

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Dikey Levha ve Dikey Silindirde Eşzamanlı Isı ve Kütle Geçişini Konu Alan Çalışmalar	3
2.2 Yatay Boruda Isı Geçişini Konu Alan Çalışmalar	18
2.3 Yatay Boruda Eşzamanlı Isı ve Kütle Geçişini Konu Alan Çalışmalar	33
3. TEMEL KAVRAMLAR VE TEORİK İNCELEME	40
3.1 Doğal Taşınım ve Kaldırma Kuvveti Etkili Akışlar	40
3.1.1 Kaldırma Kuvveti	41
3.1.2 Isı ve kütle taşınım katsayıları	44
3.2 İdeal Gaz Karışımları	45
3.3 Bağıl nem	46
3.4 Kritik Kaplama (Isı yalıtım) Kalınlığı	47
3.5 Kullanılan Hesap Yöntemi	49
4. SAYISAL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ	55
4.1 Giriş	55
4.2 Sayısal Çözümde Kullanılacak Hesaplama Yöntemleri	55
4.2.1 Sayısal Çözüm Yöntemleri	55
4.2.1.1 Ayrı Çözüm Yöntemi (Segregated Solver)	55
4.2.1.2 Bir Arada Çözüm Yöntemi (Coupled Solver)	55
4.2.2 Lineerleştirme Yöntemleri	56
4.2.2.1 Örtülü Yöntem (Implicit Formulation)	56
4.2.2.2 Açık Yöntem (Explicit Formulation)	56
4.2.3 İkinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi	57
4.2.4 Basınç- Hız Çifti İçin Simple Metodu	57
4.2.5 Artık Değer (Residual)	58
4.2.6 Yakınsama ve Kararlılık	58
4.2.7 Problemin Çözümü İçin Oluşturulan Algoritma	59
4.3 Modelin Çizimi ve Çözüm Ağının Oluşturulması	60

4.4	Sayısal Çalışma Sonuçları	62
4.5	Serbest Taşınımında Kritik Kaplama (Isı Yalıtım) Kalınlığı.....	69
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	74
5.1	Deney Tesisatı	74
5.1.1	Şartlandırılmış Oda ve Deney Tesisatı Kabini	76
5.1.2	Su Besleme ve Toplama Ünitesi.....	76
5.1.2.1	Su Kolektörü-Su Deposu-Ana Besleme Borusu.....	76
5.1.2.2	Su Besleme Boruları	77
5.1.2.3	Su Isıtıcısı ve Termostat	77
5.1.2.4	Su Toplama Kapları ve Kılcal Su Toplama Boruları.....	77
5.1.3	Yatay Test Borusu	78
5.1.4	Ölçümler İçin Kullanılan Diğer Sistem ve Cihazlar.....	79
5.1.4.1	Veri Toplama Ünitesi	79
5.1.4.2	Termoelemanlar	79
5.1.5	Nem Algılayıcı.....	81
5.1.6	Dijital Terazı	81
5.1.7	Güç Kaynakları.....	81
5.1.8	Hassas Güç Ölçer.....	82
5.2	DeneySEL Süreç	82
5.2.1	Termoelemanların Kalibrasyonu	83
5.2.2	Isı Geçişinin İncelendiği Deneyler	84
5.2.3	Isı ve Kütle Geçişinin İncelendiği Buharlaşmalı Deneyler	87
6.	DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ	91
6.1	Birim Boyda Isı Geçişindeki Değişim İle İlgili DeneySEL Bulgular	91
6.2	Isı Geçişinin İncelendiği DeneySEL Sonuçlar.....	94
6.3	Eş Zamanlı Isı ve Kütle Geçişinin İncelendiği DeneySEL Sonuçlar.....	97
7.	DENEYSEL HATALAR ve HATA ANALİZİ YÖNTEMLERİ	102
7.1	Belirsizlik Analizi Yöntemi.....	103
7.2	Belirsizliklerin Tespiti	103
7.2.1	Isı geçişinin incelendiği deneyler için belirsizliklerin tespiti	103
7.2.2	Eşzamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği deneyler için belirsizliklerin tespiti	106
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	111
8.1	Sonuçlar	111
8.2	Öneriler	115
	KAYNAKLAR.....	117
	İNTERNET KAYNAKLARI	121
	ÖZGEÇMİŞ.....	122

