. dakikada 142 W/m^2 iken deney sonunda 62 W/m^{2,}ye kadar düşmektedir. 93 W/m^2 olan duyulur ısı akısı deney sonunda 59 W/m^{2,}ye kadar düşmüştür. Gizli ısı akısı ise başlangıçta 51 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 4 W/m^{2,}ye kadar düşmüştür.



Şekil 4.35 Deney-4 (Ts=12,3 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi

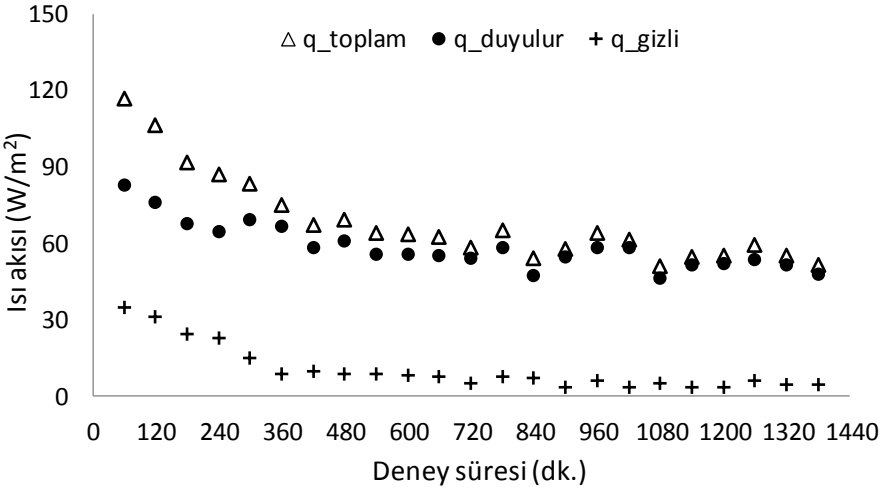
Şekil 4.36'da Deney-5 için zamana bağlı ısı akısı değişimleri görülmektedir. Deney-4'de olduğu gibi ilk 300 dakikada yoğuşma akısındaki değişim hızlı gerçekleşmiştir. 480. dakikadan sonra tüm akılar yatay bir eğilim gösterse de yoğuşma akılarındaki anlık değişimler bazı bulgularda salınım oluşturmuştur. Yüzey sıcaklığının önceki deneylere göre yüksek olmasından dolayı tüm akılar önceki deneylere göre daha düşük çıkmıştır. Toplam ısı akısı ilk 30. dakikada 114 W/m^2 iken deney sonunda 71 W/m^{2,}'ye kadar düşmektedir. 78 W/m^2 olan duyulur ısı akısı deney sonunda 63 W/m^{2,}'ye kadar düşmüştür. Gizli ısı akısı ise başlangıçta 36 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 4 W/m^{2,}'ye kadar düşmüştür.



Şekil 4.36 Deney-5 (Ts=13 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi

Şekil 4.37'de Deney-6 için zamana bağlı ısı akısı değişimleri görülmektedir. Değişim eğilimi önceki deneylerle benzerlik göstermiştir. 360. dakikadan sonra akılar çok fazla

değişmemiş, kararlı bir hal almıştır. Sistemin diğer deneylere göre daha erken rejime girmesinin sebebi bu deneydeki yüzey sıcaklığının yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Toplam ısı akısı ilk 30. dakikada 116 W/m^2 iken deney sonunda 51 W/m$^{2'}$ye kadar düşmektedir. 82 W/m^2 olan duyulur ısı akısı deney sonunda 47 W/m$^{2'}$ye kadar düşmüştür. Gizli ısı akısı ise başlangıçta 34 W/m^2 olan toplam ısı akısı deney sonunda 3 W/m$^{2'}$ye kadar düşmüştür.



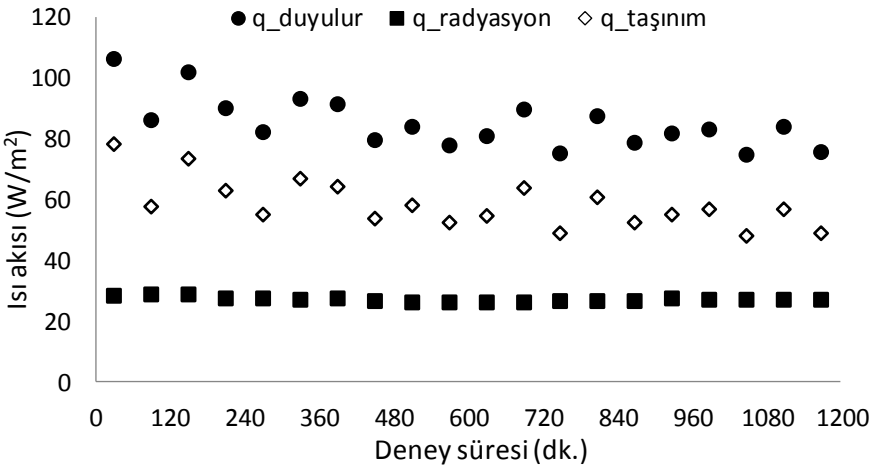
Şekil 4.37 Deney-6 (Ts=14 °C) zamana bağlı duyulur ve gizli ısı transferi

4.4.2 Zamana Bağlı Duyulur, Taşınım ve Işınım ısı akıları değişimi

Bu bölümde toplam duyulur, ışınım ve taşınımla olan ısı akılarının değişimleri incelenmiştir. Tüm deneylerde görülen ortak bulgu ışınımla olan ısı transfer akısı zamanla çok değişmemektedir. Yüzey sıcaklıkları ve görme faktörleriyle analitik olarak hesaplanan ışınım ısı akısı yüzey sıcaklıklarının deney süresince çok fazla değişmemesinden dolayı çok fazla salınım göstermemiştir. Taşınımla olan ısı akısı toplam ısı akısından, gizli ve ışınımla ısı akısının çıkarılmasıyla elde edildiğinden, gizli akısındaki salınımdan dolayı bir miktar salınım göstermiştir. Toplam duyulur ısı akısı ise ilk 480 dakika bir miktar azalmasına rağmen 480. dakikadan sonra çok fazla salınım göstermemiştir.

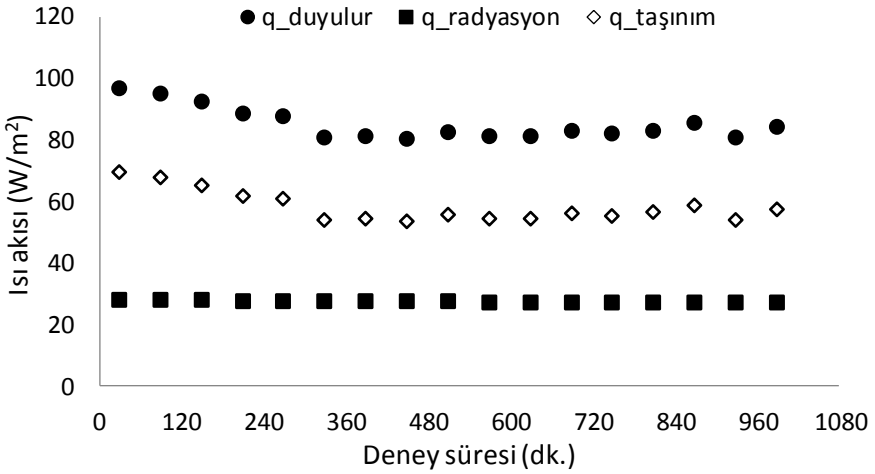
Deney-1'de ışınım ısı akısı 25-27 W/m^2 arasındaki dar aralıkta salınım gösterirken, taşınım ısı akısı 50-70 W/m^2 aralığında değişmiştir. Tüm deney boyunca ortalama taşınım ısı akısı 58 W/m^2 olarak hesaplanmıştır. Toplam duyulur ısı akısı 70-100 W/m^2

aralığında salınım gösterirken, tüm deney boyunca ortalama duyulur ısı akısı 85 W/m^{2}'dir (Şekil 4.38).



Şekil 4.38 Deney-1 (Ts=10,5 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları

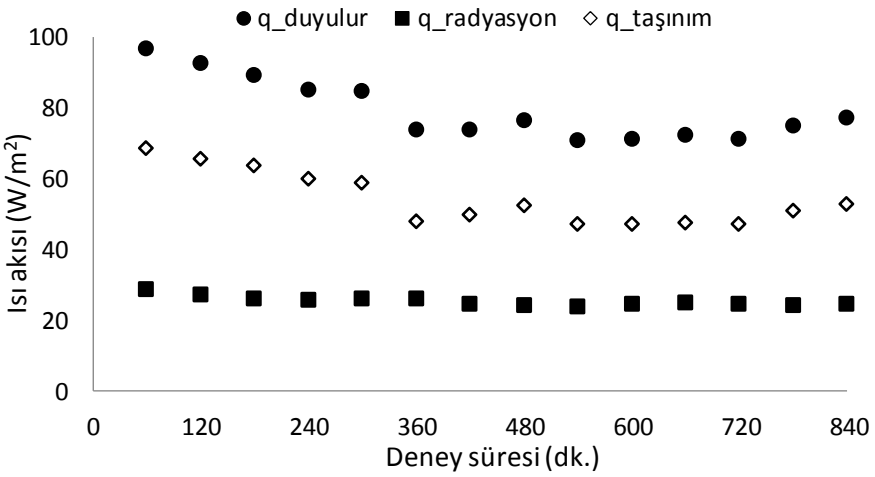
Deney-2'den elde edilen bulgularda salınımların çok az olduğu görülmektedir. Azalma yönündeki değişim ilk 360 dakikada gerçekleşmiştir. Işınım ısı akısı 26-27 W/m^2 dar aralıkta salınım gösterirken, taşınım ısı akısı 50-65 W/m^2 aralığında değişmiştir. Tüm deney boyunca ortalama taşınım ısı akısı 58 W/m^2 olarak hesaplanmıştır. Toplam duyulur ısı akısı 80-95 W/m^2 aralığında salınım gösterirken, tüm deney boyunca ortalama duyulur ısı akısı 84 W/m^{2}'dir (Şekil 4.39).



Şekil 4.39 Deney-2 (Ts=10,9 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları

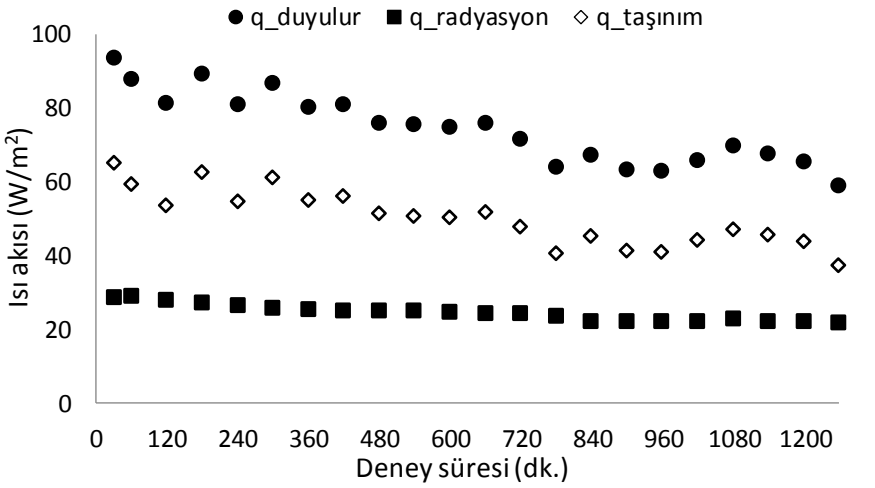
Deney-3'de bulgular incelendiğinde bulguların zamana bağlı eğilimleri ilk deneyle çok yakındır. Işınım ısı akısı 24-27 W/m^2 aralığında salınım gösterirken, taşınım ısı akısı 55 W/m^2 ortalama ile 50-65 W/m^2 aralığında değişmiştir. Toplam duyulur ısı akısı 72-95

W/m^2 aralığında salınım gösterirken, deney boyunca ortalaması 79 W/m^{2}'dir (Şekil 4.40).



Şekil 4.40 Deney-3 (Ts=11,4 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları

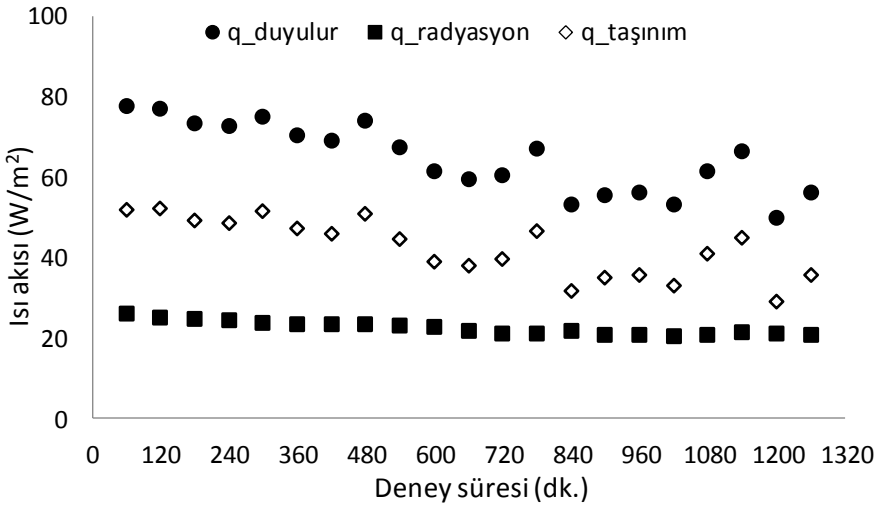
Deney-4'de ısı akılarında zamana bağlı sürekli azalma eğilimi görülmektedir. Sadece 1020-1200 dakikaları arasında yoğuşma akısındaki anlık azalıştan kaynaklan, taşınım ısı akısında anlık artış görülmüştür. Işınım ısı akısı 24-28 W/m^2 aralığında salınım gösterirken, taşınım ısı akısı 50 W/m^2 ortalama ile 40-65 W/m^2 aralığında değişmiştir. Toplam duyulur ısı akısı 65-95 W/m^2 aralığında salınım gösterirken, deney boyunca ortalaması 74 W/m^{2}'dir (Şekil 4.41).



Şekil 4.41 Deney-4 (Ts=12,3 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları

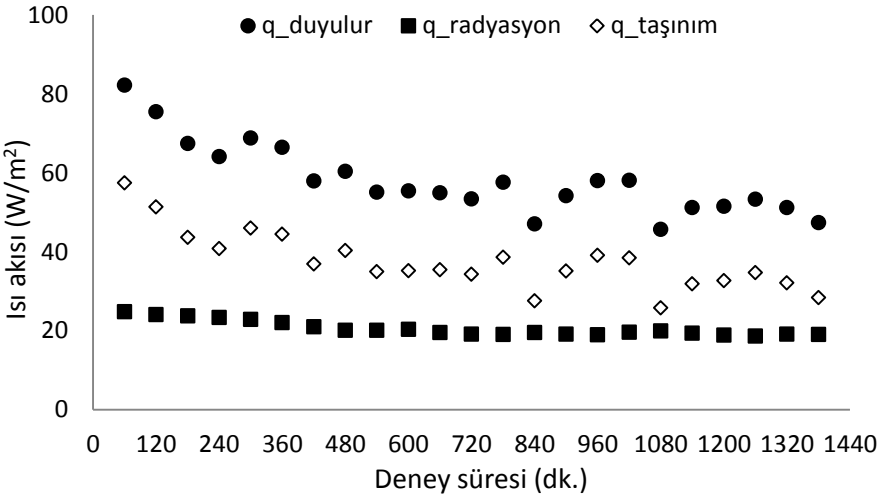
Deney-5'de de benzer eğilimler görülmektedir. Bu deneyde yoğuşturucu plaka yüzey sıcaklığının yüksek tutulmasından dolayı duyulur ısı akılarının önceki deneylerden

düşük çıkmıştır. Işınım ısı akısı 20-25 W/m^2 aralığında salınım gösterirken, taşınım ısı akısı 43 W/m^2 ortalama ile 35-50 W/m^2 aralığında değişmiştir. Toplam duyulur ısı akısı 55-75 W/m^2 aralığında salınım gösterirken, deney boyunca ortalaması 65 W/m^2'dir (Şekil 4.42).



Şekil 4.42 Deney-5 (Ts=13 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları

Deney-6'da plaka yüzey sıcaklığı diğer deneylere göre en yüksek değere sahip olduğu için en düşük akılar bu deney bulgularından elde edilmiştir. Işınım ısı akısı 19-24 W/m^2 aralığında salınım gösterirken, taşınım ısı akısı 37 W/m^2 ortalama ile 30-50 W/m^2 aralığında değişmiştir. Toplam duyulur ısı akısı 50-80 W/m^2 aralığında salınım gösterirken, deney boyunca ortalaması 58 W/m^2'dir (Şekil 4.43).



Şekil 4.43 Deney-6 (Ts=14 °C) zamana bağlı duyulur, ışınım ve taşınım ısı akıları

4.4.3 Sürekli Rejim İçin Deneysel Duyulur ve Gizli Isı Transfer Katsayıları

Bu bölümde sürekli rejim durumu için; ışınım, toplam duyulur, yoğuşma ve toplam ısı transfer katsayıları için deneysel ampirik ifadeler oluşturulmuştur. Isı transfer katsayısı korelasyonları, ısı akılarına ve karakteristik sıcaklık farklarına bağlı olarak elde edilmiştir. Yapılan hesapların detay teorisi Bölüm 3'deki deneysel yöntem kısmında detaylı olarak anlatılmıştır.

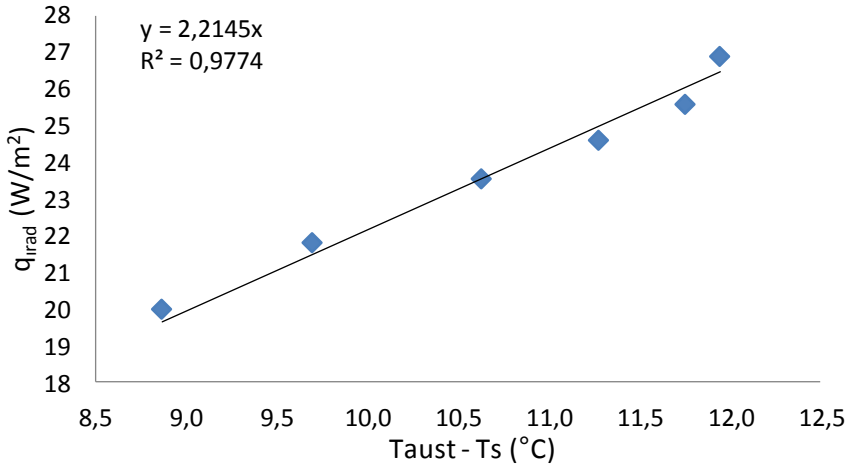
Hesaplamalarda deneylerin sürekli rejime girdiği ve ölçüm bulgularının çok fazla sapmadığı 480-840 dakikaları arasındaki verilerin ortalamaları kullanılmıştır. Çizelge 4.9'da ölçülen sıcaklık değerleri, deney bulgularından hesaplanan ısı akıları ve ısı transfer katsayıları yer almaktadır.

Çizelge 4.9 Sürekli hal ısı transfer hesap bulguları

Deney		D1	D2	D3	D4	D5	D6
T_s	(°C)	10,6	10,9	11,4	12,2	13,0	14,0
T_d	(°C)	15,0	15,1	15,2	15,3	15,5	16,1
T_{AUST}	(°C)	22,5	22,6	22,6	22,8	22,7	22,9
T_a	(°C)	22,5	22,6	22,7	22,8	22,7	22,9
T_{MRT}	(°C)	22,4	22,5	22,3	22,7	22,6	22,8
T_{op}	(°C)	22,4	22,6	22,5	22,8	22,7	22,9
$\dot{q}_{top}$	(W/m^2)	102,42	99,2	92,24	85,68	74,9	66,34
$\dot{q}_{kay}$	(W/m^2)	5,91	5,78	4,73	4,63	4,19	3,84
$\dot{q}_{net}$	(W/m^2)	96,51	93,42	87,51	81,05	70,71	62,5
$\dot{q}_{giz}$	(W/m^2)	14,68	13,75	12,13	9,72	8,11	6,92
$\dot{q}_{duy}$	(W/m^2)	81,83	79,67	75,38	71,33	62,6	55,58
$\dot{q}_{rad}$	(W/m^2)	26,85	25,55	24,59	23,54	21,77	19,95
$\dot{q}_{taş}$	(W/m^2)	54,98	54,12	50,79	47,79	40,83	35,63
$h_{yoğ}$	(W/m^2.K)	3,34	3,31	3,14	3,10	3,19	3,39
h_{top}	(W/m^2.K)	8,14	7,98	7,83	7,65	7,30	7,06
h_r	(W/m^2.K)	2,25	2,17	2,18	2,21	2,24	2,25
$T_{op}-T_s$	(°C)	11,9	11,7	11,1	10,6	9,7	8,9
T_d-T_s	(°C)	4,4	4,2	3,8	3,1	2,5	2,1
$T_{AUST}-T_s$	(°C)	11,9	11,7	11,2	10,6	9,7	8,9

Şekil 4.44'de ışınım ısı akısının, yoğuşturucu yüzey sıcaklığı (T_s) ile ortalama ısıtılmayan yüzey sıcaklığının (T_{aust}) farkına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre lineer eğilim çizgisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eğilim çizgisinin eğimi ortalama ışınım ısı transfer katsayısını vermektedir.

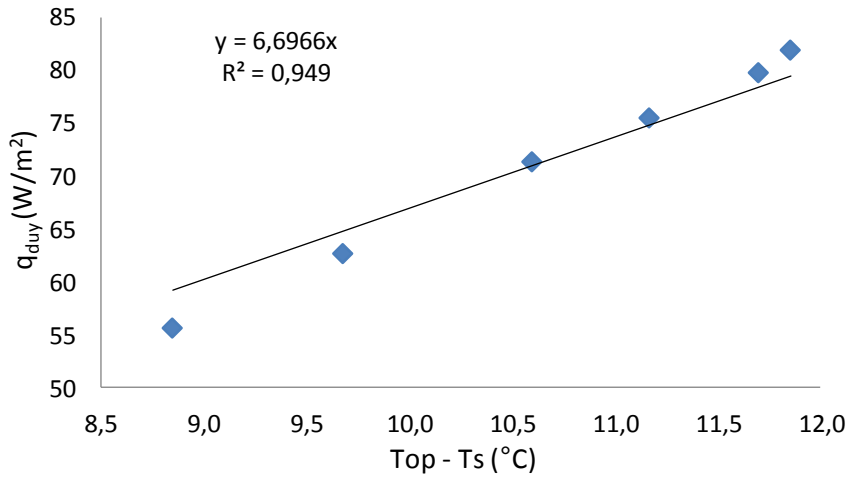
$$\dot{q}_{rad} = 2,21\left(T_{aust} - T_s\right) \tag{4.6}$$



Şekil 4.44 Işınım ısı transfer katsayısı korelasyonu

Şekil 4.45'de toplam duyulur ısı akısının, yoğuşturucu yüzey sıcaklığı (T_s) ile operatif sıcaklığının (T_{op}) farkına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre lineer eğilim çizgisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eğilim çizgisinin eğimi toplam duyulur ısı transfer katsayısını vermektedir.

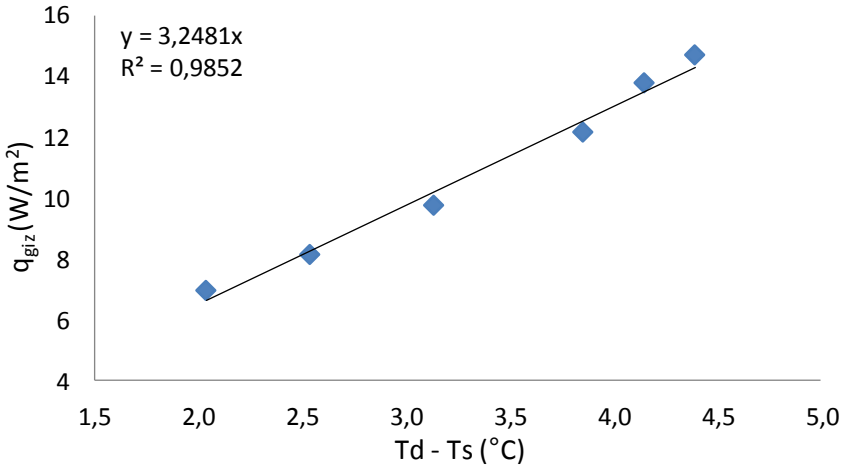
$$\dot{q}_{duy} = 6,69\left(T_{op} - T_s\right) \tag{4.7}$$



Şekil 4.45 Duyulur ısı transfer katsayısı korelasyonu

Şekil 4.46'da gizli ısı akısının, yoğuşturucu yüzey sıcaklığı (T_s) ile yüzey sıcaklığına karşılık gelen doyma sıcaklığının (T_d) farkına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre lineer eğilim çizgisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eğilim çizgisinin eğimi gizli ısı transfer katsayısını vermektedir.

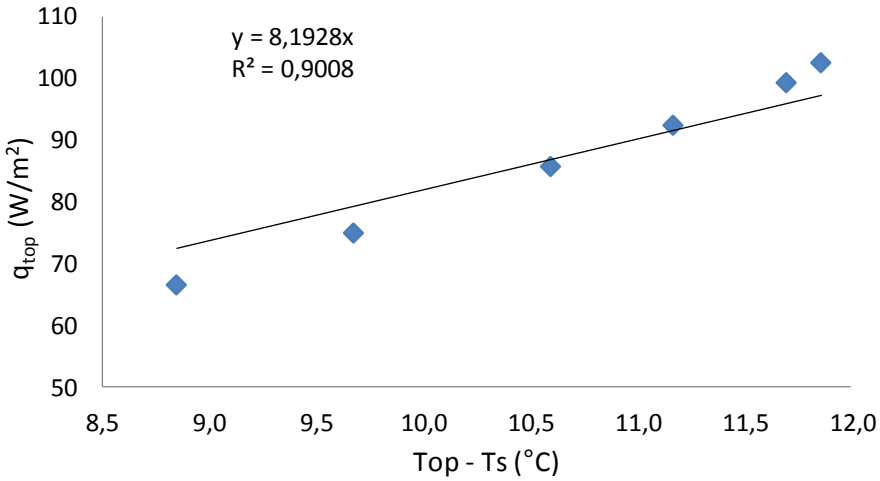
$$\dot{q}_{giz} = 3,24\left(T_d - T_s\right) \tag{4.8}$$



Şekil 4.46 Gizli ısı transfer katsayısı korelasyonu

Şekil 4.47'de toplam ısı akısının, yoğuşturucu yüzey sıcaklığı (T_s) ile operatif sıcaklığının (T_{op}) farkına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre lineer eğilim çizgisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eğilim çizgisinin eğimi toplam ısı transfer katsayısını vermektedir.

$$\dot{q}_{top} = 8,19\left(T_{op} - T_s\right) \tag{4.9}$$



Şekil 4.47 Toplam ısı transfer katsayısı korelasyonu

Elde edilen bulgulara göre özetle:

Toplam ısı transfer katsayısı 8,19 ($W/m^2.K$)

Toplam duyulur ısı transfer katsayısı 6,69 ($W/m^2.K$)

Işınım ısı transfer katsayısı 2,21 ($W/m^2.K$)

Yoğuşma ısı transfer katsayısı 3,24 ($W/m^2.K$)

4.4.4 Serbest Taşınım Şartlarında Düşey Plakada Eş Zamanlı Taşınımla Gerçekleşen Isı ve Kütle Geçişi İçin Oluşturulan Korelasyonlar

Bu bölümde serbest taşınım şartlarında düşey bir plakada eş zamanlı ısı ve kütle geçişi incelenmiştir.