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
C	Derişiklik
D	Silindir çapı
D_{AB}	İkili kütle yayılım katsayısı
F	Kaldırma kuvveti
Gr	Grashof sayısı
Gr^*	Geliştirilmiş Grashof sayısı
Ge	Gebhart sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
h	Ortalama ısı taşınım katsayısı
h_m	Ortalama kütle taşınım katsayısı
h_x	Yerel ısı taşınım katsayısı
$h_{m,x}$	Yerel kütle taşınım katsayısı
$h_{Sayısal}$	Sayısal hesaplanan ısı taşınım katsayısı
h_{Deney}	Deneysel belirlenen ısı taşınım katsayısı
h_{fg}	Buharlaşma gizli ısı J/kg
k	Isı iletim katsayısı
M	Mol kütlesi
Nu	Nusselt sayısı
$Nu_{Sayısal}$	Sayısal hesaplanan Nu sayısı
Nu_{Deney}	Deneysel belirlenen Nu 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_B	Buharlaşma kaynaklı ısı geçişi
Q_T	Taşınım kaynaklı ısı geçişi
Q_I	Işınım kaynaklı ısı geçişi
$Q_{Sayısal}$	Sayısal hesaplanan ısı geçişi
Q_{Deney}	Deneysel belirlenen ısı geçişi
Ra	Rayleigh sayısı
Ra^1	Kütle geçişi için Rayleigh sayısı
Ra_D^*	Geliştirilmiş Rayleigh sayısı
R_u	Üniversal gaz sabiti
r	Yarıçap
Sc	Schmidt sayısı
Sh	Sherwood sayısı
T	Sıcaklık
t	Zaman
ν	Kinematik viskozite

Yunan Harfleri

α	Isı yayılma katsayısı
β	Sıcaklık farkına bağlı hacimsel ısı genleşme katsayısı
β^*	Derişiklik farkına bağlı hacimsel genleşme katsayısı
δ	Hidrokinamik 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

Alt indisler

v	Su buharı
∞	Ortam
0	Yüzey
a	Kuru hava
f	Film tabakası
kr	Kritik değer
x	Dikey levha için yerel değer
x,t	Dikey levha için sıcaklık farkına bağlı yerel değer
x,c	Dikey levha için derişiklik farkına bağlı yerel değer
L	Dikey levha için ortalama değer
LC	Dikey levha için derişiklik farkına bağlı ortalama değer
D,w	Yatay boru için yerel değer
DC,w	Yatay boru için derişiklik farkına bağlı yerel değer
D	Yatay boru için ortalama değer
DC	Yatay boru için derişiklik farkına bağlı ortalama değer

KISALTMA LİSTESİ

ARGE	Araştırma ve Geliştirme
CECED	European Committee of Domestic Equipment Manufacturers
CEVRESICORT	Kaplamasız Boru Yüzeyi Orta Noktasındaki Çevresel Ortalama Sıcaklığı
CEVRESICORTİÇ	Kaplamalı Boru İç Yüzeyi Orta Noktasındaki Çevresel Ortalama Sıcaklığı
CEVRESICORTİÇ	Kaplamalı Boru Dış Yüzeyi Orta Noktasındaki Çevresel Ortalama Sıcaklığı
CFD	Computational Fluid Dynamics
DC	Direct Current
LDA	Laser Doppler Anemometer
NEM	Test Borusunun Bulunduğu Ortamın Bağıl Nem Değeri
ORTT9	Boru İç Yüzey Ortalama Sıcaklığı
ORT(T9)	Kaplama Yüzeyi Ortalama Sıcaklığı
ORTAM2ORT	Test Borusunun Bulunduğu Ortamın Ortalama Sıcaklığı
PID	Proportional Integral Derivative
PISO	Pressure Implicit Splitting of Operators
SUSIC	Besleme Suyu Sıcaklığı
SIMPLE	Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations Consistent
URF	Under Relaxation Factor

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Interferogramlar (Adams ve McFadden, 1966).....	7
Şekil 2.2 $N_{Gr,x}^*$ ve $\frac{X_M}{X_T}$ ' in sıcaklık farkına bağlı değişimi (AdamsveMcFadden,1966)	8
Şekil 2.3 Laminer rejimde sabit sıcaklıktaki dikey levha için oluşturulan korelasyonlar (Churchill ve Chu, 1975)	13
Şekil 2.4 Laminer akışlı ve sabit sıcaklıktaki dikey levha için oluşturulan korelasyonların önceki deneysel verilerle karşılaştırması (Churchill ve Chu, 1975).....	14
Şekil 2.5 Serbest taşınım şartlarında, ısıtılan yatay silindirik yüzeyde ve üzerinde oluşan akışın resmi (Pera ve Gebhart, 1971).....	24
Şekil 2.6 Yatay silindirde $Pr=1$ için yerel ısı taşınımının çevresel değişimi	25
Şekil 2.7 Ra sayısının yerel ısı geçiş katsayısına etkisi	26
Şekil 2.8 $Ra=10^5$ için deneysel ve teorik hesaplanan ısı geçiş katsayılarının karşılaştırılması.....	27
Şekil 2.9 Sabit sıcaklıktaki yatay ve eliptik silindirdeki ısı geçişi, $Pr=0,72$ (Lin ve Chao, 1974)	30
Şekil 2.10 Yerel Sh sayılarının açısal değişimi (Hasan ve Mujumdar 1987).....	36
Şekil 2.11 Yerel Nu sayılarının açısal değişimi (Hasan ve Mujumdar 1987)	37
Şekil 3.1 Hareketsiz bir dış ortamdaki yoğunluk seviyeleri ve kaldırma kuvveti.....	42
Şekil 3.2 Kaplamalı bir boru ve elektrik benzeşim devresi	47
Şekil 3.3 Kaplama yarıçapı ile birim zamandaki ısı transferi miktarındaki değişim	48
Şekil 4.1 Sayısal çözümde kullanılan çözüm ağı	61
Şekil 4.2 Sayısal çözümde kullanılan çözüm ağının yatay silindir yüzeyindeki yakın görünüşü	62
Şekil 4.3 Deneysel değerler ve sayısal çözüm sonuçlarının $Nu-Ra$ koordinatlarında gösterimi... ..	64
Şekil 4.4 Deneysel ve sayısal Nu sayılarının karşılaştırması	65
Şekil 4.5 Sayısal çözümde kutu içinde ve silindir yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı	66
Şekil 4.6 Isıtılan yatay borunun kutu içinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı	66
Şekil 4.7 Yatay boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve oluşan sınır tabaka ayrılması	67
Şekil 4.8 Yakınsaklık kriteri kabul edilebilir hata 'Residual' değerlerinin iterasyonla değişimi.. ..	67
Şekil 4.9 Oluşturulan sayısal korelasyon ve önceki araştırmacılar tarafından deneysel çalışmalar sonucunda önerilen genel kabul görmüş korelasyonlar.....	68
Şekil 4.10 Oluşturulan sayısal korelasyon ve Merkin'in sonlu farklar yöntemini kullanarak önerdiği korelasyon.....	69
Şekil 4.11 Yüzeyi kaplamış boru kesiti	70
Şekil 4.12 Isı taşınım katsayısının sabit olduğu veya değişiminin dikkate alındığı durumlar için, ısı geçişinin kaplama yarıçapına göre değişimi	73
Şekil 5.1 Deney Tesisatının Şematik Resmi.....	74
Şekil 5.2 Deney tesisatının şartlandırılmış oda içindeki görünümü	75
Şekil 5.3 Deney tesisatının veri toplama durumdaki görünümü	75
Şekil 5.4 Boru yüzeylerine su emici malzeme sarım şekli ve sarılmış durumu	78
Şekil 5.5 Boruların kaplamalı ve kaplamasız durumlarında termoelemanların yüzeye bağlantısı	78
Şekil 5.6 Kaplamasız durumda 1. boru için termoelemanların yerleşimi	80
Şekil 5.7 Kaplamalı durumda 1. boru için termoelemanların yerleşimi.....	81
Şekil 5.8 D.C güç kaynakları ve hassas güç ölçer	82
Şekil 5.9 Kalibrasyon su banyosu, referans termometre ve probunun yerleşimi	83
Şekil 5.10 Termoeleman (TE 1) için kalibrasyon eğrisi ve hata fonksiyonu	84
Şekil 5.11 Deneyde (249) ölçülen sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin zamana göre değişimi.. ..	86
Şekil 5.12 Deneyde (249) ölçülen dış ortam sıcaklığının zamana göre değişimi.....	86
Şekil 5.13 Deneyde (249) ölçülen bakır boru ortalama dış yüzey sıcaklığının ve kaplama malzemesi dış yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi	87
Şekil 5.14 Deneyde (275) ölçülen sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin zamana göre değişimi.. ..	88