Her bir deney için Bölüm 3.4.1'de detaylı olarak anlatılan enerji dengesi ve Bölüm 3.4.2'de detaylandırılan hesap yöntemiyle net duyulur, gizli, taşınımla ve ışınımla olan ısı akıları ve ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Bölüm 3.4.3'deki hesaplama yöntemiyle ise ortalama kütle taşınım katsayısı (h_m) hesaplanmış ve Nu-Ra ve Sh-$Ra^{'}$ bağıntıları oluşturulmuştur. Tüm deneyler için hesaplarda kullanılan ölçümler ve hesaplanan değerler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 Eş zamanlı ısı ve kütle geçişi hesap tablosu

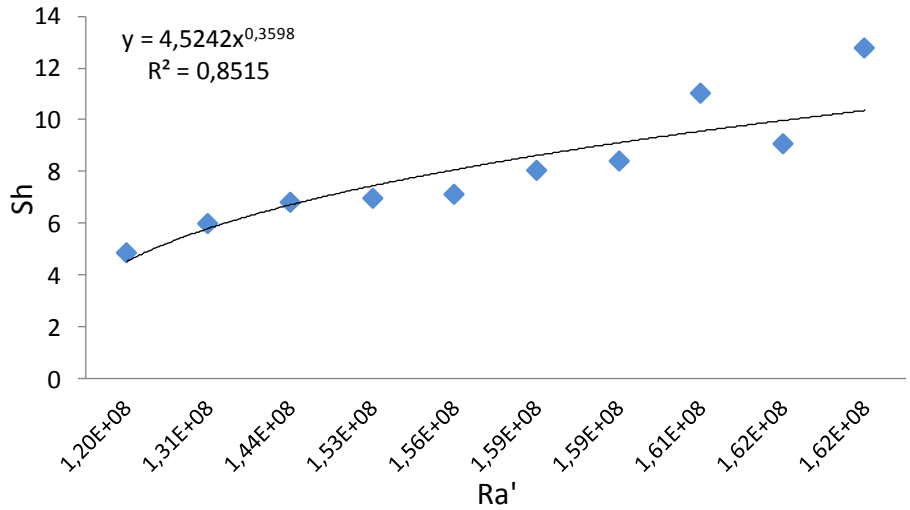
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
Plaka yüzey sıcaklığı	T_s	°C	10,6	10,9	11,4	12,2	13,0	14,0	10,3	10,3	10,2	10,7
Ortam Sıcaklığı	T_a	°C	22,5	22,6	22,7	22,8	22,7	22,9	22,3	22,1	21,9	22,1
Ortalama sıcaklık	T_f	°C	16,5	16,8	17,0	17,5	17,8	18,5	16,3	16,2	16,0	16,4
Ortalama ortam bağıl nemi	φ	%	67,5	68,3	69,2	70,8	72,5	74,3	74,9	69,1	66,3	65,4
Konsantrasyon farkına bağlı yoğunluk etkisi	$\Delta\rho c/\rho$	-	-0,01116	-0,01113	-0,01110	-0,01108	-0,01102	-0,00098	-0,01106	-0,01110	-0,01109	-0,011110
Sıcaklık farkına bağlı yoğunluk etkisi	$\Delta\rho c/\rho$	-	0,0595	0,0590	0,0570	0,0542	0,0500	0,0464	0,0586	0,0589	0,0581	0,0576
Toplam yoğunluk etkisi	$\Delta\rho/\rho$	-	0,048	0,047	0,046	0,043	0,039	0,036	0,048	0,048	0,047	0,046
Net ısı transferi	Q_{net}	W	48,2	46,7	43,7	40,5	35,3	31,2	53,8	48,6	43,9	42,3
Işınımla olan ısı transferi	Q_{rad}	W	13,4	12,7	12,3	11,7	10,8	10	11,7	11,6	11,6	11,3
Taşınımla olan ısı transferi	$Q_{taş}$	W	27,4	27,0	25,4	23,9	20,4	17,8	31,3	28,5	26,0	25,4
Gizli ısı transferi	$Q_{giz.}$	W	7,34	6,88	6,07	4,86	4,06	3,46	10,88	8,52	6,21	5,55

Çizelge 4.10 Eş zamanlı ısı ve kütle geçişi hesap tablosu (devamı)

Ortalama kütle taşınım katsayısı	hm	m^2/s	0,00043	0,00040	0,00033	0,00033	0,00028	0,00023	0,00070	0,00052	0,00038	0,00034
Isı taşınım katsayısı	h	$W/m^2.K$	4,65	4,64	4,61	4,44	4,16	4,04	5,24	4,82	4,48	4,45
Sherwood sayısı	Sh	-	9,0	8,4	6,9	6,8	5,9	4,8	13,04	10,9	8,0	7,0
Nusselt sayısı	Nu	-	91,2	91,0	90,3	86,8	81,3	78,8	98,3	94,6	88,1	87,5
Grashoff sayısı	Gr x 10^8	-	2,64	2,61	2,5E	2,35	2,15	1,96	2,64	2,64	2,60	2,55
Kütle geçişi için Rayleigh sayısı	Ra' x 10^8	-	1,62	1,59	1,53	1,44	1,31	1,20	1,62	1,61	1,59	1,56
Rayleigh sayısı	Ra x 10^8	-	1,87	1,85	1,78	1,67	1,52	1,39	1,87	1,87	1,85	1,81

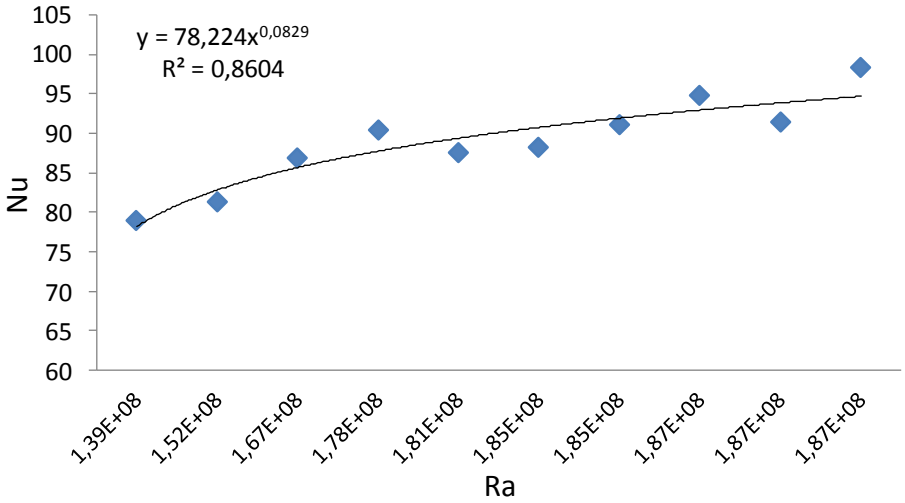
Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda Sh ve Nu sayılarının Ra sayılarına bağlı olarak değişimi $y = a.x^b$ fonksiyonu şeklinde tanımlandığından bu çalışmada da aynı fonksiyon üzerinden korelasyonlar oluşturulmuştur. Sırasıyla hesaplanan Nu, Ra, Sh ve Ra' değerleri için düşey levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için $Sh_L = c\left(Ra'\right)^n$ ve $Nu_L = c\left(Ra\right)^n$ korelâsyonları oluşturulmuştur.

Düşey bir levhada serbest eşzamanlı ısı ve kütle taşınım şartlarında kütle geçişi için $1{,}20x10^8 < Ra' < 1{,}62x10^8$ aralığında $Sh_L = 4{,}52xRa'^{\,0{,}3598}$ korelasyonu oluşturulmuştur (Şekil 4.48).



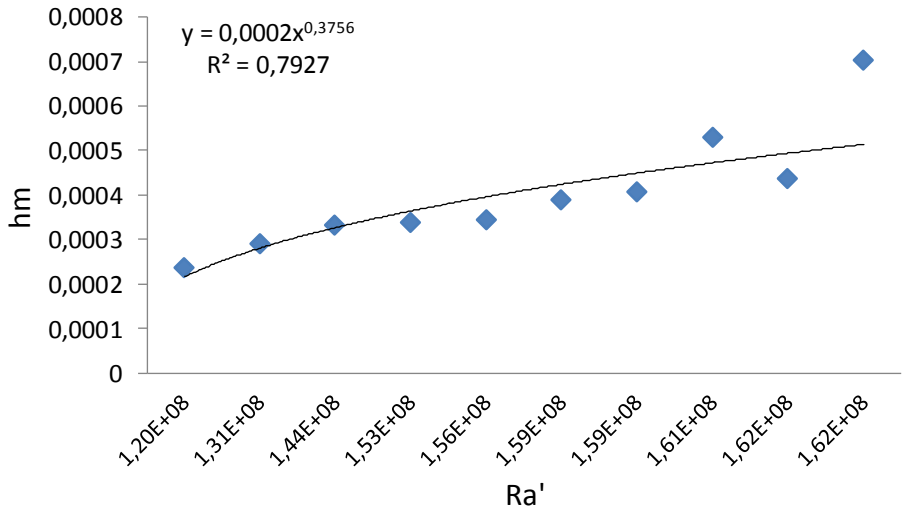
Şekil 4.48 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için deneysel değerler ve kütle geçişi için oluşturulan korelasyon

Düşey bir levhada serbest eşzamanlı ısı ve kütle taşınım şartlarında ısı geçişi için $1{,}39x10^8 < Ra < 1{,}87x10^8$ aralığında $Nu_L = 78{,}22xRa^{\,0{,}082}$ korelasyonları oluşturulmuştur (Şekil 4.49).



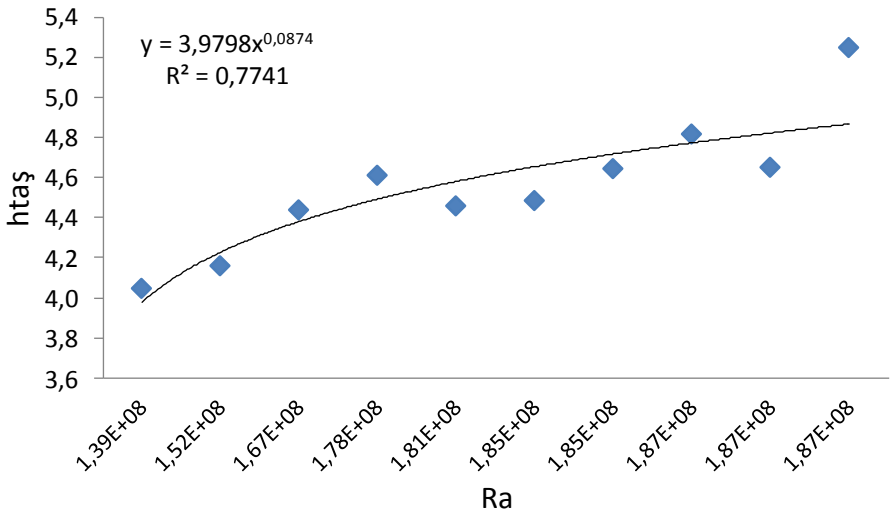
Şekil 4.49 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için deneysel değerler ve ısı geçişi için oluşturulan korelasyon

Şekil 4.50'de $Ra^{'}$ sayısına bağlı olarak kütle taşınım katsayısı (h_m) değişimi incelenmiştir. $1,20x10^8 < Ra^{'} < 1,62x10^8$ aralığında $h_m = 0,0002xRa^{'\,0,3756}$ korelasyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan korelasyon $Ra^{'}$-h_m için oluşturulan eğilime çok benzer çıkmıştır.



Şekil 4.50 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için $Ra^{'}$ – hm değişimi

Şekil 4.51'de Ra sayısına bağlı olarak taşınım ısı transfer katsayısı ($h_{taş}$) değişimi verilmiştir. $1,39x10^8 < Ra < 1,87x10^8$ aralığında $h_{taş} = 3,979xRa^{\,0,0874}$ korelasyonları oluşturulmuştur.



Şekil 4.51 Serbest taşınım şartlarında düşey bir levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için Ra – htaş değişimi

BÖLÜM 5

BULGU VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ışınımsal soğutma sistemleriyle entegre çalışabilecek nem alıcı hibrid panel (yoğuşturucu plaka) üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Hibrid panel ile mahal içerindeki su buharının yoğuşturulmasıyla ışınımsal soğutma panelleri üzerinde muhtemel yoğuşmanın önlenmesi ve mahal içerisindeki termal konfor şartlarının iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu bağlamda Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. şirketinin sıcaklık ve bağıl nem değerleri hassas olarak kontrol edilebilen iklimlendirme laboratuvarında deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Kapalı bir hacim içerisinde serbest taşınım şartlarında yoğuşmanın sayısal modellenmesi için özel bir sayısal kod kullanılmıştır. Kullanılan sayısal kod içerisindeki kaynak terimleri ve özel çözüm algoritmaları kullanılarak düşey bir plaka üzerinde gerçekleşen film yoğuşması sayısal olarak da modellenmiş ve aynı şartlardaki deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak:

- Her bir deney için plaka üzerinde zamana bağlı yoğuşma debileri hesaplanmış, sayısal ve analitik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır.
- Tüm deneyler için ölçülen yoğuşma akılarının su buharı kısmi basınç farkına göre ifade edilmesiyle bulgular genelleştirilmiştir.
- Zamana bağlı duyulur ve gizli ısı akıları hesaplanmıştır.
- Sürekli rejim için ışınım, toplam ve yoğuşma ısı transfer katsayılarının hesaplanmıştır.

- Sadece ısı geçişinin olduğu kuru deneylerin bulguları kullanılarak, düşey bir plaka üzerinde serbest taşınım şartlarında ısı geçişi için Ra-Nu korelasyonu önerilmiştir.
- Isı ve kütle geçişinin olduğu ıslak deneyler için, belirlenen hesap yöntemi ile her deney için Ra, Nu, $Ra^{'}$, Sh sayıları hesaplanmıştır. Bu değerler yardımıyla sabit yüzey sıcaklığındaki düşey bir plaka üzerinde serbest taşınım şartlarında eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için yeni korelâsyonlar önerilmiştir.

5.1 Bulgular

- Toplam duyulur, ışınım ve taşınımla olan ısı akılarının zamana bağlı değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Tüm deneylerde görülen ortak bulgu ışınımla olan ısı transfer akısı zamanla çok değişmemektedir. Taşınımla olan ısı akısı, toplam ısı akısından, gizli ve ışınımla ısı akısının çıkarılmasıyla elde edildiğinden, gizli akısındaki salınımdan dolayı bir miktar salınım göstermiştir. Toplam duyulur ısı akısı ise ilk 480 dakika bir miktar azalmasına rağmen 480. dakikadan sonra çok fazla salınım göstermemiştir.
- Sürekli rejim durumu için; ışınım, toplam duyulur, yoğuşma ve toplam ısı transfer katsayıları için deneysel ampirik ifadeler oluşturulmuştur. Isı transfer katsayısı korelasyonları, ısı akılarına ve karakteristik sıcaklık farklarına bağlı olarak elde edilmiştir.

Elde edilen bulgulara göre özetle:

Toplam ısı transfer katsayısı	8,19 ($W/m^2.K$)
Toplam duyulur ısı transfer katsayısı	6,69 ($W/m^2.K$)
Işınım ısı transfer katsayısı	2,21 ($W/m^2.K$)
Yoğuşma ısı transfer katsayısı	3,24 ($W/m^2.K$)

- Deneysel verilerin değerlendirilebilmesi için, hava-su buharı karışımının ideal bir gaz karışımı olduğu kabul edilerek, sıcaklık ve derişikliğe bağlı kaldırma etkisi, toplam yoğunluk farkına bağlı tek bir Grashof sayısı ile ifade edildi. Serbest taşınım şartlarında düşey plaka yüzeyinden sadece ısı geçişinin incelendiği ve

hava-su buharı karışımının ideal bir gaz olarak kabul edildiği durumda, yoğunluk farkı oranına göre hesaplanan Gr sayısı ile, sıcaklık farkı ve hacimsel ısıl genleşme katsayısına bağlı hesaplanan Gr sayıları karşılaştırıldı ve değerlerin eşit çıktığı görüldü. Bu bulgu yapılan yaklaşım ve hesaplamaların doğruluğunu gösterdi.

- Tanımlanan yeni Grashof sayısı kullanılarak serbest taşınım şartlarında düşey plaka için sadece ısı geçişi ve eş zamanlı ısı kütle geçişi için geçerli korelayonların oluşturulabilmesi amacıyla Ra, $Ra^{'}$, Nu, Sh değerleri hesaplandı.
- Sadece ısı geçişinin olduğu (kuru durum) deneyler için $7{,}78x10^{7}$< Ra <$1{,}55x10^{8}$ aralığı için $Nu_L=9{,}709xRa^{0{,}1854}$ bağıntısı oluşturulmuştur.
- Düşey bir levhada serbest eşzamanlı ısı ve kütle taşınım şartlarında (ıslak durum) kütle geçişi için $1{,}20x10^{8}$ < $Ra^{'}$ < $1{,}62x10^{8}$ aralığında Sh_L= $4{,}52xRa^{'0{,}3598}$ bağıntısı oluşturulmuştur.
- Düşey bir levhada serbest eşzamanlı ısı ve kütle taşınım şartlarında ısı geçişi için $1{,}39x10^{8}$<Ra<$1{,}87x10^{8}$ aralığında $Nu_L=78{,}22xRa^{0{,}082}$ bağıntıları oluşturulmuştur.
- Deneysel ölçümlerin neredeyse sürekli hale geldiği 480-840 dakikaları arasındaki verilerin ortalamaları kullanılarak yoğuşma akıları plaka yüzeyi ile sınır tabaka dışındaki su buharı kısmi basınç farkları cinsinden ifade edilmiştir. Bulgular incelendiğinde su buharı kısmi basıncının artmasıyla doğrusal eğilimde yoğuşan miktarın da arttığı görülmüştür.
- Her bir deney için zamana bağlı yoğuşma debileri hesaplandı. Plaka üzerinde gerçekleşen yoğuşma dinamikleri detaylı olarak irdelendi. Her bir deney için, sayısal ve analitik olarak hesaplanan yoğuşma (kütle transferi) deneysel verilerle karşılaştırıldı.
- Deneylerden elde edilen yoğuşma debilerinin zamana bağlı değişimlerini incelediğimizde, tüm deneyler arasında benzer bir eğilim elde edilmiştir. Tüm deneylerde mahal içerisindeki bağıl nem değerinin azalmasına bağlı olarak plaka üzerinde gerçekleşen yoğuşma debileri logaritmik olarak azalmıştır. 600. dakikadan sonra ise yoğuşma debileri neredeyse sabitlenmiştir.

- Bulgulara göre hesaplanan sayısal ortalama yoğuşma debisi, deneysel ortalama yoğuşma debisinden yaklaşık % 7 - % 13,5 arasında fazla çıkmıştır. Analitik olarak hesaplanan potansiyel yoğuşma debisi hesabı ise 10 deneyin 9'unda deneysel ölçümlerden % 3 ile % 6,5 arasında fazla çıkmıştır. Bir deneyde ise % 1 oranında düşük çıkmıştır. Genel eğilim olarak görünen sayısal ve analitik yoğuşma debisi hesabının deneysel akılardan fazla çıkmasının ön görülen nedeni, yüzeyde yoğuşan su buharının yüzey tarafından bir miktar depolanmasıdır. Deneysel ölçümlerin, analitik olarak hesaplanan yoğuşma potansiyelinden bir miktar sapmasının diğer bir nedeni ise analitik hesaplarda, ölçüm noktası ile plaka yüzeyi arasında su buharı kütle oranının doğrusal olarak değiştiği kabulüdür. Eğer o bölgedeki gerçek profil iyi bir şekilde hesaba katılsaydı, analitik olarak hesaplanan yoğuşma debileri deneysel ölçümlere daha çok yaklaşacaktı.

- Deney bulguları ile aynı şatlarda yürütülen sayısal çalışmaların bulguları karşılaştırılmıştır. Yürütülen 10 farklı deney ve analiz çalışmaları sonucunda ilk 900 dakikadaki yoğuşan toplam su buharı miktarları bulguları karşılaştırılmıştır.

- Deney bulguları incelendiğinde, sayısal ve deneysel çalışmalar arasındaki sapma % 6,8 - %13,4 arasında olmuştur. En düşük sapma başlangıç bağıl nem değerinin en az ve dolayısıyla yoğuşan miktarın en az olduğu CFD-10 bulgularında olmuştur. Tüm bulgular irdelendiğinde de sayısal çalışmalarla hesaplanan toplam yoğuşan miktarın deneysel olarak ölçülen toplam yoğuşma miktarından ortalama %8,9 oranında fazla çıktığı görülmüştür. Yoğuşan miktarın gram mertebelerinde düşük olması ve deneysel yoğuşmanın ölçümündeki belirsizlerin olmasına rağmen bulgulardaki sapma %15 mertebesinin altında kalmıştır. Bu durum gösteriyor ki sayısal model bu tarz problemlerin çözümünde rahatlıkla kullanılabilir.

- Farklı plaka yüzey sıcaklıklarının parametre olarak çalışıldığı deneysel çalışmalar için zamana bağlı olarak toplam, duyulur ve gizli transfer akılarının değişimi hesaplanmıştır. Alınan ölçümler ve sonrasında yapılan hesaplamalara göre toplam, duyulur ve gizli transfer akıları zamanla düşmektedir. Duyulur ısı transferi miktarlarının zamana bağlı olarak azalmasının sebebi yoğuşturucu plakanın soğutma etkisiyle mahal içerisindeki havanın ve yüzeylerin sıcaklığının azalması

ve sonucunda taşınımla ve ışınımla olan ısı transferinin azalmasıdır. Gizli ısı transferinin azalmasının nedeni ise gerçekleşen yoğuşmadan dolayı oda içerisindeki su buharı kütle oranının zamana bağlı azalmasıyla yüzeyde gerçekleşen yoğuşma akıların azalmasıdır.

5.2 Öneriler

- Mahal içerisinde nem alma amaçlı böyle bir plakanın uygulamaya nasıl geçirileceği ve ışınımsal soğutma sisteme nasıl entegre edileceği konusu üzerinde çalışılmalıdır.
- Bu tezde çalışılan hibrid panelin ışınımsal soğutma sisteminde gerçek boyutta entegrasyonuyla gerçek ölçekte deneysel çalışmalar yürütülebilir.
- Işınımsal soğutma sistemine entegre edilebilecek nem alma kapasitesi daha yüksek sistemler üzerinde araştırmalar devam edilebilir. Bu bağlamda benzer çalışmalar zorlanmış taşınım şartları için de tekrarlanabilir.
- Farklı yoğuşturucu plaka büyüklüğünün ısı ve kütle geçişine etkisi ve türbülans şartları incelenip bu çalışmanın bulgularıyla karşılaştırılabilir.
- Yoğuşturucu plaka yüzeyine yakın bölgelere daha sık sıcaklık ve nem sensörü konumlandırılarak ısı ve kütle geçişinin gerçekleştiği dar bölgedeki sıcaklık ve su buharı kütle oranı profilleri deneysel olarak elde edilebilir.
- Bu çalışmada ihmal edilen sıvı film direncinin ısı ve kütle geçişine etkisi sayısal olarak modellenerek incelenebilir.
- Mahal içerisinde nem üretimi olduğu durum için ısı-kütle geçiş şartları sayısal ve deneysel olarak daha detaylı olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

[1] Okamoto, S., Kitora, H., Yamaguchi H. ve Oka, T., (2010). "A Simplified Calculation Method For Estimating Heat Flux From Ceiling Radiant Panels", Energy and Buildings, 42: 29-33.

[2] Imanari, T., Omori, T. ve Bogaki, K., (1999). "Thermal Comfort and Energy Consumption of The Radiant Ceiling Panel System, Comparison with The Conventional All-Air System", Energy and Buildings, 30: 167-175.

[3] Kitagawa, K., Komoda, N., Hayano, H. ve Tanabe, S., (1999). "Effect of Humidity and Small Air Movement on Thermal Comfort Under a Radiant Cooling Ceiling by Subjective Experiments", Energy and Buildings, 30: 185-193.

[4] Laouadi, A., (2004). "Development of a Radiant Heating and Cooling Model for Building Energy Simulation Software", Building and Environment, 39:421-431.

[5] Roulet, C. A., Rossy, J. P. ve Roulet Y., (1999). "Using Large Radiant Panels for Indoor Climate Conditioning", Energy and Buildings, 30: 121-126.

[6] Zmeureanu, R., Fazio, P. ve Haghighat, F., (1988). "Thermal Performance of Radiant Heating Panels", ASHRAE Transaction, 94 (2): 13-27.

[7] Dudkiewicz, E. ve Jezowiecki, J., (2009). "Measured Radiant Thermal Fields in Industrial Spaces Served by High Intensity Infrared Heater", Energy and Buildings, 41: 27-35.

[8] Miriel, J., Serres, L. ve Trombe, A., (2002). "Radiant Ceiling Panel Heating-Cooling Systems: Experimental and Simulated Study of The Performances, thermal comfort and energy consumptions", Applied Thermal Engineering, 22: 1861–1873.

[9] Ardehali, M.M., Panah, N.G. ve Smith, T.F., (2004). "Proof of Concept Modeling of Energy Transfer Mechanisms for Radiant Conditioning Panels", Energy Conversion and Management, 4: 38-42.

[10] Feng, G., Cao, G. ve Gang, L., (2006). "Practical Analysis of a New Type of Radiant Heating Technology in a Large Space Building", 6th International Conference for Enhanced Building Operations, Nov 6-9 2006 Shenzhen, China.

[11] Ghaddar, N. ve Salam, M., (2006). "Steady Thermal Comfort by Radiant Heat Transfer: The Impact of Heater Position", Heat Transfer Engineering, 27(7): 29-40.

[12] Yanli, R., ve Deying L., (2007). “Numerical Simulation of Thermal Comfort Degree in Radiant Floor Cooling Room”, Proceedings: Building Simulation.

[13] Richard, H., vd., (1997). “Effects of Standard Energy Conserving Measures on Thermal Comfort”, Building and Environment, 32: 31-43.

[14] Suya, W. ve Megumi M., (2008). “Evaluating The Low Exergy of Chilled Water in a Radiant Cooling System”, Energy and Buildings, 40: 1856–1865.

[15] Leen P. ve Richard D., (2009). “Thermal Comfort in Residential Buildings: Comfort Values and Scales for Building Energy Simulation”, Applied Energy, 86: 772–780.

[16] Fanger, P.O., (1973). Thermal Comfort, McGraw-Hill Book Co., New York.

[17] [17] Scheatzle, D.G., (1996). “A Proposed Combination Radiant/ Convective System for an Arizona Residence”, ASHRAE Transaction, 102 (1): 676-684.

[18] Lin, C., Auslander, D. ve Federspiel, C., (2002). “Multi-sensor Single Actuator Control of HVAC Systems”, 2nd International Conference for Enhanced Building Operations, Oct 14-18, Richardson, Texas.

[19] Freire, R.Z., Oliveira, G.H.C. ve Mendes, N., (2008). “Predictive Controllers for Thermal Comfort Optimization and Energy Savings”, ABCM Symposium Series in Mechatronics, 3: 839-848.

[20] [20] Zhang, Z. ve Pate, M.B., (1989). “A New Approach for Designing Heating Panels with Embedded Tubes”, ASHRAE Transaction, 95(1): 231-238.

[21] [21] Berglund, L., Rascati, R., ve Markel, M.L., (1982). “Radiant Heating Control for Comfort During Transient Conditions”, ASHRAE Transaction, 88(2): 765-775.

[22] [22] Athienitis, A.K. ve Shou, J.G., (1991). “Control of Radiant Heating Based on The Operative Temperature”, ASHRAE Transaction, 97(2): 787-794.

[23] Catalina, T., Virgone J., Kuznik F., (2009). “Evaluation of Thermal Comfort Using Combined CFD and Experimantation Study in a Deney Room Equipped with a Cooling Ceiling”, Building and Environment, 44: 1740-1750.

[24] Taeyeon, K., Doosam S., (2007). “Two-step Optimal Design Method Using Genetic Algorithms and CFD-Coupled Simulation for Indoor Thermal Environments”, Applied Thermal Engineering, 27: 3–11.

[25] Maxime Tye-Gingras, (2012). “Comfort and Energy Consumption of Hydronic Heating Radiant Ceilings and Walls Based on CFD Analysis”, Building and Environment, 54: 1-13.

[26] Nagano, K. ve Mochida T., (2004). “Experiments on Thermal Environmental Design of Ceiling Radiant Cooling for Supine Human Subjects”, Energy and Buildings, 39: 267-275.

[27] DeWerth, D.W. ve Loria, R.L., (1989). “In-space Heater Energy Use for Supplemental and Whole House Heating”, ASHRAE Transaction, 95(1): 239-250.

[28] Howell, R. H. ve Suryanarayana, S., (1990). “Sizing of Radiant Heating Systems: Part I-Ceiling Panels”, ASHRAE Transaction, 96 (1): 652-665.

[29] Sakoi, T., Tsuzuki, K., Kato, S., Ooka, R., Song, D. ve Zhu, S., (2007). “Thermal Comfort, Skin Temperature Distribution, and Sensible Heat Loss Distribution in the Sitting Posture in Various Asymmetric Radiant Fields”, Building and Environment, 42: 3984-3999.

[30] Roth, K., Dieckmann, J. ve Brodrick, J., (2007). “Infrared Radiant Heaters”, ASHRAE Journal, 49(6): 72-73.

[31] Myhren, J. A. ve Holmberg, S., (2008). “Flow Patterns and Thermal Comfort in a Room with Panel, Floor and Wall Heating”, Energy and Buildings, 40: 524-536.

[32] Stetiu, C., (1999). “Energy and Peak Power Savings Potential of Radiant Cooling Systems in U.S. Commercial Buildings”, Energy and Buildings, 30: 127-138.

[33] Franc, S., (1999). “Economic Viability of Cooling Ceiling Systems”, Energy and Building, 30: 195-201.

[34] Kilkis, B.I., Eltez, M. ve Sager, S.S., (1995). “A Simplified Model For The Design of Radiant In-Slab Heating Panels”, ASHRAE Transaction, 101(1): 210-216.

[35] Watson, R.D., Chapman, K.S., ve DeGreef, J.M., (1998). “Case Study: Seven-System Analysis of Thermal Comfort and Energy Use for a Fast-Acting Radiant Heating System”, ASHRAE Transaction, 104(1): 1106-1111.

[36] Hart, G.H., (1981). “Heating the Perimeter Zone of an Office Building”, ASHRAE Transaction, 87(2): 529-537.

[37] Milorad, B., Dragan C., (2012). “Energy, Cost, and CO_2 Emission Comparison Between Radiant Wall Panel Systems and Radiator Systems”, Energy and Buildings, 54: 496–502.

[38] Jeong, J.W., Mumma S.A., Bahnfleth W.P., (2003). “Energy Conservation Benefits of a Dedicated Outdoor Air System with Parallel Sensible Cooling by Ceiling Radiant Panels”, ASHRAE Transaction, 109: 319-325.

[39] Stefano, P. C., Enrico F., (2008). “The Impact of Indoor Thermal Conditions, System Controls and Building Types on the Building Energy Demand”, Energy and Buildings, 40: 627–636.

[40] Brunk, M.F., (1993). “Cooling Ceilings-An Opportunity to Reduce Energy Costs by Way of Radiant Cooling”, ASHRAE Transaction, 99: 479-490.

[41] Gregor P., (2007). “Henze Impact of Adaptive Comfort Criteria and Heat Waves on Optimal Building Thermal Mass Control”, Energy and Buildings, 39: 221–235.

[42] Petras, D. ve Kalus, D., (2000). “Effect of Thermal Comfort/Discomfort Due to IR Heaters Installed at Workplaces in Industrial Buildings”, Indoor Built Environment, 9: 148-156.

[43] Kalisperis, L.N., Steinman, M., Summers, L.H., and Olesen, B., (1990). "Automated Design of Radiant Heating Systems Based on MRT", ASHRAE Transaction, 96(1): 1288-1295.

[44] Ling, M.D.F., ve Deffenbaugh, J.M., (1990). "Design Strategies For Low Temperature Radiant Heating Systems Based on Thermal Comfort Criteria", ASHRAE Transaction, 96(1): 1296-1305.

[45] Simmonds, P., (1996). "Practical Applications of Radiant Heating & Cooling to Maintain Comfort Conditions", ASHRAE Transaction, 102 (1): 659-666.

[46] Vangtook, P. ve Chirarattananon, S., (2006). "An Experimental Investigation of Application of Radiant Cooling in Hot Humid Climate", Energy and Buildings, 38: 273-285.

[47] Ramesh, N. ve Venkateshan, S.P., (1999). "Effect of Surface Radiation on Natural Convection in a Square Enclosure", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 13: 299-301.

[48] Velusamy, K. ve Sundarajan, T., (2001). "Interaction Effects Between Surface Radiation and Turbulent Natural Convection in Square and Rectengular Enclosures", Journal of Heat Transfer, 123: 1062-107.

[49] Kamal, S. ve Novak, P., (1991). "Dynamic Analysis of Heat Transfer in Building with Special Emphasis on Radiaiton", Energy and building, 17: 231-241.

[50] Mezhrab, A. ve Bchir, L., (1998). "Radiation-Natural Convection Interactions In Partioned Cavities", Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow, 7: 781-799.

[51] Rabhi, M. ve Bouali, H., (2008). "Radiation-Natural Convection Heat Transfer in Inclined Rectangular Enclosures With Multiple Partitions", Energy Conversion and Management, 49: 1228-1236.

[52] Nouanegue, H. ve Muftuoglu, A., (2008). "Conjugate Heat Transfer by Natural Convection, Conduction and Radiaiton in Open Cavities", International Journal of Heat and Mass Transfer, 51: 6054-6062.

[53] Causone, F. ve Corgnati S.P., (2009). "Experimental Evaluation of Heat Transfer Coefficinets Between Radiant Ceiling and Room", Energy and building, 41: 622-628.

[54] Chen, Q. ve Kooi, J.V.D.R., (1988). "Accuracy: a Computer Program for Combined Problems of Energy Analysis, Indoor Air Flow and Air Quaility", ASHRAE Transaction, 94(2): 196-214

[55] Stetius, C. ve Feustel, H.E., (1995). "Development of a Model to Simulate the Performance of Hydronic/RAdiant Cooling Ceiling", Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), Report No: 36636, Berkeley, CA.

[56] Conroy, C.L. ve Mumma, S.A., (2001). "Ceiling Radiant Cooling Panels as a Viable Distributed Parellel Sensible Cooling Technology Integrated with Dedicagted Outdoor Air Systems", ASHRAE Transaction, 107(1): 578-585.

[57] Jeong, J.W. ve Mumma, S.A., (2003). “Ceiling Radiant Cooling Panel Capasity Enhanced by Mixed Convection in Mechanically Ventilated Spaces”, Applied Thermal Enginnering, 23: 2293-2306.

[58] Xiangyang, G., (2007). “Dissertation of Investigation of a Radiantly Heated and Cooled Office with an Integrated Desiccant Ventilation Unit”, Texas A&M University, Report No: 14356.

[59] Fonseca, N., Cuevas, C. ve Lemort V., (2010). “Radiant Ceiling System Coupled to its Environment Part 1: Experimental Analysis”, Applied Thermal Engineering, (in press).

[60] Shigeru, O. ve Hisataka, K., (2009). “A Simplified Method for Estimating Heat Flux From Ceiling Radiant Panels”, Energy and Building, 32: 530-8270.

[61] Taeyeon, K. ve Shinsuke, K., (2005). “Study on Indoor Thermal Environment of Office Space Controlled by Cooling Panel System Using Field Measurement and the Numerical Simulation”, Building and Environment, 40: 301 – 310.

[62] Manuel A. ve Tejero-González A., (2012). “Experimental Study on the Cooling Capacity of a Radiant Cooled Ceiling System”, Energy and Buildings, 54: 207–214.

[63] Rafet, K., (2009). “New Approach Relevant to Rotal Heat Transfer Coefficient Including The Effect of Radiation and Convection at the Ceiling in a Cooled Ceiling Room”, Applied Thermal Engineering, 29: 1561–1565.

[64] Awbi, H.B., (1999). “Natural Convection From Heated Room Surfaces”, Energy and Buildings, 30: 233–244.

[65] Ferenc, K. ve Tünde K., (2012). “Interrelation Between Mean Radiant Temperature and Room Geometry”, Energy and Buildings, 55: 414–421.

[66] Awbi, H.B. ve Hatton, A., (2000). “Mixed Convection From Heated Room Surfaces”, Energy and Buildings, 32: 153–166.

[67] Gökhan, S. ve Muhsin, K., (2011). “Numerical Analysis of Air Flow, Heat Transfer, Moisture Transport and Thermal Comfort in a Room Heated by Two-Panel Radiators”, Energy and Buildings, 43: 137–146.

[68] Min, T.C., Schutrum, L.F., Parmelee, G.V. ve Vouris, J.D., (1956). “Natural Convection and Radiation in a Panel Heated Room”, ASHRAE Transaction, 62: 337–358.

[69] Khalifa, A.J.N. ve Marshall, R.H., (1990). “Validation of Heat Transfer Coefficients on Interior Building Surfaces Using a Real-Sized Indoor Deney Cell”, Int. J. Heat Mass Transfer, 33: 2219–2236.

[70] Delaforce, S.R., Hitchen, E.R. ve Watson, D.M.T., (1993). “Convective Heat Transfer at Internal Surfaces”, Building and Environment, 28: 211–220.

[71] Bellia, L. ve Minichiello, F., (2003). “A Simple Evaluator of Building Envelope Moisture Condensation According to an European Standard”, Building and Environment, 38: 457-468.

[72] Liu, J., Aizawa, H. ve Yoshino, H., (2004). "CFD Prediction of Surface Condensation on Walls and its Experimental Validation", Building and Environment, 39: 905-911.

[73] Loveday, D.L., Parson, K.C., Taki, A.H. ve Hodder, S.G., (2002). "Displacement Ventilation Environments with Chilled Ceilings: thermal comfort design within the context of the BS EN ISO 7730 versus adaptive debate", Energy and Buildings, 34: 573–579.

[74] Niu, J.L.Z., Zhang, L.Z. ve Zuo, H.G., (2002). "Energy Saving Potential of Chilled Ceiling Combined with Desiccant Cooling in Hot and Humid Climates", Energy and Buildings 34: 487–495.

[75] Xiaoli, H., Guoqiang, Z., Youming, C., Shenghua, Z. ve Demetrios, J.M., (2007). "A Combined System of Chilled Ceiling, Displacement Ventilation and Desiccant Dehumidification", Building and Environment 42: 3298–3308.

[76] Catalina, T. ve Virgone J., (2007). "Dynamic Simulation Regarding the Condensation Risk on a Cooling Ceiling Installed in an Office Room", Proceedings Building Simulation.

[77] Zhang, L.Z., (2006). "Energy Performance of Independent air Dehumidification Systems with Energy Recovery Measures", Energy 31: 1228–1242.

[78] Zhang, L.Z. ve Niu, J.L., (2002). "Performance Comparisons of Desiccant Wheels for air Dehumidification and Enthalpy Recovery", Applied Thermal Engineering 22: 1347–1367.

[79] Leigh, S.B., (2005). "A Study for Evaluating Performance of Radiant Floor Cooling Integrated with Controlled Ventilation", ASHRAE Transactions 111(1): 71–82.

[80] Song, D.S., Kim, T.Y., Song, S.W. ve Hwang, S.H.S.B., (2008). "Performance Evaluation of a Radiant Floor Cooling System Integrated with Dehumidified Ventilation", Applied Thermal Engineering, 28(11): 1299–1311.

[81] Hao, X., Zhang, Chen, G., Zou, Y. ve Moschandreas, D.J., (2007). "A Combined System of Chilled Ceiling, Displacement Ventilation and Desiccant Dehumidification", Building and Environment, 42: 3298-3308.

[82] Binghooth, A.S. ve Zainal, Z.A., (2012). "Performance of Desiccant Dehumidification with Hydronic Radiant Cooling System in Hot Humid Climates", Energy and Buildings, 51: 1–5.

[83] Zhang, L.Z. ve Niu, J.L., (2003). "Indoor Humidity Behaviors Associated with Decoupled Cooling Inhot and Humid Climates", Building and Environment, 38: 99–107.

[84] Niu, J.L., Zhang, Z.L. ve Zuo, H.G., (2002). "Energy Saving Potential of Chilled-Ceiling Combined with Desiccant Cooling in Hot and Humid Climate", Energy and Buildings, 34: 487-495.

[85] Binghooth, A.S. ve Zainal, Z.A., (2012). “Performance of Desiccant Dehumidification with Hydronic Radiant Cooling system in hot humid climates”, Energy and Buildings, 51: 1–5.

[86] Ameen, A. Ve Mahmud K., (2005). “Desiccant Dehumidification With Hydronic Radiant Cooling System For Air-Conditioning Applications İn Humid Tropic Climates”, ASHARE Transactions, 111(2): 225-237.

[87] Liu, X.H., Zhang, Y.K. Ve Jiang, Y., (2006). “Experimental Study On Mass Transfer Performances Of Cross Flow Dehumidifier Using Liquid Desiccant”, Energy Conversion And Management, 47(15): 2682–2692.

[88] Liu, X.H., Chang, X.M., Xia, J.Y. Ve Jiang, (2009). “Performance Analysis On The İnternally Cooled Dehumidifier Using Liquid Desiccant”, Building And Environment, 44(2): 299–308.

[89] Fauchoux, M., Bansa, M., Talukdar, P., Simonson, C.J. Ve Torvi, D., (2010). “Deneying And Modelling Of A Novel Ceiling Panel For Maintaining Space Relative Humidity By Moisture Transfer”, International Journal Of Heat And Mass Transfer, 53: 3961–3968.

[90] Mumma, S.A., (2003). “Chilled Ceiling Condensation Control, İn: Ashrae Iaq Applications”, Energy And Building, 5: 22–23.

[91] Ge, F., Guo, X., Liu, H., Wang, J. Ve Lu C., (2013). “Energy Performance Of Air Cooling Systems Considering İndoor Temperature And Relative Humidity İn Different Climate Zones İn China”, Energy And Buildings, 64: 145-153.

[92] Fauchoux, M.T., Simonson, C.J., Ve Torvi D.A., (2009). “Deneys Of A Novel Ceiling Panel For Maintaining Space Relative Humidity By Moisture Transfer From An Aqueous Salt Solution”, Journal Of Astm International, 6(4): Stp49038s.

[93] Fauchoux, M.T., Simonson, C.J., Ve Torvi D.A., (2008). “Investigation Of A Novel Ceiling Panel For Heat And Moisture Control İn Buildings”, 8th Nordic Sym-Posium On Building Physics, June 16–18: 1269–1276, Denmark.

[94] Fauchoux, M.T., Simonson, C.J. Ve Torvi, D.A., (2010). “Flow Visualization Of Airflow Through A Rectangular Duct With Combined Heat And Mass Transfer”, Proceedings Of The 14th International Heat Transfer Conference, August 8–13, Usa.

[95] Fauchoux, M.T., Talukdar,C.J., Simonson, C.J. Ve Torvi, D.A., (2011). “Cfd Modelling With Buoyancy Effects For A Heat And Moisture Transfer Ceiling Panel”, Asme–Jsme 8th Thermal Engineering Joint Conference Ajtec2011, March 13–17, Usa.

[96] Fauchoux, M., (2007). “Design And Performance Deneying Of A Novel Ceiling Panel For Simultaneous Heat And Moisture Transfer To Moderate İndoor Temperature And Relative Humidity”, University Of Saskatchewan.

[97] Astm Standard E104, (2007). Standard Practice For Maintaining Constant Relative Humidity By Means Of Aqueous Solutions, Usa.

[98] De La Rosa J.C., V.D., (2009). “Review On Condensation On The Containment Structures”, Progress İn Nuclear Energy 51: 32-66.

[99] Koh, J.C.Y., Sparrow, E.M. Ve Hartnett, J.P., (1962). “The Two-Phase Boundary Layer İn Laminar Film Condensation”, Int. J. Heat Mass Transfer, 2: 69–82.

[100] Sparrow, E.M. Ve Lin, S.H., (1964). “Condensation Heat Transfer İn The Presence Of A Noncondensable Gas”, J. Heat Transfer, 110: 430–436.

[101] Minkowycz, W.J. Ve Sparrow, E.M., (1966) “Condensation Heat Transfer İn The Presence Of Noncondensables, İnterfacial Resistances, Superheating, Variable Properties, And Diffusion”, Int. J. Heat Mass Transfer, 9: 1125–1144.

[102] Rose, J.W., (1969). “Condensation Of A Vapour İn The Presence Of A Non-Condensing Gas”, Int. J. Heat Mass Transfer, 12(2): 233–237.

[103] Zhu, A.M., V.D., (2007). “Effects Of High Fractional Noncondensable Gas On Condensation İn The Dew Vaporation Desalination Process”, Desalination, 214: 128–137.

[104] Park, S.K., Kim, M.H. Ve Yoo, K.J., (1997). “Effects Of A Wavy İnterface On Steam-Air Condensation On A Vertical Surface”, Int. J. Multiphase Flow, 23(6): 1031–1042.

[105] Ganguli, A., V.D., (2008). “Theoretical Modeling Of Condensation Of Steam Outside Different Vertical Geometries (Tube, Flat Plates) İn The Presence Of Noncondensable Gases Like Air And Helium”, Nucl. Eng. Des., 238(9): 2328–2340.

[106] Ma, X.H., Zhou, X.D., Lan, Z., Li, Y.M. Ve Zhang, Y., (2008). “Condensation Heat Transfer Enhancement İn The Presence Of Non-Condensable Gas Using The İnterfacial Effect Of Dropwise Condensation”, Int. J. Heat Mass Transfer, 51: 1728–1737.

[107] Gerstmann, J. Ve Griffith, P., (1967). “Laminar Film Condensation On The Underside Of Horizontal And İnclined Surfaces”, Int. J. Heat Mass Transfer, 10: 567–580.

[108] Chung, B.J. Ve Kim, S., (2005). “Film Condensations Of Flowing Mixtures Of Steam And Air On An İnclined Flat Plate”, Int. Commun. Heat Mass Transfer, 32: 233–239.

[109] Chung, B.J. Ve Kim, S., (2008). “ Film Condensations On Horizontal And Slightly İnclined Upward And Downward Facing Plates”, Heat Transfer Eng., 29(11): 936–941.

[110] Tagami, T., (1965). “Interim Report On Safety Assessments And Facilities Establishment Project”, Japanese Atomic Energy Research Agency, No: 1: 10-25.

[111] Uchida, H., Oyama, A. Ve Togo, Y., (1965). “Evaluation Of Post-İncident Cooling Systems Of Light-Water Power Reactors”, Proceedings Of International Conference On Peaceful Uses Of Atomic Energy, 13: 93-102.

[112] Kim, M.H. Ve Corradini, M.L., (1990). “Modeling Of Condensation Heat Transfer İn A Reactor Containment”, Nucl. Eng. Des., 118: 193-212.

[113] Fox, R.J., Peterson, P.F., Corradini, M.L. Ve Pertensteiner, A.P., (1997). “Free Convective Condensation İn A Vertical Enclosure”, Nucl. Eng. Des., 177: 71-89.

[114] Anderson, M.H., Herranz, L.E. Ve Corradini, M.L., (1998). “Experimental Analysis Of Heat Transfer Within The Ap600 Containment Under Postulated Accident Conditions”, Nucl. Eng. Des., 185: 153-172.

[115] Dehbi, A.A., (1990). “Analytical And Experimental Investigation Of The Effects Of Non-Condensable Gases On Steam Condensation Under Turbulent Natural Convection Conditions”, Ph.D. Dissertation, M.I.T. Department Of Nuclear Engineering, Usa.

[116] Liu, H., Todreas, N.E. Ve Driscoll, M.J., (2000). “An Experimental İnvestigation Of A Passive Cooling Unit For Nuclear Plant Containment”, Nucl. Eng. Des., 199: 243-255.

[117] Studer, E., Magnaud, J.P., Dabbene, F. Ve Tkatschenko, I., (2007). “International Standard Problem On Containment Thermal-Hydraulics Isp47. Step 1 - Results From The Mıstra Exercise”, Nucl. Eng. Des., 237: 536-551.

[118] Liao Y., Vierow, K., Dehbi, A. Ve Guentay S., (2009). “Transition From Natural To Mixed Convection For Steam–Gas Flow Condensing Along A Vertical Plate”, International Journal Of Heat And Mass Transfer 52: 366–375.

[119] Stevanovic, V.D., Stosic, Z.V. Ve Stoll, U., (2005). “Condensation İnduced Non-Condensables Accumulation İn A Non-Vented Pipe”, Int. J. Heat Mass Transfer, 48: 83-103.

[120] Ogg, D.G., (1991). “Vertical Downflow Condensation Heat Transfer İn Gas–Steam Mixtures”, Ms Thesis, University Of California, Berkeley, Ca, Usa.

[121] Siddique, M., (1990). “The Effects İf Noncondensable Gases İn Condensation Under Forced Convection Conditions”, Phd Thesis, Mıt, Cambridge, Ma, Usa.

[122] Kuhn, Y., Schrock, V.E. Ve Peterson, P., (1997). “An İnvestigation Of Condensation From Steam–Gas Mixtures Flowing Downward İnside A Vertical Tube”, Nucl. Eng. Design, 177: 53-69.

[123] Valencia, (2004). “Condensation Of Water Vapour And Acid Mixtures From Exhaust Gases”, Phd Thesis, Technical University Of Berlin, Germany.

[124] Martin-Valdepenas, J.M., Jimenez, M.A., Martin-Fuertes, F. Ve Fernandez-Benitez, J.A., (2005). “Comparison Of Film Condensation Models İn Presence Of Non-Condensable Gases İmplemented İn Cfd Code”, Heat And Mass Transfer, 41: 961–967.

[125] Benelmir, R., Mokraoui, S. Ve Souayed, A., (2009). “Numerical Analysis Of Filmwise Condensation İn A Plate Fin-And-Tube Heat Exchanger İn Presence Of Non-Condensable Gas”, Heat And Mass Transfer, 45: 1561–1573.

[126] Jackson J.D., Ahmadinejad M., (2002). “Heat Transfer From A Steam/Airmmixture To A Water-Cooled Condensing Plate ”, Heat Transfer.

[127] Sparrow, E.M. Ve Lin, S.H., (1964). “Condensation Heat Transfer İn The Presence Of Noncondensable Gas”, Asme J. Heat Transfer, 86: 430–436.

[128] Denny, V.E., Mills, A.F. Ve Jusionis, V.J., “Laminar Film Condensation From A Steam–Air Mixture Undergoing Forced Flow Down A Vertical Surface”, Asme J. Heat Transfer, 91: 297–304.

[129] Denny, V.E. Ve Jusionis, V.J., (1972). “Effects Of Noncondensable Gas And Forced Flow On Laminar Film Condensation”, Int. J. Heat Mass Transfer 15: 315–326.

[130] Debbissi, C., Orfi, J. Ve Ben Nasrallah, S., (2003). “Evaporation Of Water By Free Or Mixed Convection İnto Humid Air And Superheated Steam”, Int. J. Heat Mass Transfer, 46: 4703–4715.

[131] Lucas, K., (1976). “Combined Body Force Convection İn Laminar Film Condensation Of Mixed Vapours – İntegral And Finite Difference Treatment”, Int. J. Heat Mass Transfer, 19: 1273–1280.

[132] Siow, E.C., Ormiston, S.J. Ve Soliman, H.M., (2002). “Fully Coupled Solution Of A Two-Phase Model For Laminar Film Condensation Of Vapor–Gas Mixtures İn Horizontal Channels”, Int. J. Heat Mass Transfer, 45: 3689–3702.

[133] Neale, A., (2007). “A Study İn Computational Fluid Dynamics For The Determination Of Convective Heat And Vapour Transfer Coefficients”, Thesis Of M.A.Sc., Concordia University, Usa.

[134] Yang L., Paul F. Ve Jiwu R., (2012). “Numerical İnvestigation Of The İnfluence Of Room Factors On Ham Transportin A Full-Scale Experimental Room”, Building And Environment, 50: 114-124.

[135] Vaibhav, V., Prabal, T., (2013). “Numerical Studies For Performance Evaluation Of A Permeable Ceiling Panel For Regulation Of İndoor Humidity”, Energy And Buildings, 62: 158–165.

[136] Atsushi I., (2007). “A Study On Humidity Distribution İn A Room”, Proceedings: Building Simulation, 234:242.

[137] Raluca, T., (2013). “Integrated Moisture (İncluding Condensation) Energy Airflow Model Within Enclosures. Experimental Validation”, Building And Environment, 61: 197-209.

[138] Xiaojun, M., Xianting, L., Xiaoliang, S. Ve Xuan, J., (2013). “An Algorithm To Predict The Transient Moisture Distribution For Wall Condensation Under A Steady Flow Field”, Building And Environment, 67: 56-68.

[139] Cheng, L. Ve Junming, L., (2011). “Laminar Forced Convection Heat And Mass Transfer Of Humid Air Across A Vertical Plate With Condensation”, Chinese Journal Of Chemical Engineering, 19(6): 944-954.

[140] Dehbia, A.F., Janas, B. Ve Bell, (2013). “Prediction Of Steam Condensation İn The Presence Of Noncondensable Gases Using A Cfd-Based Approach”, Nuclear Engineering And Design, 258: 199-210.

[141] Houkema, M., Siccama, N.B., Lycklama À Nijeholt, J.A. Ve Komen, E.M.J., (2010). "Validation Of The Cfx4 Cfd Code For Containment Thermal-Hydraulics", Nucl. Eng. Des., 238: 590–599.

[142] Hie, C.K. Ve Moo, H.K., (1999). "Characteristics Of Film Condensation Of Supersaturated Steam-Air Mixture On A Flat Plate", International Journal Of Multiphase Flow, 25: 1601 – 1618.

[143] De La Rosa J.C., Herranz, L.E.Ve Munoz-Cobo, J.L., (2009). "Analysis Of The Suction Effect On The Mass Transfer When Using The Heat And Mass Transfer Analogy", Nuclear Engineering And Design, 239: 2042–2055.

[144] Karkoszka, K., Anglart, H., (2005). "Cfd Modelling Of Wall Condensation İn Presence Of Noncondensable Gas", Heat2005 (4th International Conference On Transport Phenomena İn Multiphase Systems), 12-24, September, Gdansk, Poland, 307–312.

[145] Jun-De, L., (2013). "Cfd Simulation Of Water Vapour Condensation İn The Presence Of Non-Condensable Gas İn Vertical Cylindrical Condensers", International Journal Of Heat And Mass Transfer, 57: 708–721.

[146] Foxa, R.J., Peterson, P.F., Corradini, M.L. Ve Pernsteiner, A.P., (1997). "Free Convective Condensation İn A Vertical Enclosure", Nuclear Engineering And Design, 177: 71-89.

[147] Fahri A., (2013). "Assessment Of The Relap5/Mod3.3 Code For Condensation İn The Presence Of Air Using Experimental Data And Theoretical Model", Annals Of Nuclear Energy, 60: 329–340.

[148] Yan, W.M., (1993). "Mixed Convection Heat Transfer İn A Vertical Channel With Film Evaporation", Can. J. Chem. Eng., 71:54-62.

[149] Volchkov, E.P. Ve Terekhov, V., (2004). "A Numerical Study Of Boundary-Layer Heat And Mass Transfer İn A Forced Flow Of Humid Air With Surface Steam Condensation", Int. J. Heat Mass Transfer, 47: 6-7.

[150] Rose, J.W., (1998). "Condensation Heat Transfer Fundamentals", Chem. Eng. Res. Des., 76(2): 143 - 152.

[151] Sparrow, E.M. Ve Gregg, J.L., (1959). "A Boundary-Layer Treatment Of Laminar Film Condensation", J. Heat Transfer, 83: 13-27.

[152] Sparrow, E.W., Minkowycz, W.J. Ve Saddy, M., (1967). "Forced Convection Condensation İn The Presence Of Non-Conden-Sibles And İnterfacial Resistance", Int. J. Heat Mass Transfer, 10: 1829-1845.

[153] Olander, M., (2011). "Cfd Simulation Of The Volvo Cars Slotted Walls Wind Tunnel", Master Thesis Performed At Volvo Cars, Chalmers University Of Technology, Sweden.

[154] Churchill, S.W. Ve Chu, H.H.S., (1975). "Correlating Equations For Laminar And Turbulent Free Convection From A Vertical Plate", International Journal Of Heat Mass Transfer, 18: 1323-1329.

[155] Wilcox, W.R., (1961). “Simultaneous Heat And Mass Transfer İn Free Convection”, Chemical Engineering Science, 13: 113-119.

[156] Gebhart, B. Ve Pera, L., (1970). “Mixed Convection From Long Horizontal Cylinders”, Journal Of Fluid Mechanics, 45: 49-64.

[157] De-Leeuw-Den-Bouter, J.A., De-Munnik, B. Ve Heerties, P.M., (1968). “Simultaneous Heat And Mass Transfer İn Laminar Free Convection From A Vertical Plate”, Chemical Engineering Science, 23: 1185-1190.

[158] Comini, G. Ve Savino S., (2007). “Latent And Sensible Heat Transfer İn Air Cooling Application”, International Journal Of Numerical Methods For Heat And Fluid Flow, 6: 608-627.

[159] Mcquistons, F.C. (1975). “Fin Efficiency With Combined Heat And Mass Transfer”, Ashrae Transactions, 81: 350-355.

[160] Bell, B., (2003). “Condensation Udf: Theory And Usage”, Fluent Inc.

[161] Bird, R.B., Stewart, W.E. Ve Lightfoot, E.N., (1960). “Transport Phenomena”, John Wiley And Sons, New York.

[162] Maria P.P., (2004). “Condensation Of Water Vapor And Acid Mixtures From Exhaust Gases”, Phd Thesis, Germany.

[163] Ansys Fluent User's Guide. Release 15.0, 2013 November.

[164] Dın 4102 - Part 1, B2, (1998). Reaction To Fire Deneys - Ignitability Of Building Products Subjected To Direct İmpingement Of Flame, Germany.

[165] Dın 4108 - Part3, (2003). Wärmeschutz Und Energie-Einsparung İn Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren Und Hinweise Für Planung Und Ausführung, Germany.

[166] Holman, J.P., (1994). Experimental Methods For Engineers. (6th Ed.). New York: Mcgraw-Hill Inc.

[167] Ashrae Hvac Systems And Equipment Handbook, (2000). Chapter 6: Panel Heating And Cooling, American Society Of Heating Refrigeration And Air-Conditioning Engineers, Usa.

[168] Watson, R.D., Chapman, K.S., (2002). Radiant Heating And Cooling Handbook, Mcgraw-Hill, New York.

[169] Fanger, P.O., (1970). Thermal Comfort, Analysis And Application İn Environment Engineering. Danish Technical Press, Copenhagen.

[170] Ashrae (2008). Ashrae Handbook-Hvac Systems And Equipment, American Society Of Heating Refrigerating And Air-Conditioning Engineers. Inc., Atlanta.

[171] En Iso 7730 (2005). Ergonomics Of Thermal Environment-Analytical Determination And İnterpretation Of Thermal Comfort Using Calculation Of The Pmv And Ppd İndices And Local Thermal Comfort Criteria. International Organization For Standardization, Geneva.

[172] Ashrae Standart 55 (2003). Thermal Environment Conditions For Human Occupancy, Ashrae.

[173] Olesen, B.W. Ve Parsons, K.C., (2002). ‘İntroduction To Thermal Comfort Standarts And To Proposed New Version Of En Iso 7730’, Energy And Buildings, 34, 537-548.

[174] Håkan Nilsson, Department Of Technology And Built Environment

[175] Ashrae, (2014). Standard Project Committee 160p, Design Criteria For Moisture Control İn Buildings, İs Working To Stan-Dardize The Calculation Of İndoor Humidity.

EK A

KALİBRASYON BULGULARI

Bu bölümde kalibrasyon çalışmaların bulguları ve kalibrasyonu yapılmayan ölçüm cihazların kalibrasyon sertifikaları verilmiştir.

A.1 Isıl Çift Kalibrasyon Bulguları

Yüzey sıcaklık, hava sıcaklık ve su sıcaklık sensörlerinin kalibrasyonları yapılmıştır.

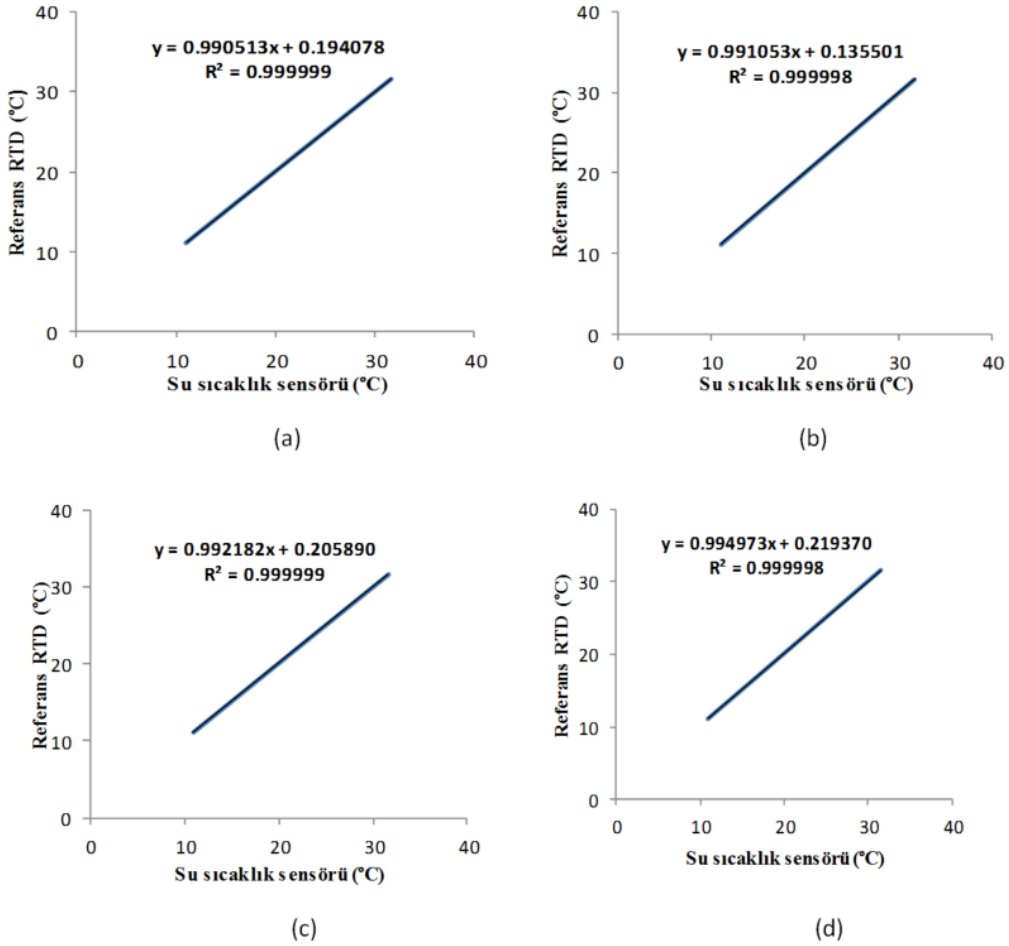
A.1.1 Su Sıcaklık Sensörlerinin Kalibrasyon Bulguları

Çizelge A.1 Su sıcaklık sensörlerinden alınan ölçümler

Tarih	Deney Başlangıç	Deney Bitiş	RTD sensör (°C)	Yoğuş. Gidiş (°C)	Yoğuş. Dönüş (°C)	Su Gidiş (°C)	Su Dönüş (°C)
05/09/2014	11:30:13	11:59:58	11.093	11.009	11.064	10.979	10.922
05/09/2014	13:00:43	13:30:28	21.448	21.447	21.490	21.398	21.350
05/09/2014	15:03:13	15:32:58	31.601	31.713	31.757	31.648	31.532

Çizelge A.2 Su sıcaklık sensörleri kalibrasyon değerleri

	RTD sensör (°C)	Yoğuş. Gidiş (°C)	Yoğuş. Dönüş (°C)	Su Gidiş (°C)	Su Dönüş (°C)
Farklar (^{o}C)	11.093	-0.084	-0.029	-0.114	-0.171
	21.448	-0.001	0.042	-0.05	-0.098
	31.601	0.112	0.156	0.047	-0.069
Yeni Değer (^{o}C)	11.093	11.099	11.101	11.099	11.086
	21.448	21.438	21.433	21.437	21.462
	31.601	31.606	31.608	31.606	31.593
Hata (^{o}C)	11.093	0.006	0.008	0.006	-0.007
	21.448	-0.010	-0.015	-0.011	0.014
	31.601	0.005	0.007	0.005	-0.008
Mutlak Hata (%)	11.093	0.051	0.017	-0.013	-0.113
	21.448	-0.048	-0.020	0.016	0.119
	31.601	0.016	0.007	-0.006	-0.043

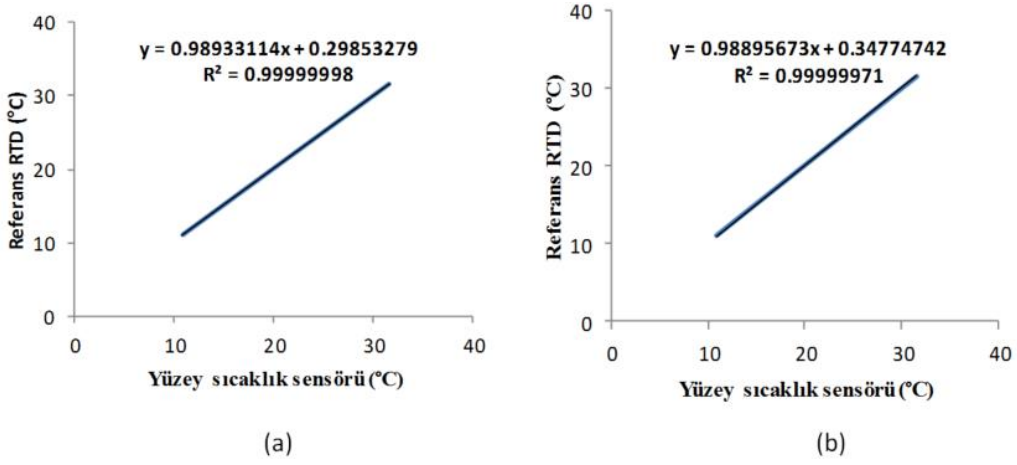


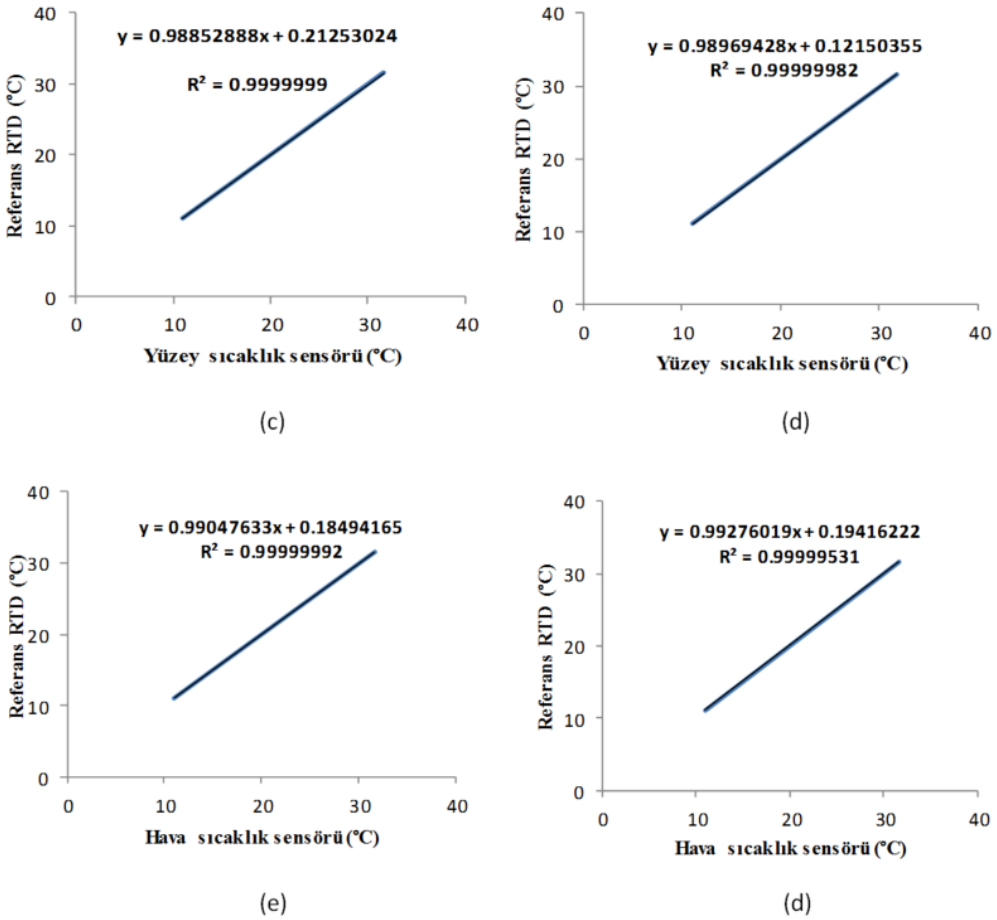
Şekil A.1 Su sıcaklık sensörleri kalibrasyon grafikleri a) Yoğuşturucu gidiş b) Yoğuşturucu dönüş c) Vana gidiş d) Vana dönüş

A.1.2 Yüzey Sıcaklık Sensörlerinin Kalibrasyonu

Çizelge A.3 Yüzey sıcaklık sensörleri kalibrasyon değerleri

	RTD sensör (°C)	Tavan Yüzey (°C)	Taban Yüzey (°C)	Kuzey Yüzey (°C)	Güney Yüzey (°C)	Doğu Yüzey (°C)	Batı Yüzey (°C)
Farklar (°C)	11.093	10.910	10.869	11.009	11.089	11.015	10.966
	21.448	21.379	21.329	21.478	21.543	21.464	21.434
	31.601	31.639	31.605	31.754	31.810	31.719	31.622
Yeni Değer (°C)	11.093	-0.183	-0.224	-0.084	-0.004	-0.078	-0.127
	21.448	-0.069	-0.119	0.030	0.095	0.016	-0.014
	31.601	0.038	0.004	0.153	0.209	0.118	0.021
Hata (°C)	11.093	11.093	11.097	11.095	11.096	11.095	11.081
	21.448	21.450	21.441	21.444	21.443	21.444	21.473
	31.601	31.600	31.604	31.603	31.603	31.602	31.588
Mutlak Hata (%)	11.093	0.000	0.004	0.002	0.003	0.002	0.002
	21.448	0.002	-0.007	-0.004	-0.005	-0.004	0.025
	31.601	-0.001	0.003	0.002	0.002	0.001	-0.013
Farklar (°C)	11.093	-0.004	0.032	0.021	0.026	0.019	0.021
	21.448	0.008	-0.031	-0.018	-0.025	-0.016	0.118
	31.601	-0.004	0.009	0.005	0.007	0.004	-0.042





Şekil A.2 Düşey hava sıcaklık sensörleri kalibrasyon grafikleri a) Tavan yüzey sıcaklığı b) Taban yüzey sıcaklığı c) Kuzey yüzey sıcaklığı d) Güney yüzey sıcaklığı e) Doğu yüzey sıcaklığı f) Batı yüzey sıcaklığı

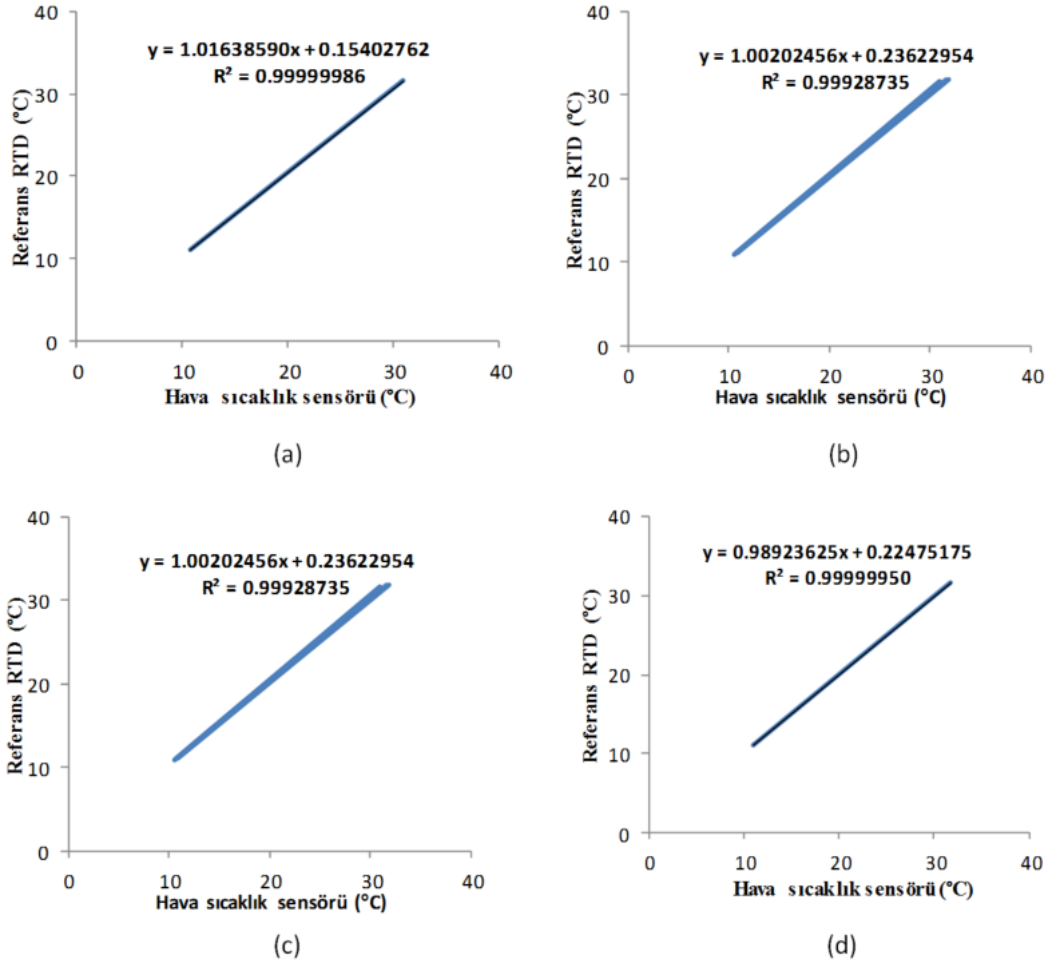
A.1.3 Yatay Yöndeki Hava Sıcaklık Sensörlerinin Kalibrasyonu-1

Çizelge A.4 Yatay yönde sıcaklık sensörlerinden alınan ölçümler

Tarih	Deney Başlangıç	Deney Bitiş	RTD sensör (°C)	Yatay 0 cm (°C)	Yatay 1 cm (°C)	Yatay 2 cm (°C)	Yatay 3 cm (°C)
05/09/2014	11:30:13	11:59:58	11.093	10.966	10.986	10.985	10.923
05/09/2014	13:00:43	13:30:28	21.448	21.423	21.456	21.457	21.363
05/09/2014	15:03:13	15:32:58	31.601	31.688	31.733	31.746	31.619

Çizelge A.5 Yatay yönde sıcaklık sensörleri kalibrasyon değerleri

	RTD sensör (°C)	Yatay 0 cm (°C)	Yatay 1 cm (°C)	Yatay 2 cm (°C)	Yatay 3 cm (°C)
Farklar (^{o}C)	11.093	-0.127	-0.107	-0.108	-0.170
	21.448	-0.025	0.008	0.009	-0.085
	31.601	0.087	0.132	0.145	0.018
Yeni Değer (^{o}C)	11.093	11.095	11.095	11.097	11.097
	21.448	21.444	21.444	21.441	21.441
	31.601	31.603	31.602	31.604	31.604
Hata (^{o}C)	11.093	0.0023	0.0021	0.0038	0.0036
	21.448	-0.0040	-0.0037	-0.0070	-0.0066
	31.601	0.0016	0.0014	0.0031	0.0029
Mutlak Hata (%)	11.093	0.021	-0.002	0.015	-0.002
	21.448	-0.019	0.002	-0.016	0.002
	31.601	0.005	-0.001	0.005	-0.001



Şekil A.3 Yatay yönde sıcaklık sensörleri kalibrasyon grafikleri a) Yatay 0 cm hava sıcaklığı b) Yatay 1 cm hava sıcaklığı c) Yatay 2 cm hava sıcaklığı d) Yatay 3 cm hava sıcaklığı

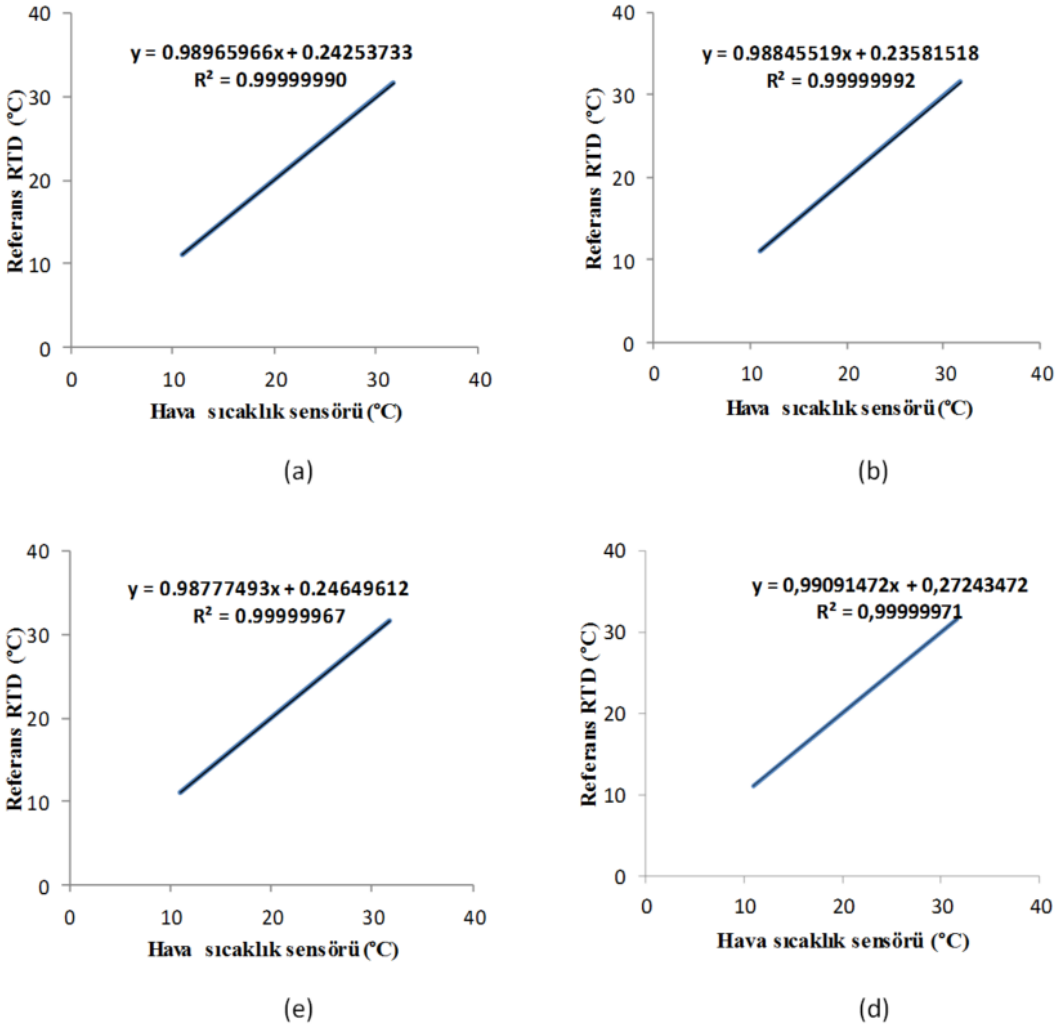
A.1.4 Yatay Yöndeki Hava Sıcaklık Sensörlerinin Kalibrasyonu-2

Çizelge A.6 Yatay yönde sıcaklık sensörlerinden alınan ölçümler-2

Tarih	Deney Başlangıç	Deney Bitiş	RTD sensör (°C)	Yatay 5 cm (°C)	Yatay 50 cm (°C)	Yatay 100 cm (°C)	Yatay 200 cm (°C)
05/09/2014	11:30:13	11:59:58	11.093	10.966	10.986	10.985	10.923
05/09/2014	13:00:43	13:30:28	21.448	21.423	21.456	21.457	21.363
05/09/2014	15:03:13	15:32:58	31.601	31.688	31.733	31.746	31.619

Çizelge A.7 Yatay yönde sıcaklık sensörleri kalibrasyon değerleri-2

	RTD sensör (°C)	Yatay 0 cm (°C)	Yatay 1 cm (°C)	Yatay 2 cm (°C)	Yatay 3 cm (°C)
Farklar (^{o}C)	11.093	-0.127	-0.107	-0.108	-0.170
	21.448	-0.025	0.008	0.009	-0.085
	31.601	0.087	0.132	0.145	0.018
Yeni Değer (^{o}C)	11.093	11.095	11.095	11.097	11.097
	21.448	21.444	21.444	21.441	21.441
	31.601	31.603	31.602	31.604	31.604
Hata (^{o}C)	11.093	0.0023	0.0021	0.0038	0.0036
	21.448	-0.0040	-0.0037	-0.0070	-0.0066
	31.601	0.0016	0.0014	0.0031	0.0029
Mutlak Hata (%)	11.093	0.021	-0.002	0.015	-0.002
	21.448	-0.019	0.002	-0.016	0.002
	31.601	0.005	-0.001	0.005	-0.001



Şekil A.4 Yatay yönde sıcaklık sensörleri kalibrasyon grafikleri a) Yatay 5 cm hava sıcaklığı b) Yatay 50 cm hava sıcaklığı c) Yatay 100 cm hava sıcaklığı d) Yatay 200 cm hava sıcaklığı

A.2 Deney Odası Çevre Hacimlerinde Kullanılan Sıcaklık Nem Sensörlerinin Kalibrasyon Sertifikası

SENSIRION
THE SENSOR COMPANY

Calibration Certification

Product: SHT1x / SHT2x / SHT7x Series

Description: Digital Humidity and Temperature Sensors

The above mentioned products are calibrated to meet the specifications according to the corresponding Sensirion data sheet. Each device is individually tested after its calibration.

Sensirion uses transfer standards for the calibration. These transfer standards are themselves subject to a scheduled calibration procedure. The calibration of the reference itself used for the calibration of the transfer standards is performed by an ISO/IEC 17025 accredited laboratory.

The accreditation body is full member of the International Laboratory Accreditation Cooperation (www.ilac.org). Calibration certificates issued by facilities accredited by a signatory to the ILAC Mutual Recognition Arrangement (MRA) are accepted by all signatories to the ILAC MRA.

This provides traceability of measurement to recognized national standards and to units of measurement realized at the "National Physical Laboratory" (NPL) or other recognized national standards laboratories like "Physikalisch-Technische Bundesanstalt" (PTB) or "National Institute of Standards and Technology" (NIST).

Staefa, August 2010

Dr. Felix Mayer
Co-CEO, Sensirion AG

Andreas Kaatz
Quality Manager, Sensirion AG

© Copyright Sensirion AG, Switzerland

A.3 Deney odası iç hacimde kullanılan nem sensörlerinin kalibrasyon dokümanları



UKS
3S029
09-14

UZMANLAR KALİBRASYON SERVİSİ
Nilüfer Ticaret Merkezi 2.Kısım 635.Sokak Otomasyon Plaza No:7
Nilüfer / BURSA

UKS
3S029
09-14

KALİBRASYON SERTİFİKASI
CALIBRATION CERTIFICATE

Cihazın Sahibi *Customer*	MİR ARAŞTIRMA VE GELİŞTİRME A.Ş. Çiftehavuzlar Mah. Eski Londra Asfaltı Cd. No:151 Esenler / İSTANBUL
İstek Numarası *Order No.*	14SZL1439
Makine/Cihaz *Instrument/Device*	SICAKLIK NEM TRANSMİTTERİ
İmalatçı *Manufacturer*	TEKON
Tip *Type*	HT15
Seri Numarası *Serial Number*	14376944
Kalibrasyon Tarihi *Date of calibration*	22.09.2014
Sertifikanın Sayfa Sayısı *Number of pages of Certificate*	2

Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) uygun birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takib eden sayfalarda verilmiştir.
The measurements, the uncertainties with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificete.

Mühür *Seal*	Tarih *Date*	Kalibrasyonu Yapan *Calibrated by*	Laboratuvar Müdürü *Head of the Calibration Laboratory*
KALİBRASYON UKS LABORATUVARI	22.09.2014	Ahmet Mustafa ŞAHİN	Kemal Ersin SALÇA

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificetes without signature and seal are not valid.

Tel.: (0.224) 441 55 77 (Pbx) Fax: (0.224) 441 72 52 Web: www.kalibrasyon.com.tr e-mail: uks@kalibrasyon.com.tr

FRM3-0-02 : Rev. 00

UKS

Uzmanlar Kalibrasyon Servisi

UKS
3S029
09-14

1. Cihaza Ait Bilgiler
Information About The Object

Cihazın Adı : SICAKLIK NEM TRANSMİTTERİ
Object

İmalatçısı : TEKON
Manufacturer

Seri No : 14376944
Serial Number

2. Kalibrasyon Metodu
Method

Cihaz ; Referans sıcaklık-nem ölçer ve referans tuz çözeltileri ile iklimlendirme kabininde şartlandırılarak karşılaştırma metodu ile kalibre edilmiştir.

3. Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihazlar
References used in the calibration

Adı	UKS Kod	Ölçme Kap.	İmalatçısı	Seri No	Sertifika No	İzlenebilirlik
Sıcaklık -Nem Ölçer	SC.R09.1	-20-70°C / 25-95%Rh	Testo	02338662	12S1296	TÜRKAK AB-0002-K
Ref. direnç Termometresi 2	SC.R01.1	-40 – +400 °C	KMP	SC.R01.1	2014.S.0009	TÜRKAK AB-0059-K
Nem Çözeltisi 1	SC.R10	32,8 %Rh	Driesen&Kern	SC.R10	UME G1NM-0106	TÜRKAK-AB-0034-K
Nem Çözeltisi 2	SC.R11	73,5 %Rh	Driesen&Kern	SC.R11	UMEG1NM-0080	TÜRKAK-AB-0034-K
Sıvılı Cam Termometre	SC.R19	0 / 100	Ludwig Schneider	3371/39-1032805	S9105	TÜRKAK AB-0018-K
Multimetre	SC.R06	-	Agilent	MY45001283	E9307	TÜRKAK AB-0018-K

4. Kalibrasyonun Yapıldığı Yer
Place of the calibration

UKS Lab.

5. Çevre Şartları
Environmental Conditions

Sıcaklık : 24,2 °C
Ambient Temperature

6. Ölçüm Sonuçları
Measurement Results

6.1. Sıcaklık

Ref. Sıcaklık °C	Test Cihazı mA	Hesaplanan Sıcaklık °C	Sapma °C	Ölçüm Belirsizliği ± °C
-1,952	6,9023	-1,86	0,09	0,5
10,266	8,8411	10,26	-0,01	
23,545	10,9603	23,50	-0,04	
29,026	11,8421	29,01	-0,01	
39,053	13,4574	39,11	0,06	

6.2. Nem

Ref. Nem %Rh	Test Cihazı mA	Hesaplanan Nem %Rh	Sapma %Rh	Ölçüm Belirsizliği ± %Rh
32,84	9,7200	35,75	2,91	2
75,32	16,0736	75,46	0,14	

7. Ölçüm Belirsizliği
Measurement Uncertainty

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, normal dağılım için yaklaşık %95 kapsama olasılığına tekabül eden k = 2 kapsama faktörüyle çarpılmış standard ölçme belirsizliğidir.
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2 which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

UKS
3S030
09-14

UZMANLAR KALİBRASYON SERVİSİ

Nilüfer Ticaret Merkezi 2.Kısım 635.Sokak Otomasyon Plaza No:7
Nilüfer / BURSA

UKS
3S030
09-14

KALİBRASYON SERTİFİKASI
CALIBRATION CERTIFICATE

Cihazın Sahibi *Customer*	MİR ARAŞTIRMA VE GELİŞTİRME A.Ş. Çiftehavuzlar Mah. Eski Londra Asfaltı Cd. No:151 Esenler / İSTANBUL
İstek Numarası *Order No.*	14SZL1439
Makine/Cihaz *Instrument/Device*	SICAKLIK NEM TRANSMİTTERİ
İmalatçı *Manufacturer*	TEKON
Tip *Type*	HT15
Seri Numarası *Serial Number*	14376945
Kalibrasyon Tarihi *Date of calibration*	22.09.2014
Sertifikanın Sayfa Sayısı *Number of pages of Certificate*	2

Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) uygun birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takib eden sayfalarda verilmiştir.
The measurements, the uncertainties with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificete.

Mühür *Seal*	**Tarih** *Date*	**Kalibrasyonu Yapan** *Calibrated by*	**Laboratuvar Müdürü** *Head of the Calibration Laboratory*
KALİBRASYON UKS LABORATUVARI	22.09.2014	Ahmet Mustafa ŞAHİN	Kemal Ersin SALÇA

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificetes without signature and seal are not valid.

Tel.: (0.224) 441 55 77 (Pbx) Fax: (0.224) 441 72 52 Web: www.kalibrasyon.com.tr e-mail: uks@kalibrasyon.com.tr

UKS

Uzmanlar Kalibrasyon Servisi

UKS
3S030
09-14

1. Cihaza Ait Bilgiler
Information About The Object

Cihazın Adı : SICAKLIK NEM TRANSMİTTERİ
Object

İmalatçısı : TEKON
Manufacturer

Seri No : 14376945
Serial Number

2. Kalibrasyon Metodu
Method

Cihaz ; Referans sıcaklık-nem ölçer ve referans tuz çözeltileri ile iklimlendirme kabininde şartlandırılarak karşılaştırma metodu ile kalibre edilmiştir.

3. Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihazlar
References used in the calibration

Adı	UKS Kod	Ölçme Kap.	İmalatçısı	Seri No	Sertifika No	İzlenebilirlik
Sıcaklık -Nem Ölçer	SC.R09.1	20-70°C / 25-95%Rh	Testo	02338662	12S1296	TÜRKAK AB-0002-K
Ref. direnç Termometresi 2	SC.R01.1	-40 ~ +400 °C	KMP	SC.R01.1	2014.S.0009	TÜRKAK AB-0059-K
Nem Çözeltisi 1	SC.R10	32,8 %Rh	Driesen&Kern	SC.R10	UME G1NM-0106	TÜRKAK-AB-0034-K
Nem Çözeltisi 2	SC.R11	73,5 %Rh	Driesen&Kern	SC.R11	UMEG1NM-0080	TÜRKAK-AB-0034-K
Sıvılı Cam Termometre	SC.R19	0 / 100	Ludwig Schneider	3371/39-1032805	S9105	TÜRKAK AB-0018-K
Multimetre	SC.R06	-	Agilent	MY45001283	E9307	TÜRKAK AB-0018-K

4. Kalibrasyonun Yapıldığı Yer
Place of the calibration

UKS Lab.

5. Çevre Şartları
Environmental Conditions

Sıcaklık : 24,2 °C
Ambient Temperature

6. Ölçüm Sonuçları
Measurement Results

6.1. Sıcaklık

Ref. Sıcaklık °C	Test Cihazı mA	Hesaplanan Sıcaklık °C	Sapma °C	Ölçüm Belirsizliği ± °C
-1,990	6,8977	-1,89	0,10	0,5
10,430	8,8637	10,40	-0,03	
23,537	10,9637	23,52	-0,01	
29,074	11,8485	29,05	-0,02	
39,025	13,4499	39,06	0,04	

6.2. Nem

Ref. Nem %Rh	Test Cihazı mA	Hesaplanan Nem %Rh	Sapma %Rh	Ölçüm Belirsizliği ± %Rh
32,83	9,7104	35,69	2,86	2
75,35	15,9424	74,64	-0,71	

7. Ölçüm Belirsizliği
Measurement Uncertainty

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, normal dağılım için yaklaşık %95 kapsama olasılığına tekabül eden k = 2 kapsama faktörüyle çarpılmış standard ölçme belirsizliğidir.
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2 which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%

UKS
3S029
09-14

UZMANLAR KALİBRASYON SERVİSİ

Nilüfer Ticaret Merkezi 2.Kısım 635.Sokak Otomasyon Plaza No:7
Nilüfer / BURSA

UKS
3S029
09-14

KALİBRASYON SERTİFİKASI
CALIBRATION CERTIFICATE

Cihazın Sahibi *Customer*	MİR ARAŞTIRMA VE GELİŞTİRME A.Ş. Çiftehavuzlar Mah. Eski Londra Asfaltı Cd. No:151 Esenler / ISTANBUL
İstek Numarası *Order No.*	14SZL1439
Makine/Cihaz *Instrument/Device*	SICAKLIK NEM TRANSMİTTERİ
İmalatçı *Manufacturer*	TEKON
Tip *Type*	HT15
Seri Numarası *Serial Number*	14376944
Kalibrasyon Tarihi *Date of calibration*	22.09.2014
Sertifikanın Sayfa Sayısı *Number of pages of Certificate*	2

Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) uygun birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takib eden sayfalarda verilmiştir.
The measurements, the uncertainties with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificate.

Mühür *Seal*	**Tarih** *Date*	**Kalibrasyonu Yapan** *Calibrated by*	**Laboratuvar Müdürü** *Head of the Calibration Laboratory*
KALİBRASYON UKS LABORATUVARI	22.09.2014	Ahmet Mustafa ŞAHİN	Kemal Ersın SALÇA

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificetes without signature and seal are not valid.

UKS

Uzmanlar Kalibrasyon Servisi

UKS
3S029
09-14

1. Cihaza Ait Bilgiler
Information About The Object

Cihazın Adı : SICAKLIK NEM TRANSMİTTERİ
Object

İmalatçısı : TEKON
Manufacturer

Seri No : 14376944
Serial Number

2. Kalibrasyon Metodu
Method

Cihaz ; Referans sıcaklık-nem ölçer ve referans tuz çözeltileri ile iklimlendirme kabininde şartlandırılarak karşılaştırma metodu ile kalibre edilmiştir.

3. Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihazlar
References used in the calibration

Adı	UKS Kod	Ölçme Kap.	İmalatçısı	Seri No	Sertifika No	İzlenebilirlik
Sıcaklık -Nem Ölçer	SC.R09.1	-20-70°C / 25-95%Rh	Testo	02338662	12S1296	TÜRKAK AB-0002-K
Ref. direnç Termometresi 2	SC.R01.1	-40 ~ +400 °C	KMP	SC.R01.1	2014.S.0009	TÜRKAK AB-0059-K
Nem Çözeltisi 1	SC.R10	32,8 %Rh	Driesen&Kern	SC.R10	UME G1NM-0106	TÜRKAK-AB-0034-K
Nem Çözeltisi 2	SC.R11	73,5 %Rh	Driesen&Kern	SC.R11	UMEG1NM-0080	TÜRKAK-AB-0034-K
Sıvılı Cam Termometre	SC.R19	0 / 100	Ludwig Schneider	3371/39-1032805	S9105	TÜRKAK AB-0018-K
Multimetre	SC.R06	-	Agilent	MY45001283	E9307	TÜRKAK AB-0018-K

4. Kalibrasyonun Yapıldığı Yer
Place of the calibration

UKS Lab.

5. Çevre Şartları
Environmental Conditions

Sıcaklık : 24,2 °C
Ambient Temperature

6. Ölçüm Sonuçları
Measurement Results

6.1. Sıcaklık

Ref. Sıcaklık °C	Test Cihazı mA	Hesaplanan Sıcaklık °C	Sapma °C	Ölçüm Belirsizliği ± °C
-1,952	6,9023	-1,86	0,09	0,5
10,266	8,8411	10,26	-0,01	
23,545	10,9603	23,50	-0,04	
29,026	11,8421	29,01	-0,01	
39,053	13,4574	39,11	0,06	

6.2. Nem

Ref. Nem %Rh	Test Cihazı mA	Hesaplanan Nem %Rh	Sapma %Rh	Ölçüm Belirsizliği ± %Rh
32,84	9,7200	35,75	2,91	2
75,32	16,0736	75,46	0,14	

7. Ölçüm Belirsizliği
Measurement Uncertainty

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, normal dağılım için yaklaşık %95 kapsama olasılığına tekabül eden k = 2 kapsama faktörüyle çarpılmış standard ölçme belirsizliğidir.

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2 which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

A.4 Işınım Termometresi Kalibrasyon Dokümanı

TÜRKAK
TÜRK AKREDİTASYON KURUMU
TURKISH ACCREDITATION AGENCY
tarafından akredite edilmiş

TKM
TEKNOLOJİK KALİBRASYON MERKEZİ
Teknolojik Kalibrasyon ve Danışmanlık Hizmetleri Sanayi ve Dış Ticaret Ltd. Şti.
Osmaniye Mah. Ümraniye Sok. No:11/B 34144 Bakırköy - İSTANBUL

AB-0058-K
4814-14
14.10.2014

Kalibrasyon Sertifikası
Calibration Certificate

Cihazın Sahibi / Adresi *Customer / Adress*	:	Mir Araştırma ve Geliştirme Anonim Şirketi Atatürk Mah. İnönü Cad. No:6 Kıraç Esenyurt İSTANBUL
Talep Numarası *Order No*	:	T 15691 / 48
Makine / Cihaz *Instrument / Device*	:	Radyasyon Termometresi
İmalatçı *Manuf.*	:	Optris
Model *Model*	:	-
Seri No *Serial No*	:	1086006
TKM Tanım Numarası *TKM Definition Number*	:	3252
Müşteri Tanım No *Cust. Identification No*	:	-
Kalibrasyon Tarihi *Date of Calibration*	:	14.10.2014
Sertifikanın Sayfa Sayısı *Number of pages of the certificate*	:	3

Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standardlarına izlenebilirliği belgeler.
This calibration certificate documents the traceabilty to national standards, which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI).

Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınması konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile karşılıklı tanınma antlaşmasını imzalamıştır.
The Turkish Accreditation Agency (TURKAK) is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for the Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation (ILAC) for the Mutual recognation of calibration certificates.

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takib eden sayfalarda verilmiştir.
The measurements, the uncertainties with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificate.

Mühür *Seal*	Tarih *Date*	Kalibrasyonu Yapan *Calibrated by*	Laboratuar Müdürü *Head of the Calibration Laboratory*
	14.10.2014	Bülent YILMAZ	Fatih ARIK

Tel: +90 212 660 87 81 Fax: +90 212 660 87 51 web: www.tkm-kalibrasyon.com e-mail: info@teknokalibrasyon.com

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz.İmzasız ve mührsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory.
Calibration certificates without signature and seal are not valid.

SF.50/11.11.2013-04

Sayfa : 2/3
Page

TKM
TEKNOLOJİK KALİBRASYON MERKEZİ
Teknolojik Kalibrasyon ve Danışmanlık Hizmetleri Sanayi ve Dış Ticaret Ltd. Şti.
Osmaniye Mah. Ümraniye Sok. No:11/B 34144 Bakırköy - İSTANBUL

AB-0058-K
4814-14
14.10.2014

Makine / Cihaz *Instrument / Device* : Radyasyon Termometresi

Bulunduğu Yer *Place* : -

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi *Date of receipt of Device* : 13.10.2014

Prosedür *Procedures* : Kalibrasyon referans sıcaklık termometresi ile karşılaştırılarak yapılmıştır. *Compared with the reference thermometer is calibrated.*

Çevre Şartları *Environmental Conditions* :

	Başlangıç/*Start*	Bitiş/ *Finish*	Ortalama / *Avg.*	Belirsizlik/*uncer* ±
Sıcaklık (°C)/*Temp*	20,8	20,9	20,9	0,66
Nem (% rh)/*Hum.*	63,0	64,0	63,5	1,9

Ölçüm Belirsizliği *Measurement Uncertainty* : Belirsizlik sonuçları diğer sayfalarda verilmiştir. *Uncertainty in the results are given on other pages.*

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart belirsizliğin, k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

Kalibrasyonda Kullanılan Cihazlar:
Equipments used in calibration

Cihaz / *Device*	İmalatçısı / *Man.*	Seri No./ *Sr. N.*	Sertifika No./ *Cert. N.*	İzlenebilirlik/*Traceability*
Data Logger (Sıcaklık nem ölçer S)	Cem	10069544	3227-14	AB-0058-K
Black Body (50 / 500°C)	Ata Black Zone	95	UME G1RS-0032	AB-0034-K
Black Body (-30 / 50°C)	Ata LQB / Julabo	13101 / 10191511	UME G1RS-0031	AB-0034-K
Referans Sıcaklık İndikatörü	Ametek	552645-0016	13E1457	AB-0002-K
Referans Sıcaklık Probu (KMP)	KMP	2130782	S229	AB-0018-K

Cihaza ait bilgiler *The information for device*

İmalatçı *Manufacturer* : Optris
Sensör İmalatçı *Sensor Manufacturer* : -
Model *Model* : -
Seri No *Serial Number* : 1086006
Sensör Seri No *Sensor Serial Number* : -

Tip *Type* : Digital
Ölçüm Aralığı *Measurement range* : - / - °C
Çözünürlük *Resolution* : 0,1 °C

Görsel Kontroller *Visual checks*

Skala / Dijital gösterge *Scale / digital indicator* : Dijital / Digital
Gösterge *Indicator* : Uygun / Acceptable
Ölçüm Tetiği *Measurement Trigger* : Uygun / Acceptable
Açıklamalar *Description* :

Kalibrasyon Metodu *Calibration method* : KT.27 Radyasyon Termometre Kalibrasyon Talimatına uygun olarak yapılmıştır. *Radiation Thermometer Calibration done in accordance with Directive KT.27.*

Uygunluk Beyanı: *Conformity* : Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi müşteriye bırakılmıştır. *Evaluation of measurement results is left to the customer.*

Tel: +90 212 660 87 81 Fax: +90 212 660 87 51 web: www.tkm-kalibrasyon.com e-mail: info@teknokalibrasyon.com

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz.İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory.
Calibration certificates without signature and seal are not valid.

TKM
TEKNOLOJİK KALİBRASYON MERKEZİ
Teknolojik Kalibrasyon ve Danışmanlık Hizmetleri
Sanayi ve Dış Ticaret Ltd. Şti.
Osmaniye Mah. Ümraniye Sok. No:11/B 34144 Bakırköy - İSTANBUL

AB-0058-K
4814-14
14.10.2014

Ölçüm Sonuçları / *Measurement Result* : (°C)

Ölçümler / *Measurements*

Referans Değer *Ref. Value* °C	Ölçülen Ortalama Değer *Measured Average Value* °C	Sapma *Deviation* °C	Belirsizlik *Uncertainty* ±°C
14,9	16,8	1,9	1,90
24,9	25,8	0,9	3,63

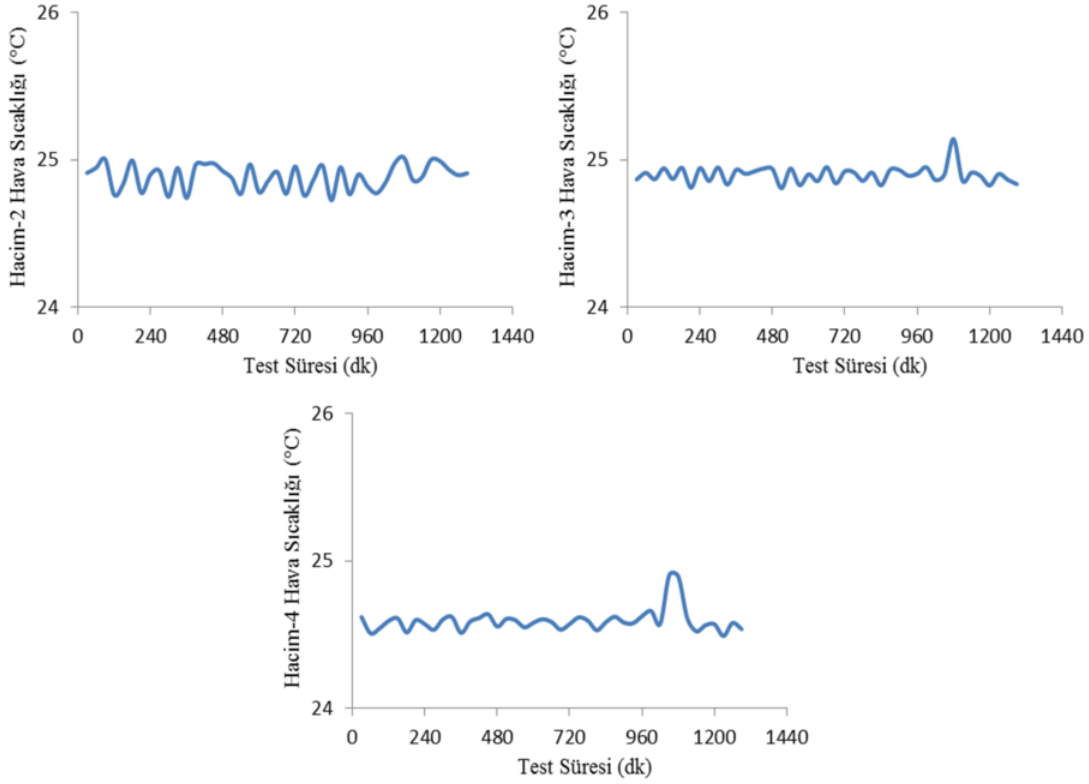
Ölçüm Mesafesi *Distance Measurement*	Emisivite Değeri (ε) *Emissivity Value*
100 mm	1,00

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz.
İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

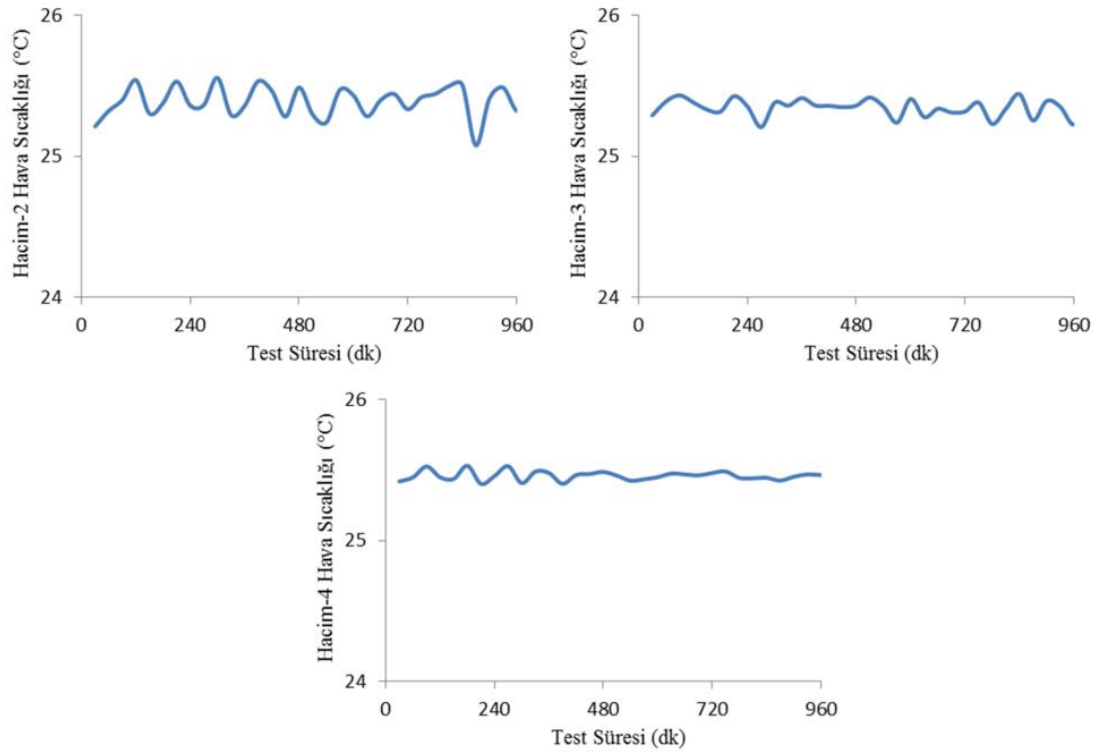
EK B

ÇEVRE HACİMLER KARARLILIK GRAFİKERİ

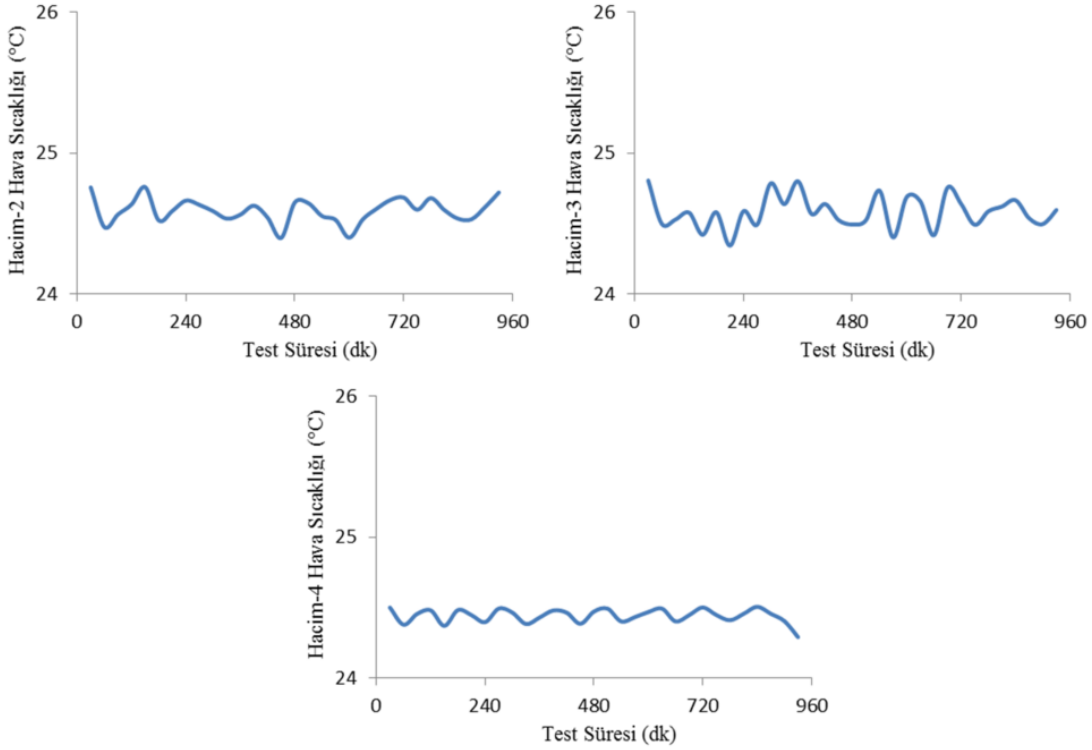
Bu bölümde deney odasındaki çevre hacimlerinin zamana bağlı sıcaklık değişimlerinin ölçüm bulguları verilmiştir.



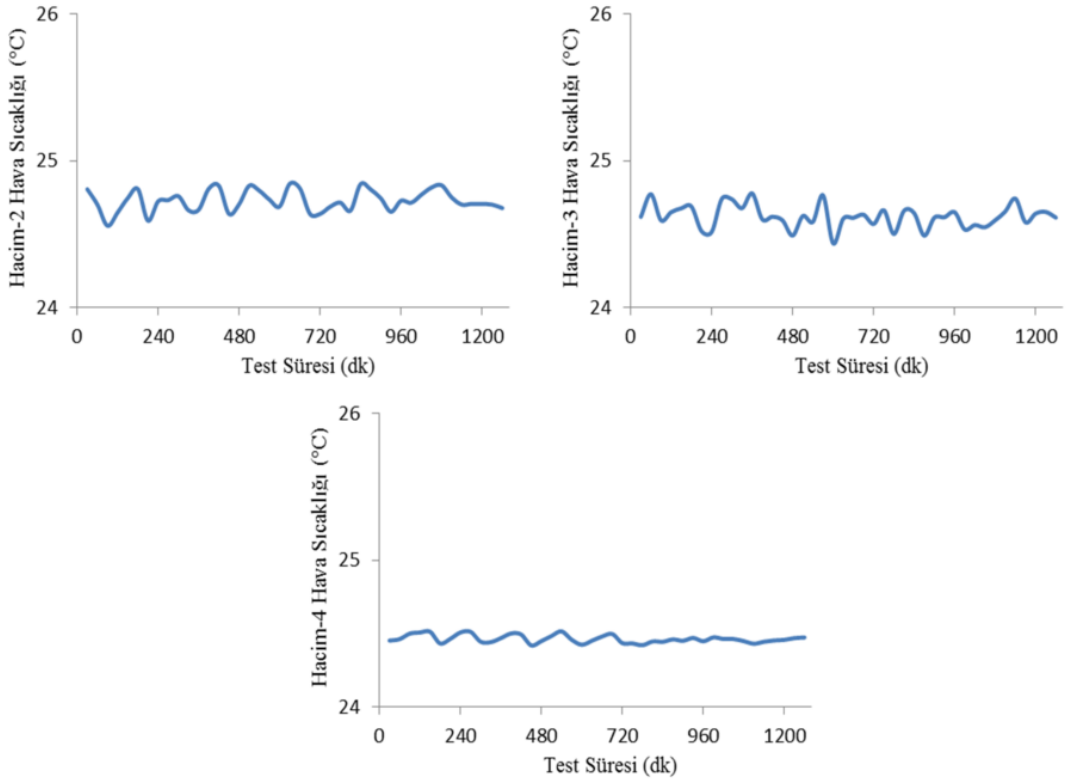
Şekil B.1 Deney-1 kararlılık grafikleri



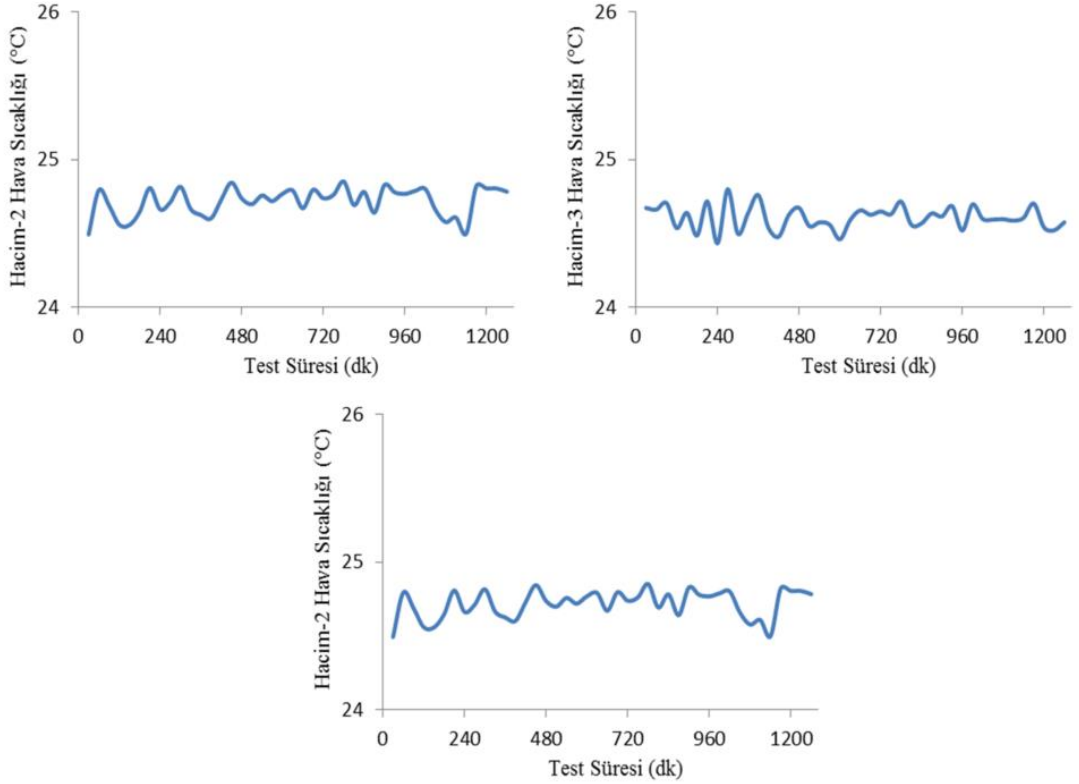
Şekil B.2 Deney-2 kararlılık grafikleri



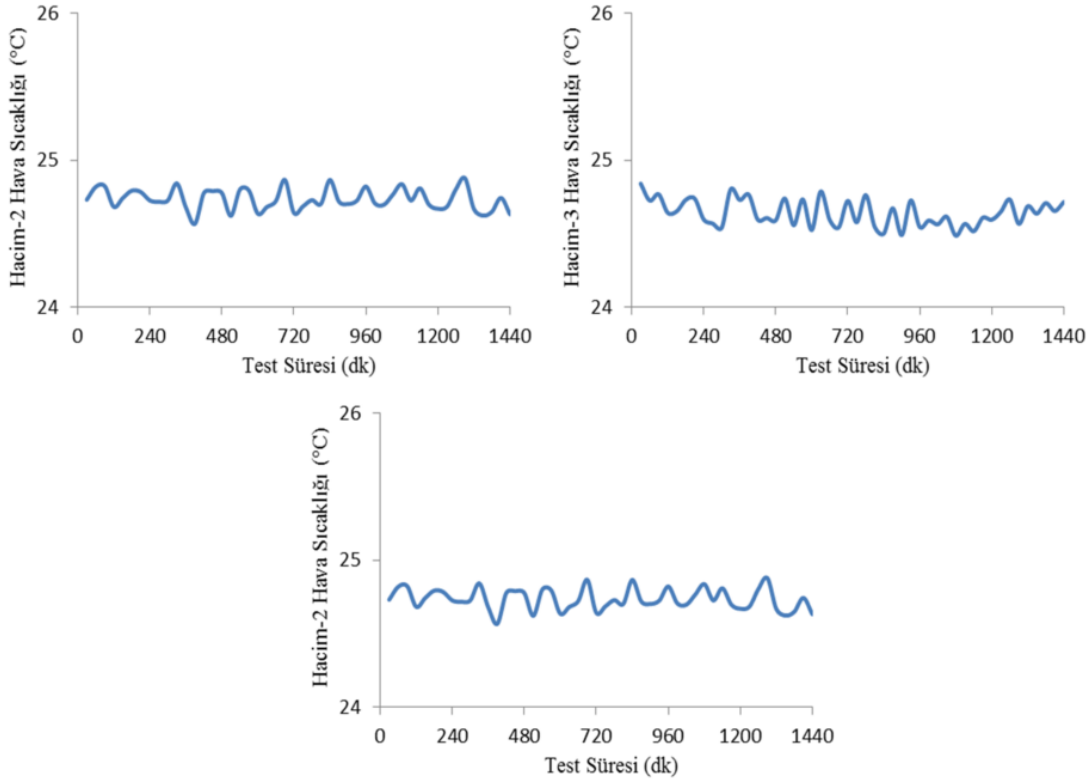
Şekil B.3 Deney-3 kararlılık grafikleri



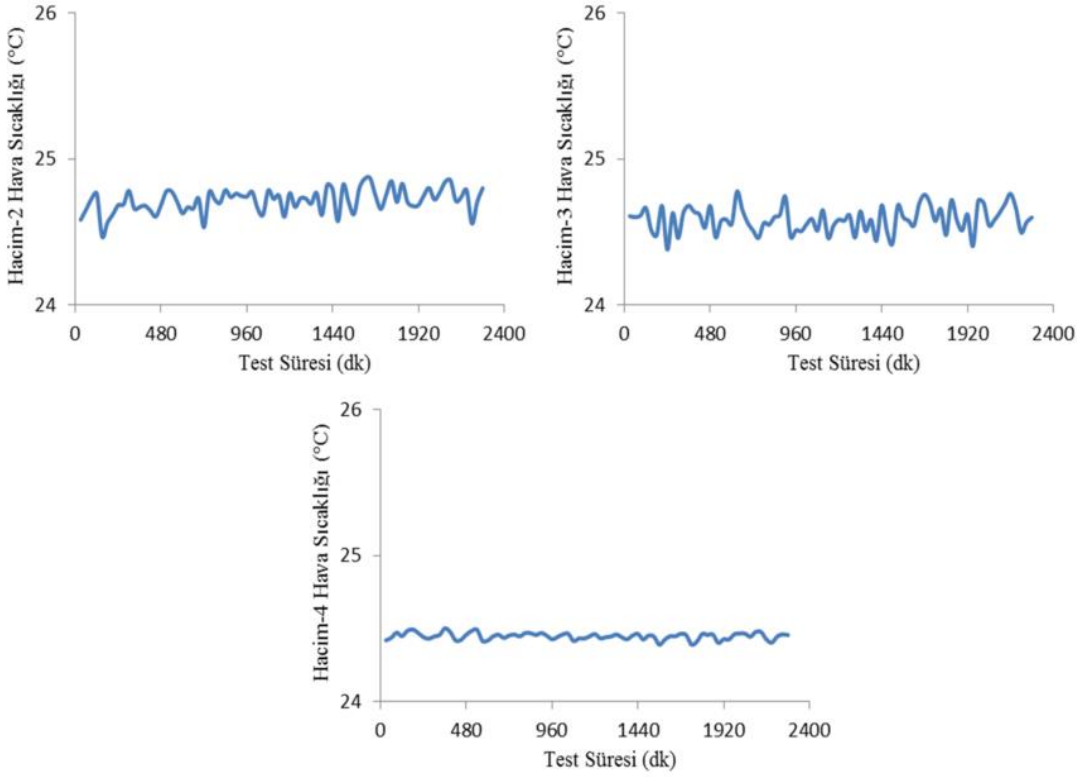
Şekil B.4 Deney-4 kararlılık grafikleri



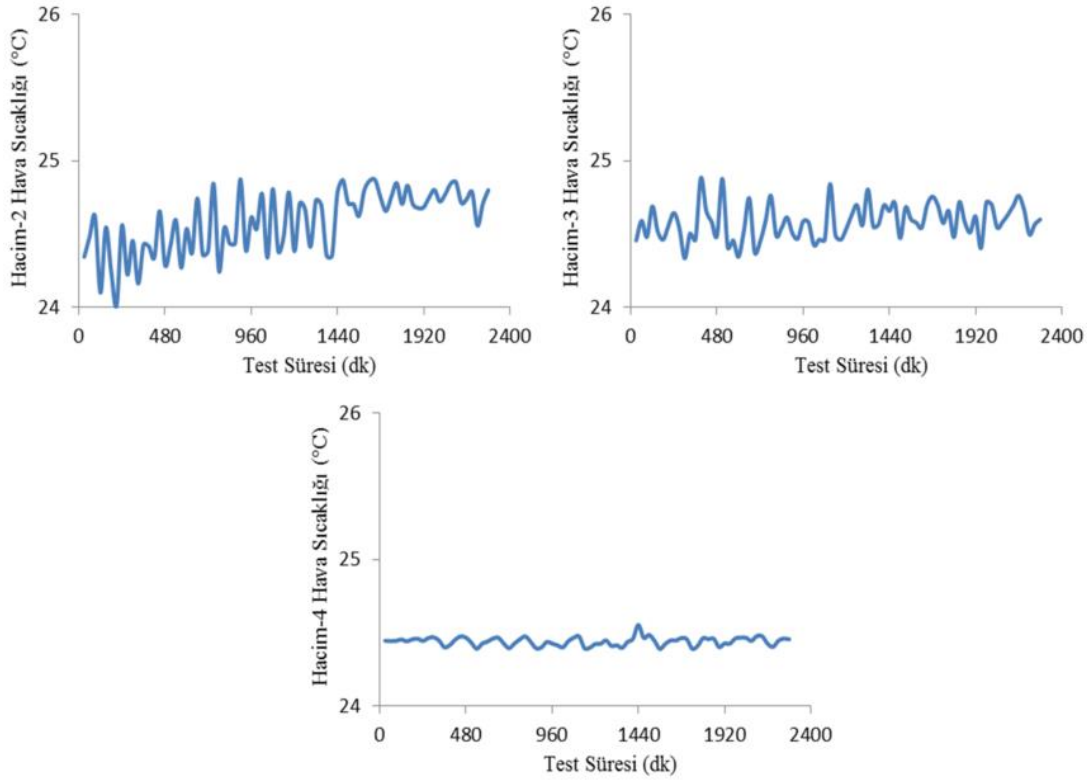
Şekil B.5 Deney-5 kararlılık grafikleri



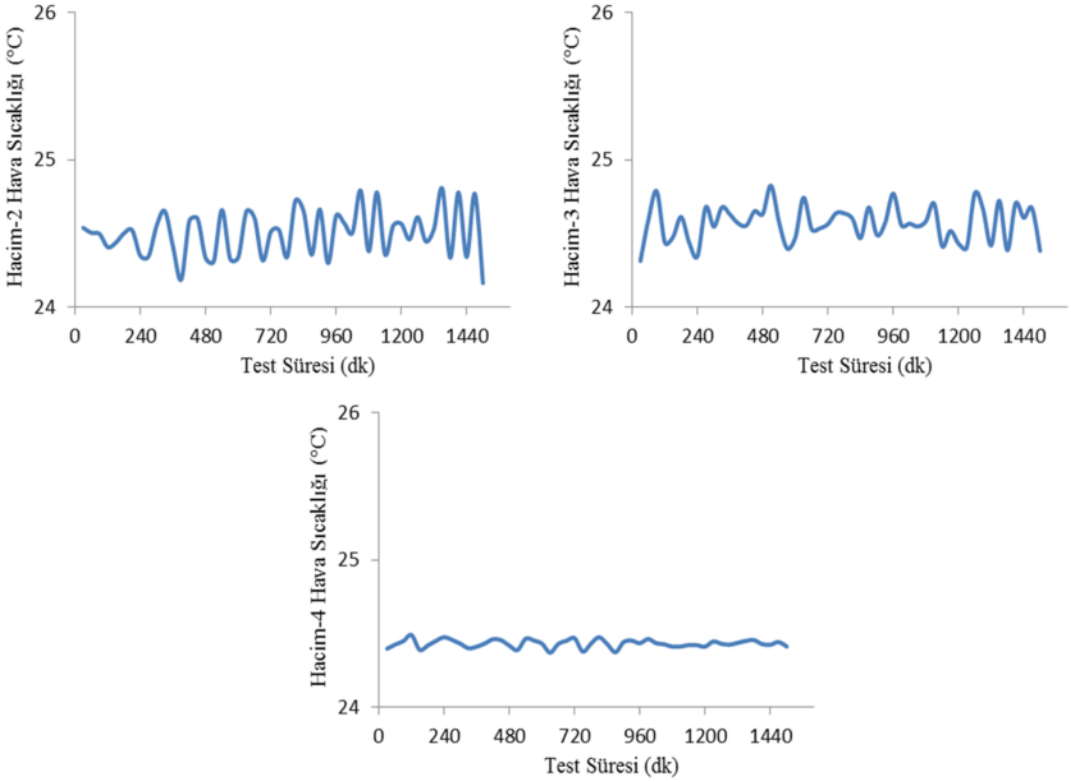
Şekil B.6 Deney-6 kararlılık grafikleri



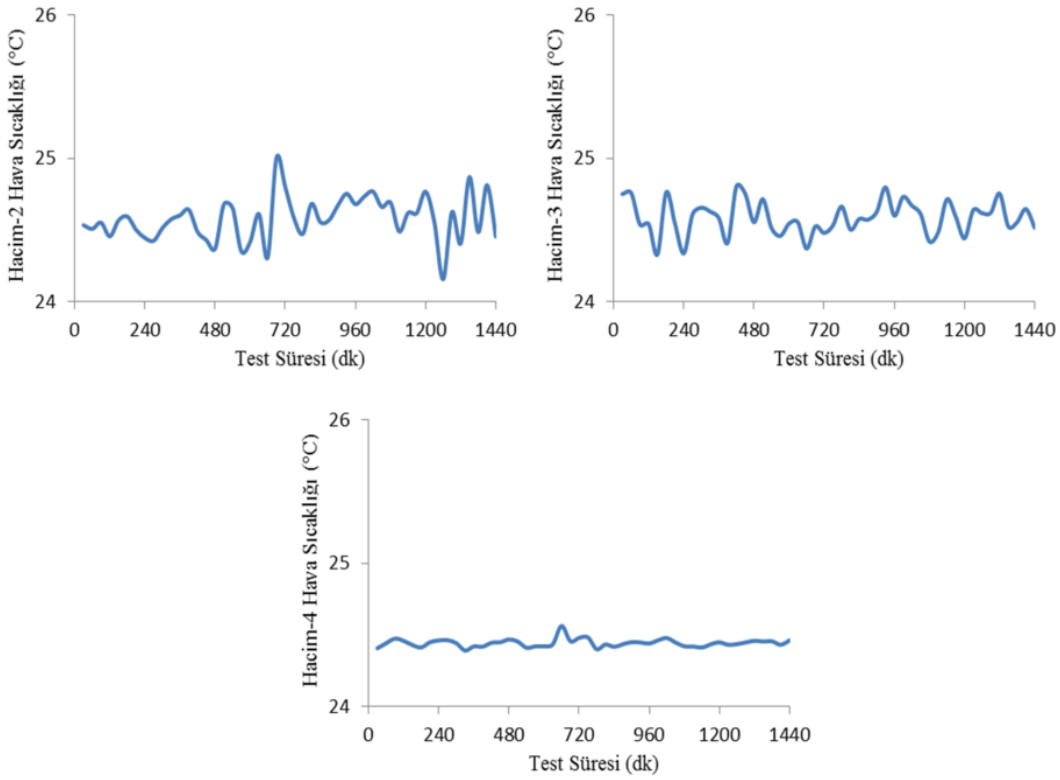
Şekil B.7 Deney-7 kararlılık grafikleri



Şekil B.8 Deney-8 kararlılık grafikleri



Şekil B.9 Deney-9 kararlılık grafikleri



Şekil B.10 Deney-10 kararlılık grafikleri

EK C

ISI TRANSFERİ YAPILAN ÖLÇÜMLER VE HESAPLAMA BULGULARI

Bu bölümde farklı yüzey sıcaklığı parametrelerinin çalışıldığı deneysel çalışmalarda yapılan ölçümler ve ısı transferi hesap bulguları verilmiştir.

Çizelge C. 1 Deney-1 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1

Zaman (dk)	$\dot{m}_{su}$ [kg/s]	$T_{gidiş}$ (°C)	$T_{dönüş}$ (°C)	ΔT_{su} (°C)	$\dot{q}_{top}$ (W/m^2)	$T_{dış}$ (°C)	$\dot{q}_{kayıp}$ (W/m^2)	Kayıp (%)	$\dot{q}_{net}$ (W/m^2)	Yoğ. Mik. (g)	Yoğ. Akısı (kg/s)	h_{fg} [kJ/kg]
30	0.030	8.62	9.15	0.64	162.79	25.33	6.81	4.1%	155.98	18.15	1.01E-05	2473.2
60	0.030	8.65	9.12	0.57	144.91	25.08	6.70	4.6%	138.20	35.18	9.46E-06	2473.4
90	0.030	8.52	8.97	0.55	140.44	24.84	6.66	4.7%	133.78	52.55	9.65E-06	2473.9
120	0.030	8.45	8.92	0.58	147.02	24.61	6.59	4.4%	140.43	68.52	8.87E-06	2474.1
150	0.030	8.48	8.94	0.55	141.25	24.39	6.49	4.6%	134.75	80.56	6.69E-06	2474.3
180	0.030	8.51	8.95	0.53	136.22	24.19	6.40	4.7%	129.82	92.68	6.73E-06	2474.4
210	0.030	8.53	8.95	0.51	132.57	24.01	6.32	4.7%	126.24	105.87	7.33E-06	2474.6
240	0.030	8.57	8.97	0.48	124.56	23.85	6.24	5.0%	118.32	116.50	5.91E-06	2474.7
270	0.030	8.56	8.92	0.43	112.34	23.70	6.19	5.5%	106.15	125.31	4.89E-06	2474.9
300	0.030	8.37	8.76	0.47	120.54	23.55	6.20	5.1%	114.33	128.47	1.75E-06	2475.3
330	0.030	8.38	8.78	0.48	124.31	23.42	6.14	4.9%	118.16	137.55	5.05E-06	2475.4
360	0.030	8.42	8.81	0.47	119.99	23.30	6.08	5.0%	113.91	143.58	3.35E-06	2475.4
390	0.030	8.47	8.85	0.46	117.28	23.19	6.01	5.1%	111.27	150.80	4.01E-06	2475.4
420	0.030	8.54	8.89	0.42	109.09	23.09	5.95	5.4%	103.13	161.16	5.76E-06	2475.5
450	0.030	8.50	8.82	0.43	109.15	23.00	5.94	5.4%	103.21	169.79	4.79E-06	2475.8
480	0.030	8.29	8.67	0.46	118.25	22.92	5.98	5.0%	112.28	180.01	5.68E-06	2476.1
510	0.030	8.37	8.73	0.44	112.37	22.84	5.92	5.2%	106.45	188.21	4.56E-06	2476.1
570	0.030	8.50	8.83	0.40	101.56	22.71	5.82	5.7%	95.75	203.38	3.62E-06	2476.1
600	0.030	8.52	8.82	0.36	91.09	22.65	5.79	6.3%	85.31	207.74	2.42E-06	2476.2
630	0.030	8.28	8.61	0.40	102.28	22.60	5.86	5.7%	96.42	213.52	3.21E-06	2476.6
660	0.030	8.29	8.64	0.42	108.08	22.55	5.83	5.4%	102.25	215.14	9.00E-07	2476.6
690	0.030	8.35	8.70	0.42	106.86	22.54	5.80	5.4%	101.05	219.35	2.34E-06	2476.6
720	0.030	8.45	8.77	0.39	97.77	22.54	5.77	5.9%	92.00	225.68	3.52E-06	2476.6
750	0.029	8.49	8.78	0.37	92.91	22.57	5.77	6.2%	87.15	230.14	2.48E-06	2477.0
780	0.030	8.26	8.59	0.40	100.35	22.58	5.86	5.8%	94.49	231.04	4.99E-07	2477.4
810	0.030	8.30	8.64	0.41	104.31	22.59	5.85	5.6%	98.46	235.18	2.30E-06	2477.3
840	0.030	8.37	8.70	0.41	102.56	22.62	5.83	5.6%	96.73	238.91	2.07E-06	2477.2
900	0.030	8.49	8.76	0.36	91.69	22.65	5.80	6.3%	85.88	246.68	1.59E-06	2477.3
930	0.029	8.23	8.55	0.39	98.24	22.67	5.91	6.0%	92.33	250.56	2.16E-06	2477.6
960	0.029	8.25	8.58	0.41	101.71	22.68	5.91	5.8%	95.81	252.18	8.98E-07	2477.4
990	0.030	8.36	8.69	0.40	100.33	22.70	5.87	5.8%	94.46	256.33	2.31E-06	2477.2
1020	0.029	8.44	8.74	0.36	89.53	22.71	5.85	6.5%	83.69	259.61	1.82E-06	2477.1
1050	0.030	8.41	8.68	0.35	89.17	22.73	5.87	6.5%	83.30	262.80	1.77E-06	2477.4

Çizelge C.2 Deney-1 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2

Zaman (dk)	$\dot{q}_{gizli}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{duy}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{rad}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{taş}$ (W/m^2)	$T_{yoğ}$ (°C)	T_{doy} (°C)	T_{AUST} (°C)	T_a (°C)	T_{MRT} (°C)	T_{op} (°C)	$h_{yoğ}$ (W/m^2.K)	h_{rad} (W/m^2.K)	$h_{taş}$ (W/m^2.K)	h_{top} (W/m^2.K)
30	49.87	106.11	27.95	78.15	10.96	16.73	23.20	23.13	23.07	23.11	4.20	2.20	4.52	6.74
60	46.82	91.38	0.00	91.38	10.79	16.37	23.06	22.98	22.93	22.98	1.55	0.00	8.66	8.66
90	47.75	86.03	28.57	57.46	10.77	16.08	22.94	22.86	22.80	22.84	4.71	2.20	5.49	7.72
120	43.89	96.54	0.00	96.54	10.74	15.95	22.82	22.75	22.69	22.75	3.18	0.00	8.11	8.11
150	33.10	101.66	28.34	73.32	10.74	15.73	22.71	22.64	22.58	22.62	3.98	2.28	5.39	7.70
180	33.32	96.51	0.00	96.51	10.72	15.34	22.62	22.55	22.49	22.55	6.16	0.00	6.31	6.31
210	36.28	89.97	27.38	62.58	10.60	15.20	22.52	22.45	22.39	22.43	5.16	2.19	4.50	6.71
240	29.24	89.08	0.00	89.08	10.48	14.87	22.44	22.37	22.31	22.37	6.41	0.00	7.08	7.08
270	24.23	81.92	26.98	54.94	10.48	14.61	22.37	22.31	22.24	22.28	5.47	2.19	4.89	7.11
300	8.67	105.67	0.00	105.67	10.48	14.30	22.30	22.25	22.17	22.25	6.23	0.00	6.69	6.69
330	24.99	93.18	26.73	66.45	10.48	14.11	22.24	22.18	22.11	22.15	4.93	2.19	4.45	6.67
360	16.60	97.31	0.00	97.31	10.42	14.12	22.17	22.12	22.05	22.12	3.24	0.00	6.26	6.26
390	19.85	91.42	27.31	64.11	10.26	13.69	22.12	22.07	21.99	22.04	4.63	2.20	4.61	6.83
420	28.50	74.64	0.00	74.64	10.26	13.78	22.08	22.02	21.95	22.02	1.27	0.00	8.31	8.31
450	23.74	79.47	26.13	53.34	10.27	13.58	22.07	22.00	21.94	21.98	3.49	2.18	5.43	7.64
480	28.11	84.17	0.00	84.17	10.26	13.45	22.08	22.00	21.95	22.00	5.45	0.00	6.35	6.35
510	22.57	83.88	26.01	57.87	10.09	13.49	22.10	22.02	21.97	22.00	3.62	2.18	4.08	6.29
540	23.82	78.76	0.00	78.76	9.93	13.07	22.11	22.04	21.98	22.04	0.79	0.00	7.60	7.60
570	17.92	77.83	25.75	52.08	9.97	13.03	22.13	22.06	21.99	22.04	3.72	2.18	5.01	7.21
600	12.00	73.31	0.00	73.31	10.00	12.85	22.14	22.08	22.01	22.08	3.61	0.00	7.16	7.16
630	15.91	80.50	26.07	54.43	10.04	12.76	22.16	22.09	22.03	22.07	4.96	2.18	4.32	6.52
660	4.46	97.79	0.00	97.79	9.97	12.70	22.17	22.11	22.04	22.11	2.90	0.00	6.43	6.43
690	11.57	89.48	25.77	63.71	9.81	12.56	22.19	22.13	22.06	22.10	3.89	2.18	4.44	6.64
720	17.42	74.58	0.00	74.58	9.93	12.53	22.20	22.14	22.07	22.14	1.71	0.00	7.48	7.48
750	12.28	74.86	26.19	48.67	10.01	12.52	22.22	22.16	22.08	22.14	4.56	2.18	4.64	6.85
780	2.47	92.02	0.00	92.02	10.02	12.46	22.23	22.17	22.10	22.17	3.70	0.00	6.15	6.15
810	11.40	87.06	26.50	60.56	9.93	12.34	22.24	22.19	22.11	22.16	3.64	2.18	3.89	6.09
840	10.26	86.48	0.00	86.48	9.86	12.26	22.25	22.20	22.12	22.20	5.23	0.00	6.91	6.91
870	13.50	78.48	26.45	52.04	9.92	12.20	22.25	22.20	22.12	22.18	4.68	2.18	4.62	6.82
900	7.89	77.99	0.00	77.99	9.99	12.01	22.27	22.21	22.14	22.21	2.70	0.00	6.93	6.93
930	10.70	81.64	26.97	54.67	10.01	12.02	22.28	22.23	22.15	22.20	2.21	2.18	3.98	6.18
960	4.45	91.36	0.00	91.36	10.96	16.73	23.20	23.13	23.07	23.11	4.20	2.20	4.52	6.74
990	11.43	83.02	26.64	56.38	10.79	16.37	23.06	22.98	22.93	22.98	1.55	0.00	8.66	8.66
1020	9.02	74.66	0.00	74.66	10.77	16.08	22.94	22.86	22.80	22.84	4.71	2.20	5.49	7.72
1050	8.78	74.52	26.86	47.66	10.74	15.95	22.82	22.75	22.69	22.75	3.18	0.00	8.11	8.11

Çizelge C.3 Deney-2 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1

Zaman (dk)	$\dot{m}_{su}$ [kg/s]	$T_{gidiş}$ (°C)	$T_{dönüş}$ (°C)	ΔT_{su} (°C)	$\dot{q}_{top}$ (W/m^2)	$T_{dış}$ (°C)	$\dot{q}_{kayıp}$ (W/m^2)	Kayıp (%)	$\dot{q}_{net}$ (W/m^2)	Yoğ. Mik. (g)	Yoğ. Akısı (kg/s)	h_{fg} [kJ/kg]
30	0.0301	8.46	9.03	0.59	149.68	25.02	6.74	4.5%	142.94	16.87	9.37E-06	2472.79
60	0.0301	8.45	9.01	0.57	143.19	24.84	6.67	4.6%	136.53	37.45	1.14E-05	2473.14
90	0.0301	8.49	9.02	0.54	137.49	24.68	6.59	4.8%	130.89	50.60	7.30E-06	2473.27
120	0.0300	8.48	9.00	0.53	133.52	24.55	6.55	4.9%	126.97	66.77	8.99E-06	2473.49
150	0.0301	8.45	8.96	0.52	130.68	24.44	6.51	4.9%	124.17	78.43	6.48E-06	2473.73
180	0.0300	8.44	8.93	0.50	126.55	24.34	6.48	5.1%	120.07	90.65	6.79E-06	2473.99
210	0.0300	8.45	8.93	0.49	122.60	24.24	6.44	5.2%	116.17	100.76	5.61E-06	2474.16
240	0.0300	8.49	8.95	0.47	118.41	24.16	6.39	5.4%	112.01	109.01	4.58E-06	2474.20
270	0.0301	8.39	8.85	0.47	119.32	24.08	6.40	5.3%	112.92	118.26	5.14E-06	2474.42
300	0.0301	8.42	8.88	0.46	116.30	24.01	6.36	5.4%	109.94	124.51	3.47E-06	2474.46
330	0.0299	8.46	8.90	0.45	112.62	23.95	6.32	5.6%	106.30	133.95	5.24E-06	2474.59
360	0.0299	8.45	8.88	0.44	111.31	23.88	6.30	5.6%	105.02	140.64	3.72E-06	2474.80
390	0.0301	8.39	8.82	0.44	111.44	23.82	6.30	5.6%	105.14	149.42	4.88E-06	2474.96
420	0.0301	8.43	8.85	0.43	109.34	23.77	6.26	5.7%	103.08	154.17	2.64E-06	2475.05
450	0.0302	8.45	8.87	0.42	106.67	23.72	6.24	5.8%	100.43	161.63	4.14E-06	2475.09
480	0.0305	8.48	8.88	0.42	106.52	23.69	6.21	5.8%	100.30	167.10	3.04E-06	2475.10
510	0.0303	8.42	8.83	0.42	106.37	23.65	6.22	5.8%	100.14	173.67	3.65E-06	2475.24
540	0.0304	8.48	8.87	0.40	103.23	23.62	6.19	5.9%	97.04	180.75	3.93E-06	2475.28
570	0.0303	8.47	8.86	0.41	103.49	23.58	6.17	5.9%	97.31	186.81	3.37E-06	2475.34
600	0.0303	8.47	8.86	0.40	102.35	23.55	6.16	6.0%	96.19	191.99	2.87E-06	2475.39
630	0.0305	8.48	8.87	0.39	100.92	23.52	6.14	6.0%	94.77	197.02	2.79E-06	2475.48
660	0.0306	8.49	8.87	0.39	100.76	23.49	6.13	6.0%	94.63	203.86	3.80E-06	2475.52
690	0.0305	8.51	8.88	0.38	98.38	23.47	6.12	6.2%	92.26	207.46	2.00E-06	2475.48
720	0.0306	8.49	8.87	0.39	99.13	23.45	6.11	6.1%	93.02	211.36	2.17E-06	2475.49
750	0.0306	8.50	8.88	0.38	98.20	23.42	6.10	6.2%	92.10	215.18	2.12E-06	2475.54
780	0.0305	8.49	8.86	0.38	96.21	23.41	6.10	6.3%	90.11	219.24	2.25E-06	2475.61
810	0.0306	8.48	8.85	0.37	96.03	23.39	6.10	6.3%	89.93	221.89	1.48E-06	2475.66
840	0.0304	8.50	8.86	0.37	94.17	23.38	6.09	6.4%	88.08	224.51	1.46E-06	2475.71
870	0.0306	8.48	8.85	0.37	96.14	23.37	6.09	6.3%	90.06	226.28	9.79E-07	2475.79
900	0.0305	8.50	8.86	0.37	94.07	23.36	6.08	6.4%	88.00	228.11	1.02E-06	2475.75
930	0.0305	8.48	8.84	0.37	94.30	23.34	6.08	6.4%	88.22	231.00	1.61E-06	2475.83
960	0.0307	8.50	8.85	0.36	93.73	23.33	6.07	6.4%	87.66	233.06	1.14E-06	2475.94
990	0.0304	8.50	8.86	0.36	92.49	23.32	6.06	6.5%	86.42	234.05	5.47E-07	2475.98
1020	0.0305	8.49	8.85	0.37	93.47	23.31	6.06	6.4%	87.41	234.05	0.00E+00	2476.03

Çizelge C.4 Deney-2 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2

Zaman (dk)	$\dot{q}_{gizli}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{duy}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{rad}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{taş}$ (W/m^2)	$T_{yoğ}$ (°C)	T_{doy} (°C)	T_{AUST} (°C)	T_a (°C)	T_{MRT} (°C)	T_{op} (°C)	$h_{yoğ}$ (W/m^2.K)	h_{rad} (W/m^2.K)	$h_{taş}$ (W/m^2.K)	h_{top} (W/m^2.K)
30	46.35	96.59	27.65	68.94	11.88	19.83	24.35	24.61	24.14	24.47	5.83	2.22	5.42	7.67
60	56.56	79.96	27.52	52.44	11.73	19.17	24.15	24.26	23.93	24.15	7.60	2.22	4.19	6.44
90	36.13	94.77	27.37	67.39	11.67	18.61	24.04	24.11	23.81	24.02	5.21	2.21	5.42	7.67
120	44.45	82.52	0.00	82.52	11.58	18.34	23.94	23.97	23.71	23.97	6.58	0.00	6.66	6.66
150	32.04	92.13	27.31	64.81	11.48	18.12	23.85	23.87	23.61	23.79	4.83	2.21	5.23	7.48
180	33.59	86.47	0.00	86.47	11.37	17.69	23.76	23.78	23.53	23.78	5.31	0.00	6.97	6.97
210	27.78	88.39	27.28	61.10	11.30	17.41	23.68	23.69	23.44	23.62	4.55	2.20	4.93	7.18
240	22.68	89.33	0.00	89.33	11.28	17.03	23.60	23.61	23.36	23.61	3.95	0.00	7.25	7.25
270	25.44	87.48	27.15	60.33	11.19	16.84	23.53	23.54	23.28	23.46	4.50	2.20	4.89	7.13
300	17.19	92.75	0.00	92.75	11.17	16.58	23.47	23.47	23.22	23.47	3.18	0.00	7.54	7.54
330	25.95	80.36	26.96	53.40	11.12	16.33	23.40	23.41	23.12	23.31	4.98	2.19	4.35	6.59
360	18.40	86.62	0.00	86.62	11.03	16.19	23.34	23.35	23.07	23.35	3.57	0.00	7.03	7.03
390	24.13	81.01	27.03	53.97	10.96	15.94	23.28	23.29	23.03	23.20	4.85	2.19	4.38	6.62
420	13.07	90.01	0.00	90.01	10.93	15.74	23.23	23.24	22.98	23.24	2.71	0.00	7.31	7.31
450	20.51	79.92	26.93	52.99	10.91	15.51	23.19	23.20	22.94	23.11	4.46	2.19	4.31	6.55
480	15.07	85.24	0.00	85.24	10.90	15.39	23.16	23.17	22.91	23.17	3.36	0.00	6.95	6.95
510	18.07	82.08	26.91	55.17	10.84	15.23	23.12	23.13	22.87	23.04	4.12	2.19	4.49	6.73
540	19.46	77.58	0.00	77.58	10.83	15.01	23.09	23.10	22.84	23.10	4.65	0.00	6.32	6.32
570	16.68	80.64	26.84	53.80	10.80	14.95	23.05	23.06	22.81	22.98	4.02	2.19	4.39	6.62
600	14.23	81.96	0.00	81.96	10.78	14.79	23.02	23.03	22.78	23.03	3.55	0.00	6.69	6.69
630	13.84	80.94	26.83	54.11	10.75	14.64	23.00	23.00	22.75	22.92	3.55	2.19	4.41	6.65
660	18.84	75.79	0.00	75.79	10.73	14.46	22.97	22.98	22.71	22.98	5.04	0.00	6.18	6.18
690	9.89	82.37	26.70	55.67	10.74	14.33	22.95	22.96	22.69	22.87	2.76	2.19	4.56	6.79
720	10.74	82.28	0.00	82.28	10.74	14.32	22.93	22.94	22.68	22.94	3.00	0.00	6.75	6.75
750	10.50	81.60	26.66	54.94	10.72	14.08	22.91	22.91	22.66	22.83	3.13	2.19	4.51	6.74
780	11.16	78.95	0.00	78.95	10.69	14.03	22.89	22.90	22.65	22.90	3.34	0.00	6.47	6.47
810	7.30	82.63	26.70	55.92	10.67	13.89	22.88	22.89	22.64	22.81	2.26	2.19	4.58	6.81
840	7.21	80.87	0.00	80.87	10.65	13.81	22.86	22.88	22.63	22.88	2.28	0.00	6.61	6.61
870	4.85	85.21	26.75	58.46	10.62	13.74	22.85	22.86	22.61	22.78	1.55	2.19	4.77	7.00
900	5.04	82.96	0.00	82.96	10.63	13.67	22.84	22.85	22.60	22.85	1.66	0.00	6.79	6.79
930	7.97	80.25	26.73	53.52	10.60	13.64	22.83	22.83	22.59	22.75	2.62	2.19	4.38	6.60
960	5.67	82.00	0.00	82.00	10.55	13.44	22.81	22.82	22.56	22.82	1.96	0.00	6.68	6.68
990	2.71	83.72	26.81	56.91	10.53	13.37	22.80	22.82	22.56	22.73	0.95	2.18	4.63	6.86
1020	0.00	87.41	0.00	87.41	10.51	13.33	22.80	22.81	22.55	22.81	0.00	0.00	7.11	7.11

Çizelge C.5 Deney-3 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1

Zaman (dk)	$\dot{m}_{su}$ [kg/s]	$T_{gidiş}$ (°C)	$T_{dönüş}$ (°C)	ΔT_{su} (°C)	$\dot{q}_{top}$ (W/m^2)	$T_{dış}$ (°C)	$\dot{q}_{kayıp}$ (W/m^2)	Kayıp (%)	$\dot{q}_{net}$ (W/m^2)	Yoğ. Mik. (g)	Yoğ. Akısı (kg/s)	h_{fg} [kJ/kg]
30	0.0308	9.00	9.51	0.56	143.47	23.07	5.72	3.9%	137.76	22.13	1.23E-05	2474.37
60	0.0307	9.25	9.75	0.57	146.97	22.90	5.55	3.7%	141.42	38.39	9.03E-06	2473.86
90	0.0307	9.35	9.83	0.51	130.16	22.70	5.43	4.1%	124.73	61.38	1.28E-05	2473.79
120	0.0307	9.91	10.32	0.52	133.75	22.58	5.16	3.8%	128.59	74.55	7.32E-06	2472.92
150	0.0308	9.89	10.32	0.46	119.41	22.43	5.10	4.2%	114.31	92.64	1.01E-05	2472.97
180	0.0309	10.01	10.42	0.49	126.83	22.29	5.00	3.9%	121.83	104.55	6.62E-06	2472.80
210	0.0307	9.85	10.26	0.44	113.28	22.15	5.01	4.4%	108.27	122.97	1.02E-05	2473.19
240	0.0308	10.01	10.39	0.43	111.20	22.05	4.91	4.4%	106.29	130.74	4.32E-06	2473.00
270	0.0309	9.47	9.92	0.40	103.72	21.93	5.07	4.8%	98.65	138.73	4.44E-06	2474.05
300	0.0307	9.57	9.95	0.41	104.32	21.82	4.99	4.7%	99.32	144.18	3.03E-06	2474.13
330	0.0308	9.76	10.16	0.42	107.51	21.76	4.88	4.5%	102.63	148.64	2.48E-06	2473.76
360	0.0307	9.43	9.82	0.37	95.31	21.65	4.98	5.2%	90.33	154.75	3.39E-06	2474.48
390	0.0308	9.69	10.02	0.35	89.84	21.58	4.86	5.4%	84.99	158.22	1.93E-06	2474.14
420	0.0308	10.02	10.37	0.34	87.79	21.56	4.70	5.3%	83.09	161.65	1.91E-06	2473.41
450	0.0307	10.04	10.37	0.36	91.46	21.50	4.68	5.1%	86.79	165.44	2.11E-06	2473.50
480	0.0309	9.89	10.25	0.36	93.21	21.44	4.71	5.0%	88.51	169.89	2.47E-06	2473.79
510	0.0307	9.76	10.09	0.35	91.30	21.36	4.74	5.1%	86.56	175.27	2.99E-06	2474.16
540	0.0308	10.07	10.37	0.34	87.77	21.35	4.61	5.2%	83.16	179.84	2.54E-06	2473.61
570	0.0309	9.88	10.22	0.35	90.74	21.30	4.66	5.1%	86.08	185.64	3.22E-06	2473.95
600	0.0308	9.96	10.28	0.34	87.82	21.26	4.61	5.2%	83.21	190.08	2.47E-06	2473.92
630	0.0309	9.73	10.08	0.35	90.82	21.21	4.68	5.1%	86.14	196.60	3.62E-06	2474.32
660	0.0309	9.66	9.98	0.34	88.75	21.18	4.70	5.3%	84.05	200.97	2.43E-06	2474.72
690	0.0306	9.93	10.23	0.32	82.84	21.16	4.59	5.5%	78.25	207.47	3.61E-06	2474.18
720	0.0309	9.84	10.15	0.33	85.73	21.15	4.62	5.3%	81.11	211.12	2.03E-06	2474.39
750	0.0308	9.98	10.28	0.32	82.32	21.12	4.55	5.5%	77.76	215.36	2.36E-06	2474.13
780	0.0308	9.89	10.20	0.33	85.47	21.11	4.58	5.3%	80.89	217.57	1.22E-06	2474.33
810	0.0307	10.03	10.33	0.32	82.27	21.09	4.52	5.4%	77.75	219.30	9.61E-07	2474.08
840	0.0307	9.82	10.14	0.34	87.31	21.06	4.59	5.2%	82.72	221.40	1.17E-06	2474.49

Çizelge C.6 Deney-3 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2

Zaman (dk)	$\dot{q}_{gizli}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{duy}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{rad}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{taş}$ (W/m^2)	$T_{yoğ}$ (°C)	T_{doy} (°C)	T_{AUST} (°C)	T_a (°C)	T_{MRT} (°C)	T_{op} (°C)	$h_{yoğ}$ (W/m^2.K)	h_{rad} (W/m^2.K)	$h_{taş}$ (W/m^2.K)	h_{top} (W/m^2.K)
30	60.84	76.91	0.00	76.91	11.21	19.91	24.56	24.52	24.30	24.52	6.99	0.00	5.78	5.78
60	44.69	96.73	28.52	68.20	11.43	19.48	24.33	24.29	24.07	24.22	5.55	2.21	5.30	7.56
90	63.19	61.54	0.00	61.54	11.46	19.24	24.11	24.07	23.84	24.07	8.12	0.00	4.88	4.88
120	36.19	92.40	27.09	65.31	11.83	18.81	23.93	23.90	23.66	23.83	5.18	2.24	5.41	7.70
150	49.71	64.60	0.00	64.60	11.80	18.45	23.76	23.74	23.33	23.74	7.48	0.00	5.41	5.41
180	32.72	89.10	25.73	63.37	11.87	18.19	23.61	23.59	23.20	23.48	5.18	2.19	5.41	7.68
210	50.62	57.65	0.00	57.65	11.71	17.94	23.46	23.46	23.13	23.46	8.13	0.00	4.91	4.91
240	21.35	84.94	25.38	59.56	11.79	17.63	23.34	23.33	23.03	23.24	3.66	2.20	5.16	7.42
270	21.96	76.69	0.00	76.69	11.35	17.38	23.23	23.22	22.83	23.22	3.64	0.00	6.46	6.46
300	14.98	84.34	25.89	58.45	11.31	17.04	23.12	23.11	22.84	23.03	2.61	2.19	4.95	7.20
330	12.26	90.37	0.00	90.37	11.47	16.82	23.03	23.02	22.76	23.02	2.29	0.00	7.82	7.82
360	16.80	73.53	25.76	47.77	11.17	16.67	22.93	22.93	22.67	22.84	3.06	2.19	4.06	6.30
390	9.54	75.45	0.00	75.45	11.31	16.45	22.85	22.85	22.59	22.85	1.86	0.00	6.54	6.54
420	9.43	73.66	24.24	49.42	11.62	16.31	22.77	22.78	22.32	22.63	2.01	2.17	4.43	6.69
450	10.42	76.37	0.00	76.37	11.58	16.06	22.71	22.71	22.10	22.71	2.32	0.00	6.86	6.86
480	12.23	76.28	24.13	52.15	11.46	16.00	22.65	22.66	22.05	22.47	2.69	2.16	4.66	6.93
510	14.79	71.77	0.00	71.77	11.30	15.68	22.59	22.60	21.99	22.60	3.38	0.00	6.35	6.35
540	12.56	70.60	23.73	46.87	11.54	15.63	22.54	22.55	21.94	22.35	3.07	2.16	4.26	6.53
570	15.94	70.13	0.00	70.13	11.39	15.52	22.50	22.51	22.08	22.51	3.86	0.00	6.30	6.30
600	12.20	71.01	24.17	46.83	11.40	15.29	22.46	22.47	22.19	22.38	3.14	2.19	4.23	6.47
630	17.93	68.22	0.00	68.22	11.24	15.15	22.42	22.44	22.16	22.44	4.58	0.00	6.09	6.09
660	12.02	72.03	24.61	47.42	11.07	15.04	22.38	22.40	22.06	22.28	3.02	2.18	4.18	6.42
690	17.87	60.38	0.00	60.38	11.29	14.84	22.35	22.37	22.01	22.37	5.04	0.00	5.45	5.45
720	10.04	71.07	24.26	46.81	11.21	14.69	22.33	22.35	22.06	22.25	2.88	2.18	4.20	6.43
750	11.66	66.10	0.00	66.10	11.31	14.71	22.30	22.33	22.06	22.33	3.43	0.00	6.00	6.00
780	6.05	74.83	24.14	50.69	11.23	14.40	22.28	22.31	22.04	22.22	1.91	2.19	4.58	6.81
810	4.76	73.00	0.00	73.00	11.34	14.39	22.27	22.29	22.03	22.29	1.56	0.00	6.66	6.66
840	5.79	76.94	24.20	52.74	11.16	14.22	22.25	22.27	22.00	22.18	1.89	2.18	4.75	6.98

Çizelge C.7 Deney-4 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1

Zaman (dk)	$\dot{m}_{su}$ [kg/s]	$T_{gidiş}$ (°C)	$T_{dönüş}$ (°C)	ΔT_{su} (°C)	$\dot{q}_{top}$ (W/m^2)	$T_{dış}$ (°C)	$\dot{q}_{kayıp}$ (W/m^2)	Kayıp (%)	$\dot{q}_{net}$ (W/m^2)	Yoğ. Mik. (g)	Yoğ. Akısı (kg/s)	h_{fg} [kJ/kg]
30	0.0305	9.95	10.54	0.59	150.99	24.21	5.78	3.3%	145.21	18.86	1.05E-05	2470.47
60	0.0305	9.66	10.20	0.55	139.87	23.95	5.80	4.5%	134.07	35.73	9.37E-06	2471.35
90	0.0306	10.04	10.54	0.49	126.50	23.75	5.57	4.1%	120.93	51.09	8.54E-06	2470.85
120	0.0307	9.84	10.36	0.52	132.65	23.56	5.57	4.0%	127.08	67.88	9.32E-06	2471.31
150	0.0307	10.01	10.46	0.45	115.78	23.37	5.44	4.0%	110.34	82.01	7.85E-06	2471.37
180	0.0308	9.95	10.44	0.49	126.81	23.22	5.39	4.5%	121.42	93.73	6.51E-06	2471.50
210	0.0308	9.93	10.38	0.45	115.72	23.04	5.33	4.1%	110.39	103.66	5.51E-06	2471.81
240	0.0308	10.04	10.48	0.44	112.58	22.89	5.23	4.4%	107.36	113.40	5.41E-06	2471.67
270	0.0310	10.04	10.47	0.43	111.28	22.77	5.18	4.6%	106.10	120.97	4.21E-06	2471.76
300	0.0308	10.07	10.49	0.42	108.07	22.63	5.11	4.3%	102.95	126.95	3.32E-06	2471.78
330	0.0308	10.12	10.52	0.40	104.35	22.52	5.05	4.4%	99.30	133.48	3.63E-06	2471.81
360	0.0308	10.09	10.49	0.40	103.05	22.40	5.01	4.6%	98.04	140.05	3.65E-06	2471.94
390	0.0309	10.16	10.55	0.39	100.71	22.30	4.94	4.1%	95.77	146.21	3.42E-06	2471.87
420	0.0308	10.08	10.47	0.39	99.90	22.21	4.94	4.4%	94.96	151.40	2.89E-06	2472.12
450	0.0310	9.88	10.28	0.40	104.28	22.10	4.98	4.7%	99.30	154.82	1.90E-06	2472.63
480	0.0309	9.97	10.34	0.37	95.40	22.03	4.91	5.5%	90.48	160.14	2.95E-06	2472.56
510	0.0309	9.79	10.19	0.40	104.34	21.94	4.95	4.4%	99.39	166.66	3.62E-06	2472.87
540	0.0309	9.79	10.16	0.36	94.41	21.87	4.92	5.1%	89.49	171.85	2.88E-06	2473.04
570	0.0308	9.98	10.34	0.36	93.63	21.81	4.82	5.5%	88.80	179.74	4.38E-06	2472.73
600	0.0309	9.83	10.20	0.36	93.78	21.74	4.86	5.8%	88.92	184.94	2.89E-06	2473.11
630	0.0309	10.05	10.39	0.34	88.85	21.70	4.75	5.5%	84.09	187.06	1.18E-06	2472.71
660	0.0308	9.95	10.30	0.35	89.51	21.64	4.77	5.3%	84.74	190.40	1.86E-06	2472.94
690	0.0309	10.14	10.47	0.33	85.14	21.61	4.68	5.9%	80.46	192.44	1.14E-06	2472.66
720	0.0311	9.94	10.30	0.32	83.48	21.55	4.73	5.7%	78.74	195.13	1.49E-06	2472.99
750	0.0310	9.96	10.29	0.34	87.54	21.51	4.71	5.9%	82.83	197.83	1.50E-06	2473.08
780	0.0309	10.23	10.52	0.29	76.11	21.48	4.60	6.4%	71.51	200.61	1.54E-06	2472.67
810	0.0308	11.03	11.29	0.26	66.01	21.51	4.29	6.9%	61.72	202.99	1.32E-06	2471.08
840	0.0306	10.94	11.24	0.29	75.09	21.50	4.31	5.7%	70.78	204.33	7.43E-07	2471.16
870	0.0306	10.99	11.28	0.29	74.81	21.47	4.28	5.7%	70.53	205.98	9.16E-07	2471.07
900	0.0305	10.99	11.27	0.28	72.86	21.45	4.27	5.8%	68.59	207.97	1.10E-06	2471.10
930	0.0308	10.80	11.10	0.30	77.70	21.42	4.33	5.5%	73.36	210.13	1.20E-06	2471.46
960	0.0305	10.90	11.17	0.28	70.51	21.40	4.29	6.0%	66.22	211.38	6.99E-07	2471.36
990	0.0306	10.91	11.21	0.30	76.12	21.39	4.28	5.6%	71.84	212.49	6.17E-07	2471.28
1020	0.0308	10.88	11.17	0.28	73.07	21.37	4.28	5.8%	68.78	213.59	6.11E-07	2471.39
1050	0.0305	10.80	11.11	0.32	80.66	21.34	4.30	5.3%	76.36	214.74	6.39E-07	2471.57
1080	0.0307	10.55	10.85	0.30	77.94	21.29	4.38	5.6%	73.56	216.25	8.39E-07	2472.19
1110	0.0307	10.86	11.11	0.25	65.29	21.29	4.27	6.5%	61.02	217.92	9.28E-07	2471.69
1140	0.0306	10.87	11.17	0.29	75.71	21.28	4.25	5.6%	71.46	219.43	8.39E-07	2471.49
1170	0.0308	10.90	11.18	0.27	70.08	21.27	4.23	6.0%	65.85	223.42	2.21E-06	2471.52
1200	0.0307	10.90	11.19	0.29	74.18	21.28	4.24	5.7%	69.94	225.09	9.28E-07	2471.45
1230	0.0306	10.90	11.18	0.28	71.60	21.27	4.23	5.9%	67.36	226.60	8.39E-07	2471.47
1260	0.0306	10.96	11.22	0.26	66.51	21.28	4.22	6.3%	62.29	227.89	7.18E-07	2471.41

Çizelge C.8 Deney-4 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2

Zaman (dk)	$\dot{q}_{gizli}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{duy}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{rad}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{taş}$ (W/m^2)	$T_{yoğ}$ (°C)	T_{doy} (°C)	T_{AUST} (°C)	T_a (°C)	T_{MRT} (°C)	T_{op} (°C)	$h_{yoğ}$ (W/m^2.K)	h_{rad} (W/m^2.K)	$h_{taş}$ (W/m^2.K)	h_{top} (W/m^2.K)
30	51.78	93.43	28.46	64.96	12.86	20.21	25.48	25.50	25.37	25.46	7.05	2.26	5.14	7.41
60	46.31	87.76	28.64	59.12	12.49	19.85	25.23	25.25	25.12	25.21	6.29	2.25	4.63	6.90
90	42.18	78.75	0.00	78.75	12.70	19.49	25.01	25.02	24.90	25.02	6.21	0.00	6.39	6.39
120	46.09	80.99	27.57	53.42	12.50	19.20	24.80	24.81	24.68	24.76	6.88	2.24	4.34	6.60
150	38.81	71.54	0.00	71.54	12.48	18.81	24.60	24.62	24.49	24.62	6.13	0.00	5.89	5.89
180	32.20	89.22	26.86	62.36	12.42	18.44	24.43	24.44	24.31	24.40	5.35	2.24	5.19	7.45
210	27.26	83.13	0.00	83.13	12.29	18.07	24.26	24.26	24.14	24.26	4.72	0.00	6.95	6.95
240	26.75	80.61	26.21	54.39	12.35	17.92	24.09	24.09	23.98	24.06	4.81	2.23	4.63	6.89
270	20.79	85.31	0.00	85.31	12.31	17.63	23.95	23.95	23.84	23.95	3.91	0.00	7.33	7.33
300	16.42	86.53	25.63	60.90	12.31	17.28	23.81	23.81	23.70	23.78	3.30	2.23	5.29	7.54
330	17.94	81.36	0.00	81.36	12.29	17.05	23.69	23.68	23.57	23.68	3.77	0.00	7.14	7.14
360	18.04	80.00	25.21	54.79	12.24	16.88	23.57	23.57	23.46	23.54	3.89	2.22	4.84	7.08
390	16.92	78.85	0.00	78.85	12.27	16.64	23.47	23.47	23.36	23.47	3.87	0.00	7.04	7.04
420	14.27	80.69	24.89	55.80	12.16	16.42	23.37	23.37	23.26	23.33	3.35	2.22	4.98	7.22
450	9.40	89.89	0.00	89.89	11.95	16.26	23.26	23.26	23.15	23.26	2.18	0.00	7.95	7.95
480	14.61	75.87	24.81	51.06	11.98	16.07	23.17	23.17	23.06	23.13	3.57	2.22	4.56	6.80
510	17.90	81.49	0.00	81.49	11.85	15.84	23.09	23.09	22.98	23.09	4.48	0.00	7.25	7.25
540	14.26	75.23	24.88	50.35	11.77	15.73	23.01	23.00	22.90	22.97	3.60	2.21	4.48	6.72
570	21.68	67.12	0.00	67.12	11.91	15.47	22.94	22.93	22.83	22.93	6.09	0.00	6.09	6.09
600	14.30	74.63	24.59	50.03	11.75	15.33	22.87	22.87	22.77	22.84	3.99	2.21	4.50	6.73
630	5.81	78.28	0.00	78.28	11.91	15.22	22.81	22.81	22.71	22.81	1.76	0.00	7.19	7.19
660	9.18	75.57	24.17	51.40	11.82	15.11	22.76	22.75	22.65	22.72	2.79	2.21	4.70	6.93
690	5.62	74.84	0.00	74.84	11.93	15.04	22.70	22.70	22.60	22.70	1.81	0.00	6.95	6.95
720	7.39	71.35	23.94	47.41	11.79	14.78	22.65	22.65	22.55	22.62	2.47	2.20	4.37	6.59
750	7.42	75.40	0.00	75.40	11.76	14.63	22.61	22.61	22.51	22.61	2.58	0.00	6.95	6.95
780	7.63	63.88	23.51	40.38	11.93	14.60	22.57	22.57	22.47	22.53	2.86	2.21	3.80	6.03
810	6.54	55.18	0.00	55.18	12.60	14.46	22.55	22.55	22.45	22.55	3.52	0.00	5.55	5.55
840	3.67	67.11	22.05	45.06	12.57	14.38	22.52	22.53	22.42	22.49	2.02	2.22	4.52	6.76
870	4.52	66.01	0.00	66.01	12.60	14.62	22.50	22.50	22.40	22.50	2.25	0.00	6.67	6.67
900	5.46	63.13	21.91	41.23	12.59	14.22	22.48	22.49	22.38	22.45	3.35	2.22	4.17	6.40
930	5.93	67.43	0.00	67.43	12.44	14.38	22.46	22.47	22.36	22.47	3.06	0.00	6.72	6.72
960	3.45	62.77	22.03	40.74	12.48	14.26	22.43	22.44	22.33	22.40	1.95	2.21	4.09	6.33
990	3.05	68.80	0.00	68.80	12.52	14.32	22.41	22.42	22.31	22.42	1.69	0.00	6.95	6.95
1020	3.02	65.76	21.95	43.81	12.47	14.03	22.39	22.39	22.29	22.36	1.94	2.21	4.41	6.65
1050	3.16	73.20	0.00	73.20	12.39	14.00	22.37	22.38	22.27	22.38	1.97	0.00	7.33	7.33
1080	4.15	69.41	22.57	46.84	12.13	14.03	22.35	22.36	22.25	22.32	2.18	2.21	4.58	6.81
1110	4.59	56.44	0.00	56.44	12.34	13.78	22.33	22.34	22.23	22.34	3.19	0.00	5.64	5.64
1140	4.15	67.31	21.87	45.45	12.43	13.94	22.32	22.32	22.22	22.29	2.73	2.21	4.59	6.83
1170	10.94	54.91	0.00	54.91	12.42	13.90	22.30	22.31	22.20	22.31	7.38	0.00	5.55	5.55
1200	4.59	65.36	21.77	43.59	12.45	13.72	22.29	22.30	22.19	22.27	3.58	2.21	4.42	6.65
1230	4.15	63.22	0.00	63.22	12.44	13.69	22.28	22.29	22.18	22.29	3.31	0.00	6.41	6.41
1260	3.55	58.74	21.70	37.05	12.46	13.78	22.27	22.28	22.17	22.24	2.70	2.21	3.77	6.01

Çizelge C.9 Deney-5 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1

Zaman (dk)	$\dot{m}_{su}$ [kg/s]	$T_{gidiş}$ (°C)	$T_{dönüş}$ (°C)	ΔT_{su} (°C)	$\dot{q}_{top}$ (W/m^2)	$T_{dış}$ (°C)	$\dot{q}_{kayıp}$ (W/m^2)	Kayıp (%)	$\dot{q}_{net}$ (W/m^2)	Yoğ. Mik. (g)	Yoğ. Akısı (kg/s)	h_{fg} [kJ/kg]
30	0.0311	10.85	11.30	0.45	117.61	23.36	5.09	4.3%	112.52	17.95	9.97E-06	2469.33
60	0.0309	10.98	11.41	0.46	119.18	23.19	4.97	4.1%	114.22	31.36	7.45E-06	2469.22
90	0.0310	10.73	11.17	0.44	115.45	23.02	5.00	4.3%	110.45	49.80	1.02E-05	2469.80
120	0.0311	10.85	11.26	0.44	114.76	22.88	4.90	4.2%	109.87	61.88	6.71E-06	2469.81
150	0.0312	10.96	11.37	0.41	108.12	22.77	4.80	4.4%	103.31	75.96	7.82E-06	2469.67
180	0.0312	10.81	11.20	0.41	107.26	22.64	4.82	4.4%	102.44	86.56	5.88E-06	2470.16
210	0.0309	11.00	11.37	0.37	95.27	22.53	4.70	4.9%	90.57	95.88	5.18E-06	2469.89
240	0.0311	10.90	11.27	0.37	97.03	22.42	4.69	4.8%	92.34	103.10	4.01E-06	2470.19
270	0.0310	11.01	11.37	0.35	91.86	22.34	4.62	5.0%	87.25	111.98	4.93E-06	2470.09
300	0.0309	10.95	11.32	0.37	95.79	22.24	4.60	4.8%	91.19	117.96	3.32E-06	2470.24
330	0.0310	10.77	11.14	0.37	96.39	22.14	4.63	4.8%	91.75	124.39	3.57E-06	2470.71
360	0.0310	10.88	11.22	0.34	88.31	22.07	4.56	5.1%	83.75	129.28	2.71E-06	2470.64
390	0.0310	10.65	11.03	0.38	99.46	21.97	4.61	4.6%	94.85	134.19	2.73E-06	2471.18
420	0.0309	10.65	11.00	0.35	90.30	21.89	4.58	5.0%	85.72	140.32	3.41E-06	2471.37
450	0.0311	10.87	11.21	0.33	87.02	21.85	4.47	5.1%	82.55	144.68	2.42E-06	2470.97
480	0.0308	10.81	11.15	0.34	88.65	21.80	4.48	5.0%	84.17	148.38	2.06E-06	2471.14
510	0.0309	10.96	11.29	0.32	83.53	21.76	4.40	5.2%	79.13	150.99	1.45E-06	2470.92
540	0.0308	10.98	11.29	0.31	79.20	21.71	4.37	5.5%	74.82	153.73	1.52E-06	2470.93
570	0.0307	11.34	11.63	0.30	75.88	21.69	4.23	5.5%	71.65	156.17	1.35E-06	2470.27
600	0.0306	11.49	11.77	0.28	72.16	21.67	4.16	5.7%	68.00	158.60	1.35E-06	2470.00
630	0.0307	11.84	12.11	0.27	68.86	21.66	4.01	5.8%	64.85	162.55	2.19E-06	2469.32
660	0.0308	11.68	11.96	0.28	72.02	21.62	4.06	5.6%	67.96	165.75	1.78E-06	2469.66
690	0.0308	11.81	12.08	0.27	68.94	21.61	4.00	5.8%	64.93	167.32	8.68E-07	2469.44
720	0.0310	11.75	12.02	0.27	70.42	21.60	4.02	5.7%	66.39	169.50	1.21E-06	2469.60
750	0.0309	11.83	12.10	0.27	70.38	21.57	3.98	5.6%	66.41	170.21	3.97E-07	2469.42
780	0.0307	11.14	11.47	0.30	77.26	21.50	4.22	5.4%	73.04	172.39	1.21E-06	2470.73
810	0.0309	11.22	11.50	0.28	72.29	21.47	4.18	5.7%	68.11	173.20	4.49E-07	2470.74
840	0.0306	11.78	12.01	0.24	61.07	21.49	3.97	6.5%	57.09	174.66	8.11E-07	2469.70
870	0.0308	11.70	11.97	0.27	69.32	21.49	4.00	5.7%	65.32	175.70	5.78E-07	2469.81
900	0.0308	11.85	12.09	0.24	63.09	21.48	3.94	6.2%	59.15	177.06	7.58E-07	2469.59
930	0.0308	11.83	12.09	0.27	68.68	21.47	3.94	5.7%	64.75	178.92	1.03E-06	2469.54
960	0.0309	11.89	12.15	0.25	65.18	21.47	3.91	6.0%	61.27	180.86	1.08E-06	2469.44
990	0.0307	11.72	11.99	0.27	69.95	21.46	3.97	5.6%	65.97	182.25	7.70E-07	2469.76
1020	0.0308	11.81	12.05	0.25	63.31	21.44	3.94	6.2%	59.37	184.51	1.25E-06	2469.66
1050	0.0309	11.46	11.77	0.26	67.37	21.41	4.06	6.0%	63.32	186.06	8.63E-07	2470.21
1080	0.0307	11.32	11.59	0.27	68.96	21.37	4.10	5.9%	64.86	187.40	7.47E-07	2470.64
1110	0.0308	11.70	11.91	0.24	61.90	21.37	3.96	6.4%	57.94	188.72	7.29E-07	2470.02
1140	0.0309	11.50	11.79	0.29	74.16	21.37	4.03	5.4%	70.14	190.18	8.11E-07	2470.19
1170	0.0307	11.48	11.74	0.26	66.01	21.35	4.03	6.1%	61.98	190.70	2.92E-07	2470.38
1200	0.0311	11.77	11.99	0.22	57.94	21.36	3.92	6.7%	54.02	192.24	8.57E-07	2469.91
1230	0.0309	11.82	12.06	0.24	61.74	21.37	3.90	6.3%	57.83	193.13	4.90E-07	2469.76
1260	0.0310	11.84	12.09	0.24	63.28	21.37	3.89	6.1%	59.38	194.30	6.54E-07	2469.68

Çizelge C.10 Deney-5 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2

Zaman (dk)	$\dot{q}_{gizli}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{duy}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{rad}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{taş}$ (W/m^2)	$T_{yoğ}$ (°C)	T_{doy} (°C)	T_{AUST} (°C)	T_a (°C)	T_{MRT} (°C)	T_{op} (°C)	$h_{yoğ}$ (W/m^2.K)	h_{rad} (W/m^2.K)	$h_{taş}$ (W/m^2.K)	h_{top} (W/m^2.K)
30	49.25	63.27	26.54	36.73	13.34	19.77	24.55	24.57	24.44	24.52	7.66	2.37	3.27	5.66
60	36.79	77.42	25.75	51.67	13.39	19.33	24.37	24.40	24.27	24.35	6.19	2.34	4.69	7.06
90	50.61	59.84	0.00	59.84	13.14	19.12	24.19	24.21	24.09	24.21	8.47	0.00	5.41	5.41
120	33.14	76.72	24.72	52.00	13.14	18.88	24.03	24.04	23.93	24.00	5.77	2.27	4.77	7.06
150	38.65	64.66	0.00	64.66	13.20	18.49	23.89	23.90	23.79	23.90	7.30	0.00	6.04	6.04
180	29.07	73.37	24.41	48.96	12.99	18.23	23.76	23.77	23.66	23.73	5.55	2.27	4.54	6.83
210	25.58	64.99	0.00	64.99	13.11	17.99	23.65	23.65	23.54	23.65	5.24	0.00	6.16	6.16
240	19.81	72.52	24.08	48.45	12.98	17.86	23.53	23.52	23.42	23.49	4.06	2.28	4.59	6.90
270	24.38	62.87	0.00	62.87	13.02	17.37	23.42	23.42	23.32	23.42	5.60	0.00	6.04	6.04
300	16.42	74.77	23.54	51.23	12.95	17.35	23.33	23.33	23.23	23.29	3.74	2.27	4.94	7.23
330	17.66	74.09	0.00	74.09	12.76	17.05	23.24	23.24	23.13	23.24	4.12	0.00	7.07	7.07
360	13.41	70.34	23.14	47.20	12.79	16.84	23.15	23.15	23.05	23.12	3.31	2.23	4.55	6.81
390	13.48	81.37	0.00	81.37	12.56	16.62	23.08	23.08	22.97	23.08	3.32	0.00	7.74	7.74
420	16.84	68.88	23.07	45.82	12.48	16.43	23.00	23.00	22.90	22.97	4.27	2.19	4.35	6.57
450	11.95	70.59	0.00	70.59	12.65	16.30	22.94	22.94	22.84	22.94	3.27	0.00	6.86	6.86
480	10.18	73.99	23.36	50.63	12.58	16.16	22.88	22.88	22.78	22.85	2.84	2.27	4.91	7.20
510	7.17	71.96	0.00	71.96	12.67	16.01	22.83	22.83	22.72	22.83	2.14	0.00	7.08	7.08
540	7.52	67.31	22.87	44.43	12.66	15.89	22.78	22.79	22.68	22.75	2.33	2.26	4.39	6.67
570	6.69	64.96	0.00	64.96	12.94	15.85	22.73	22.74	22.64	22.74	2.30	0.00	6.63	6.63
600	6.69	61.31	22.47	38.84	13.05	15.69	22.69	22.70	22.60	22.67	2.54	2.33	4.03	6.38
630	10.84	54.01	0.00	54.01	13.34	15.63	22.66	22.66	22.57	22.66	4.75	0.00	5.80	5.80
660	8.78	59.18	21.44	37.74	13.20	15.57	22.63	22.64	22.54	22.60	3.71	2.27	4.00	6.29
690	4.29	60.64	0.00	60.64	13.29	15.39	22.61	22.62	22.51	22.62	2.04	0.00	6.50	6.50
720	5.99	60.40	20.94	39.46	13.23	15.38	22.58	22.59	22.49	22.56	2.78	2.24	4.21	6.47
750	1.96	64.45	0.00	64.45	13.30	15.09	22.56	22.57	22.46	22.57	1.10	0.00	6.95	6.95
780	5.97	67.07	20.80	46.27	12.75	15.19	22.53	22.54	22.43	22.51	2.44	2.13	4.73	6.87
810	2.22	65.89	0.00	65.89	12.74	15.15	22.50	22.51	22.41	22.51	0.92	0.00	6.75	6.75
840	4.01	53.09	21.69	31.40	13.18	14.99	22.48	22.50	22.39	22.45	2.22	2.33	3.37	5.73
870	2.85	62.46	0.00	62.46	13.14	14.86	22.47	22.49	22.38	22.49	1.66	0.00	6.68	6.68
900	3.75	55.40	20.67	34.73	13.23	14.91	22.46	22.48	22.37	22.43	2.23	2.24	3.76	6.02
930	5.10	59.65	0.00	59.65	13.25	14.76	22.44	22.46	22.35	22.46	3.38	0.00	6.48	6.48
960	5.33	55.94	20.51	35.43	13.29	14.70	22.43	22.45	22.34	22.41	3.79	2.25	3.87	6.14
990	3.80	62.17	0.00	62.17	13.16	14.79	22.42	22.45	22.33	22.45	2.33	0.00	6.69	6.69
1020	6.19	53.18	20.32	32.86	13.20	14.77	22.40	22.43	22.31	22.38	3.96	2.21	3.56	5.79
1050	4.27	59.05	0.00	59.05	12.97	14.59	22.39	22.41	22.30	22.41	2.63	0.00	6.25	6.25
1080	3.69	61.17	20.45	40.71	12.79	14.54	22.37	22.39	22.28	22.35	2.11	2.13	4.24	6.39
1110	3.60	54.34	0.00	54.34	13.05	14.39	22.36	22.38	22.26	22.38	2.68	0.00	5.83	5.83
1140	4.01	66.13	21.23	44.90	12.98	14.54	22.35	22.38	22.26	22.34	2.56	2.26	4.78	7.06
1170	1.44	60.54	0.00	60.54	12.90	14.31	22.34	22.37	22.25	22.37	1.02	0.00	6.39	6.39
1200	4.24	49.78	20.79	28.99	13.09	14.29	22.33	22.35	22.24	22.31	3.54	2.25	3.13	5.40
1230	2.42	55.41	0.00	55.41	13.16	14.24	22.33	22.35	22.24	22.35	2.24	0.00	6.03	6.03
1260	3.23	56.15	20.52	35.64	13.19	14.33	22.32	22.35	22.24	22.31	2.84	2.25	3.89	6.16

Çizelge C.11 Deney-6 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-1

Zaman (dk)	$\dot{m}_{su}$ [kg/s]	$T_{gidiş}$ (°C)	$T_{dönüş}$ (°C)	ΔT_{su} (°C)	$\dot{q}_{top}$ (W/m^2)	$T_{dış}$ (°C)	$\dot{q}_{kayıp}$ (W/m^2)	Kayıp (%)	$\dot{q}_{net}$ (W/m^2)	Yoğ. Mik. (g)	Yoğ. Akısı (kg/s)	h_{fg} [kJ/kg]
0.0308	11.84	12.28	0.49	126.45	23.92	4.91	3.8%	121.54	14.85	8.25E-06	2467.37	2469.33
0.0308	11.76	12.21	0.47	121.22	23.74	4.87	4.0%	116.35	27.29	6.91E-06	2467.56	2469.22
0.0306	11.84	12.26	0.43	110.33	23.57	4.77	4.3%	105.56	41.39	7.83E-06	2467.61	2469.80
0.0308	11.82	12.25	0.43	110.74	23.41	4.71	4.2%	106.03	52.54	6.19E-06	2467.70	2469.81
0.0306	11.68	12.09	0.41	104.16	23.25	4.71	4.5%	99.45	64.72	6.77E-06	2468.20	2469.67
0.0309	11.91	12.28	0.37	95.99	23.14	4.57	4.7%	91.42	73.48	4.87E-06	2468.03	2470.16
0.0308	11.71	12.10	0.39	100.52	22.99	4.59	4.5%	95.93	83.86	5.77E-06	2468.43	2469.89
0.0310	11.82	12.17	0.35	90.98	22.87	4.50	4.9%	86.48	92.01	4.53E-06	2468.42	2470.19
0.0309	11.78	12.14	0.36	94.15	22.75	4.47	4.7%	89.68	98.92	3.84E-06	2468.55	2470.09
0.0308	11.80	12.13	0.34	87.38	22.64	4.42	5.0%	82.96	104.09	2.87E-06	2468.65	2470.24
0.0311	12.05	12.36	0.32	83.37	22.56	4.29	5.1%	79.08	106.80	1.50E-06	2468.25	2470.71
0.0308	12.17	12.47	0.31	79.01	22.48	4.21	5.3%	74.80	109.85	1.69E-06	2468.02	2470.64
0.0312	12.47	12.74	0.30	78.38	22.41	4.06	5.1%	74.32	113.67	2.12E-06	2467.57	2471.18
0.0312	12.74	13.01	0.27	70.82	22.37	3.93	5.5%	66.89	116.95	1.82E-06	2467.03	2471.37
0.0310	12.82	13.07	0.29	75.44	22.33	3.88	5.1%	71.55	121.38	2.47E-06	2466.90	2470.97
0.0311	12.76	13.04	0.28	72.59	22.27	3.88	5.3%	68.71	124.43	1.69E-06	2466.98	2471.14
0.0310	12.66	12.92	0.26	67.49	22.19	3.89	5.7%	63.60	126.60	1.21E-06	2467.28	2470.92
0.0311	12.81	13.07	0.26	67.14	22.16	3.82	5.6%	63.32	129.62	1.67E-06	2466.98	2470.93
0.0312	12.40	12.68	0.27	70.56	22.08	3.95	5.6%	66.61	132.18	1.42E-06	2467.81	2470.27
0.0311	12.48	12.74	0.26	66.76	22.04	3.90	5.8%	62.86	134.88	1.50E-06	2467.76	2470.00
0.0313	12.81	13.04	0.24	62.93	22.01	3.76	5.9%	59.17	138.62	2.08E-06	2467.15	2469.32
0.0313	12.86	13.10	0.25	65.55	21.99	3.73	5.6%	61.82	141.13	1.40E-06	2467.03	2469.66
0.0312	12.92	13.16	0.24	63.56	21.97	3.70	5.8%	59.86	143.25	1.18E-06	2466.94	2469.44
0.0311	12.85	13.09	0.24	61.68	21.93	3.71	6.0%	57.97	144.91	9.22E-07	2467.12	2469.60
0.0312	12.89	13.13	0.25	64.14	21.90	3.68	5.7%	60.46	146.02	6.17E-07	2466.99	2469.42
0.0312	12.49	12.76	0.26	68.56	21.86	3.82	5.5%	64.73	148.62	1.44E-06	2467.80	2470.73
0.0313	12.59	12.83	0.23	61.06	21.82	3.77	6.1%	57.29	150.80	1.21E-06	2467.70	2470.74
0.0313	12.89	13.11	0.22	57.20	21.81	3.64	6.3%	53.56	153.17	1.32E-06	2467.11	2469.70
0.0312	12.74	12.99	0.25	64.77	21.79	3.70	5.7%	61.07	155.55	1.32E-06	2467.35	2469.81
0.0310	12.73	12.97	0.23	60.92	21.77	3.69	6.0%	57.23	156.67	6.22E-07	2467.45	2469.59
0.0312	12.77	13.02	0.25	65.60	21.75	3.67	5.5%	61.93	158.66	1.11E-06	2467.33	2469.54
0.0310	12.32	12.59	0.26	67.53	21.70	3.83	5.6%	63.70	160.72	1.14E-06	2468.26	2469.44
0.0311	12.43	12.66	0.24	62.57	21.69	3.79	6.0%	58.79	164.36	2.02E-06	2468.17	2469.76
0.0309	12.39	12.66	0.25	64.68	21.68	3.79	5.8%	60.89	165.39	5.72E-07	2468.10	2469.66
0.0308	12.20	12.46	0.23	59.38	21.63	3.85	6.4%	55.53	167.70	1.29E-06	2468.61	2470.21
0.0307	12.54	12.75	0.21	54.12	21.63	3.72	6.8%	50.40	169.43	9.59E-07	2468.04	2470.64
0.0308	12.51	12.75	0.24	62.49	21.63	3.73	5.9%	58.76	171.77	1.30E-06	2468.02	2470.02
0.0307	12.58	12.81	0.23	58.01	21.61	3.69	6.3%	54.32	172.91	6.34E-07	2467.94	2470.19
0.0306	12.77	13.00	0.22	57.67	21.61	3.61	6.2%	54.06	173.66	4.16E-07	2467.58	2470.38
0.0310	12.69	12.91	0.22	58.12	21.59	3.64	6.2%	54.49	174.76	6.10E-07	2467.80	2469.91
0.0309	12.91	13.12	0.23	59.54	21.60	3.55	5.9%	55.99	176.26	8.34E-07	2467.40	2469.76
0.0310	12.59	12.84	0.24	62.44	21.57	3.67	5.8%	58.77	178.24	1.10E-06	2467.90	2469.68
0.0309	12.62	12.85	0.22	57.87	21.56	3.65	6.3%	54.22	180.34	1.16E-06	2467.96	2467.96
0.0307	12.73	12.95	0.23	58.52	21.57	3.61	6.1%	54.91	181.69	7.53E-07	2467.74	2467.74
0.0307	12.63	12.86	0.23	58.79	21.53	3.64	6.1%	55.15	183.45	9.74E-07	2467.94	2467.94
0.0308	12.77	12.98	0.21	54.76	21.53	3.58	6.5%	51.18	184.82	7.66E-07	2467.69	2467.69
0.0308	12.72	12.94	0.22	56.59	21.52	3.60	6.3%	52.99	185.99	6.49E-07	2467.79	2467.79

Çizelge C.12 Deney-6 yapılan ölçümler ve ısı transferi hesapları bulguları özet çizelge-2

Zaman (dk)	$\dot{q}_{gizli}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{duy}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{rad}$ (W/m^2)	$\dot{q}_{taş}$ (W/m^2)	$T_{yoğ}$ (°C)	T_{doy} (°C)	T_{AUST} (°C)	T_a (°C)	T_{MRT} (°C)	T_{op} (°C)	$h_{yoğ}$ (W/m^2.K)	h_{rad} (W/m^2.K)	$h_{taş}$ (W/m^2.K)	h_{top} (W/m^2.K)
30	40.70	80.84	25.40	55.43	14.17	19.90	25.09	25.10	25.00	25.07	7.10	2.33	5.07	7.42
60	34.12	82.24	24.78	57.45	14.09	19.69	24.89	24.90	24.80	24.87	6.09	2.29	5.31	7.62
90	38.66	66.90	0.00	66.90	14.06	19.37	24.71	24.72	24.61	24.72	7.28	0.00	6.28	6.28
120	30.57	75.46	24.08	51.38	14.03	19.02	24.54	24.53	24.44	24.50	6.12	2.29	4.89	7.20
150	33.40	66.05	0.00	66.05	13.82	18.89	24.37	24.36	24.27	24.36	6.58	0.00	6.26	6.26
180	24.02	67.39	23.76	43.63	13.89	18.60	24.22	24.22	24.12	24.18	5.10	2.30	4.22	6.55
210	28.47	67.46	0.00	67.46	13.72	18.31	24.08	24.07	23.98	24.07	6.20	0.00	6.52	6.52
240	22.35	64.12	23.30	40.82	13.72	18.12	23.95	23.95	23.85	23.91	5.08	2.28	3.99	6.29
270	18.96	70.72	0.00	70.72	13.67	17.92	23.83	23.82	23.73	23.82	4.46	0.00	6.96	6.96
300	14.18	68.78	22.80	45.98	13.62	17.70	23.71	23.71	23.61	23.68	3.48	2.26	4.56	6.84
330	7.42	71.66	0.00	71.66	13.80	17.62	23.61	23.61	23.52	23.61	1.94	0.00	7.30	7.30
360	8.36	66.44	22.03	44.41	13.89	17.40	23.51	23.52	23.42	23.48	2.39	2.29	4.61	6.93
390	10.47	63.84	0.00	63.84	14.08	17.27	23.42	23.42	23.33	23.42	3.29	0.00	6.83	6.83
420	8.98	57.91	20.99	36.92	14.31	17.04	23.36	23.36	23.27	23.33	3.28	2.32	4.08	6.42
450	12.17	59.39	0.00	59.39	14.36	16.87	23.29	23.30	23.20	23.30	4.85	0.00	6.65	6.65
480	8.34	60.38	20.04	40.33	14.33	16.76	23.23	23.23	23.14	23.20	3.44	2.25	4.53	6.80
510	5.96	57.64	0.00	57.64	14.33	16.76	23.16	23.16	23.07	23.16	2.45	0.00	6.53	6.53
540	8.26	55.06	20.09	34.96	14.33	16.56	23.11	23.11	23.02	23.08	3.71	2.29	3.98	6.29
570	7.02	59.59	0.00	59.59	13.98	16.39	23.05	23.06	22.97	23.06	2.91	0.00	6.56	6.56
600	7.41	55.45	20.29	35.15	14.00	16.31	23.00	23.00	22.91	22.97	3.22	2.26	3.91	6.18
630	10.25	48.93	0.00	48.93	14.26	16.23	22.95	22.96	22.87	22.96	5.20	0.00	5.63	5.63
660	6.89	54.93	19.50	35.44	14.31	16.12	22.91	22.92	22.83	22.89	3.81	2.27	4.12	6.40
690	5.81	54.05	0.00	54.05	14.35	16.11	22.88	22.89	22.80	22.89	3.30	0.00	6.33	6.33
720	4.55	53.42	19.10	34.31	14.27	15.97	22.85	22.86	22.76	22.82	2.69	2.23	4.00	6.25
750	3.04	57.41	0.00	57.41	14.33	16.05	22.81	22.82	22.73	22.82	1.77	0.00	6.76	6.76
780	7.13	57.61	19.00	38.60	13.98	15.98	22.78	22.79	22.69	22.75	3.57	2.16	4.39	6.57
810	5.98	51.31	0.00	51.31	14.03	15.88	22.75	22.76	22.66	22.76	3.22	0.00	5.88	5.88
840	6.50	47.06	19.51	27.55	14.27	15.87	22.72	22.74	22.64	22.70	4.07	2.31	3.26	5.59
870	6.52	54.54	0.00	54.54	14.18	15.72	22.70	22.72	22.62	22.72	4.23	0.00	6.39	6.39
900	3.07	54.16	19.07	35.09	14.13	15.72	22.68	22.69	22.60	22.66	1.93	2.23	4.10	6.35
930	5.46	56.47	0.00	56.47	14.18	15.62	22.66	22.67	22.58	22.67	3.80	0.00	6.65	6.65
960	5.65	58.05	18.94	39.11	13.79	15.48	22.63	22.65	22.55	22.62	3.35	2.14	4.41	6.58
990	9.97	48.82	0.00	48.82	13.83	15.49	22.61	22.63	22.52	22.63	5.99	0.00	5.55	5.55
1020	2.83	58.06	19.60	38.46	13.86	15.58	22.60	22.62	22.52	22.58	1.65	2.24	4.39	6.66
1050	6.36	49.17	0.00	49.17	13.64	15.37	22.57	22.59	22.49	22.59	3.68	0.00	5.50	5.50
1080	4.73	45.67	19.91	25.76	13.88	15.25	22.56	22.58	22.47	22.53	3.47	2.30	2.96	5.28
1110	6.41	52.35	0.00	52.35	13.89	15.37	22.54	22.56	22.46	22.56	4.34	0.00	6.04	6.04
1140	3.13	51.19	19.31	31.88	13.92	15.19	22.52	22.54	22.44	22.50	2.48	2.25	3.70	5.97
1170	2.05	52.00	0.00	52.00	14.08	15.19	22.51	22.53	22.43	22.53	1.85	0.00	6.15	6.15
1200	3.01	51.48	18.83	32.65	13.99	15.14	22.50	22.52	22.42	22.48	2.60	2.21	3.83	6.06
1230	4.12	51.87	0.00	51.87	14.15	15.21	22.49	22.51	22.41	22.51	3.91	0.00	6.21	6.21
1260	5.44	53.33	18.63	34.70	13.94	15.15	22.48	22.50	22.40	22.46	4.48	2.18	4.06	6.26
1290	5.75	48.47	0.00	48.47	13.92	14.94	22.47	22.49	22.39	22.49	5.64	0.00	5.65	5.65
1320	3.72	51.19	19.10	32.09	14.01	15.05	22.47	22.49	22.39	22.45	3.58	2.26	3.78	6.07
1350	4.81	50.34	0.00	50.34	13.93	14.93	22.46	22.48	22.37	22.48	4.79	0.00	5.89	5.89
1380	3.78	47.40	19.02	28.38	14.03	14.94	22.44	22.46	22.36	22.42	4.15	2.26	3.37	5.65
1410	3.20	49.78	0.00	49.78	13.99	14.81	22.44	22.46	22.36	22.46	3.92	0.00	5.88	5.88

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Aliihsan KOCA

Doğum Tarihi ve Yeri : 01.10.1986 - Bolvadin

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta :ihsankoca@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Müh.	İstanbul Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Sayısal	MHG Öğretmen Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012 – Devam Ediyor.	Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş.	Isı-Akışkan Enerji Araş. Bölüm Sorumlusu
2010 - 2012	Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş.	AR-GE Uzmanı
2009 - 2010	Dizayn Teknoloji (Mir Holding)	AR-GE Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. **Koca, A.,** Gemici, Z., Topacoglu, Y., Cetin, G., Acet, R. ve Kanbur, B., (2014). "Experimental İnvestigation of Heat Transfer Coefficients Between Hydronic Radiant Heated Wall and Room", Energy and Buildings, 82: 211–221.

2. Gemici, Z., Eğrican, N. ve **Koca, A.,** (2010), "Theoretical and Experimental Examination of Air Conditioner Heat Exchangers", International Communications in Heat and Mass Transfer, 37:681-686.

3. **Koca, A.,** Gemici, Z., Eskin, N., (2014). "Evaporative Heat Transfer and Pressure Drop of R410A and R32 in Smooth Horizontal Tube", Yildiz Technical University Sigma Journal.

4. **Koca, A.,** Kanbur, B., Pinarbasi, A., (2014). "Investigating of The Natural Ventilation Effect of Wind Loads for High-Rise Buildings Using CFD", Journal of Engineering and Machine.

Bildiri

1. **Koca, A.,** Atayılmaz, S., Agra, O., (2014). "Free Convection Film Condensation of Steam in The Presence of Non-Condensing Gases Using CFD Based Approach in a Room Filled With Humid Air", Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Conference, IMECE2014, November 14-20, Montreal, Canada.

2. **Koca, A.,** Gemici, Z., Kaya, K., Ozcan, O., Memis, R., (2012). "Experimental Investigation on Open-Channel Flow Resistance of Corrugated Circular Pipes", III. Advanced Technologies Workshop, May 12, İstanbul.

3. **Koca, A.,** Gemici, Z., Kaya, K., Ozcan, O., Memis, R., (2012). "Numerical Investigation on Open-Channel Flow Resistance of Corrugated Circular Pipes", III. Advanced Technologies Workshop, May 12, İstanbul.

4. **Koca, A.,** Gemici, Z., (2011). "Thermal Performance and Comfort Analysis of

Novel Low Exergy Radiant Heating Cooling Panels", 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies, September 11-13, Rize.

5. Kanbur, B., **Koca, A.,** Pinarbasi, A., (2013). "CFD Simulation of Static Effects of Wind on Building Facades", 11th national sanitary engineering congress, April, İstanbul.

6. **Koca, A.,** Gemici, Z., (2013). "Thermal Comfort Analysis of Radiant Heating Cooling Systems", 11th national sanitary engineering congress, April, İstanbul.

7. Kanbur, B., **Koca, A.,** Gemici, Z., (2013). "Heat Transfer Rate Comparisons of Different Radiant Heating & Cooling Configurations", 11th national sanitary engineering congress, April, İstanbul.

8. **Koca, A.,** Gemici, Z., Bedir, K., (2013). "Thermal Comfort Analysis of Novel Low Exergy Radiant Heating Cooling System and Energy Saving Potential Comparing to Conventional Systems", The Sixth International Exergy, Energy and Environment Symposium, June, İstanbul.

9. Topacoglu, Y., **Koca, A.,** Boke, E., (2013). "Evaulating The Effectiveness of Natural Ventilating in Greenhouses Using CFD", 19th national heat transfer congress, September, Turkey.

10. Kanbur, B., **Koca, A.,** Gemici, Z., (2013). "Determination of Optimum İnsulation Thickness The Buildings Using Radiant Wall Heating", 19th national heat transfer congress, September, Turkey.

11. Kanbur, B., **Koca, A.,** Gemici, Z., Atayılmaz, O., Teke, İ., (2013). "Numerical İnvestigation of Heat Outputs of Radiant Heating Panels", 19th national heat transfer congress, September, Turkey.

12. **Koca, A.,** Topaçoğlu, Y., Gemici, Z., (2013). "Design of Novel High Performance Aerator for Hydroponic Cultures and its Numerical and Experimental Performance Analysis", Ansys-Anova Costumer Congress, October, Ankara.

13. Kanbur, B., **Koca, A.,** Gemici, Z., Atayılmaz, O., Teke, İ., (2013). "A Study on The Optimum Insulation Thickness and Energy Savings of a Radiant Heating Panel Mounted Wall for Various Parameters", CLIMAMED VII. Mediterranean Congress of Climatization, 3-4 October, İstanbul.

14. Kanbur, B., Atayılmaz, O., Demir, H., **Koca, A.,** Gemici, Z., (2013). "Investigating The Thermal Conductivity of Different Concrete and Reinforced Concrete Models with Numerical and Experimental Methods", 4th European Conference of Mechanical Engineering (ECME13), October 29-31, France.

15. Vazifehkhah, S., Kaya, K., **Koca, A.,** Gemici, Z., (2014). "Constructing a Correlation Between Corrugated Hdpe Pipe Roughness and Geometric Parameters Using CFD Methods", 3rd IAHR Europe Congress, April 14-16, Faculty of Engineering of the University of Porto, Portugal.

Kitap

1. **Koca, A.,** Gemici, Z., Bedir, K., (2014). "Thermal comfort analysis of novel low exergy radiant heating cooling system and energy saving potential comparing to conventional systems", Book Chapter, Progress in exergy, energy and environment, Chapter 38: 435-445.

Proje

Liderliğini yaptığım veya araştırmacı olarak yer aldığım projelerin bazıları aşağıdadır:

1. CityFied : RepliCable and InnovaTive Future Efficient Districts and cities: AB 7. Çerçeve Projesi – Proje No: 609129

2. R2CITIES : Renovation of Residential Urban Spaces: Towards nearly Zero Energy Cities: AB 7. Çerçeve Projesi – Proje No: 314473

3. Radyant yüzeyden ısıtma-soğutma sistemlerinin geliştirilmesi: TUBİTAK – TEYDEB – 1501 – Proje No: 3100577

4. Toprak ve Donatılı Bina Temeli Kaynaklı Isı Pompalarında Kaynak Isı Değiştiricisi Performansının İyileştirilmesi İçin Yeni Bir Uygulama Yönteminin Geliştirilmesi: SAN-TEZ Projesi – Proje No: 0472.STZ.2013-2

5. Yüzeyden ısıtma soğutma sistemli modüler hibrit duvar yapısının geliştirilmesi : SAN-TEZ Projesi - Proje No: 0462.STZ.2013-2

6. Radyant soğutma sistemlerinde nemin pasif ve ekonomik bir şekilde kontrol edilmesi ve pencerenin termal konfor üzerindeki olumsuz etkisini ortadan kaldiracak yenilikçi çözümün sayisal ve deneysel olarak incelenmesi – ARDEB 3001 Projesi – Proje No: 213M199

7. Seralardaki iklim şartlarinin sayisal yöntemler kullanilarak modellenmesi – ARDEB 1002 Projesi – Proje No: 212M027

ÖDÜLLERİ

1. Doktora tezim, TUBITAK BİDEB 2211-D sanayiye yönelik doktora tezleri ödül programı kapsamında ödüllendirilen beş doktora tezinden birisi olmuştur.

2. TUBITAK AB Ofisi tarafından, AB 7 Ç.P. başarı destek ödülü aldım.