Şekil 5.15 Deneyde (275) ölçülen dış ortam sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin zamana göre değişimi.....	89
Şekil 5.16 Deneyde (275) ölçülen ıslak yüzey ortalama sıcaklık, orta noktadaki çevresel ortalama sıcaklık ve besleme suyu sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi...	89
Şekil 6.1 $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de belirtilen T_0 aralığında $D = 4,8\text{mm}$ çapındaki borunun, farklı durumları için deneysel belirlenen ısı geçiş miktarları.....	92
Şekil 6.2 $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de, belirtilen T_0 aralığında $D = 4,8\text{mm}$ çapındaki borunun, üç farklı bağıl nem şartında deneysel belirlenen ısı geçiş miktarları.....	92
Şekil 6.3. $T_{\infty} = 10^{\circ}\text{C}$ ve $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de belirtilen T_0 aralığında $D = 4,8\text{mm}$ çapındaki borunun, farklı durumları için belirlenen ısı geçiş miktarları.....	93
Şekil 6.4 $T_{\infty} = 10^{\circ}\text{C}$ ve $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de, belirtilen T_0 aralığında $D = 4,8\text{mm}$ çapındaki borunun, farklı bağıl nem şartında deneysel belirlenen ısı geçiş miktarları.....	93
Şekil 6.5. $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de belirtilen T_0 aralığında, $D = 4,8\text{mm}$ ve $D = 9,45\text{mm}$ çapındaki borunun, farklı durumları için deneysel belirlenen ısı geçiş miktarları.....	94
Şekil 6.6 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan sadece ısı geçişi olduğunda deneysel bulgular ve oluşturulan korelasyon eğrisi.....	94
Şekil 6.7 Oluşturulan yeni korelasyon ile önceki çalışmaların korelasyonları.....	95
Şekil. 6.8 Fand'ın korelasyonuna göre oluşturulan yeni $Nu=f(Ra)$ korelasyonu.....	96
Şekil 6.9 Churchill'in korelasyonuna göre oluşturulan yeni $Nu=f(Ra)$ korelasyonu.....	96
Şekil 6.10 Kutateladze korelasyonuna göre oluşturulan yeni $Nu=f(Ra)$ korelasyonu.....	97
Şekil 6.11 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için deneysel değerler ve kütle geçişi için oluşturulan korelasyon eğrisi.....	97
Şekil 6.12 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için deneysel değerler ve ısı geçişi için oluşturulan korelasyon eğrisi.....	98
Şekil 6.13 Deneysel Sh sonuçları ile Hasan ve Mujumdar (1985) tarafından sayısal korelasyonla hesaplanan Sh sayılarının karşılaştırması.....	99
Şekil 6.14 Deneysel Nu sonuçları ile Hasan ve Mujumdar (1985) tarafından sayısal korelasyonla hesaplanan Nu sayılarının karşılaştırması.....	100
Şekil 6.15 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu halde kütle geçişi için $Sh_D=f(Gr_{DC})$ deneysel korelasyonu ile Hasan ve Mujumdar (1985)'in önerdiği korelasyon.....	100
Şekil 6.16 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu halde ısı geçişi için $Nu_D=f(Gr_D)$ deneysel korelasyonu ile Hasan ve Mujumdar (1985)'in önerdiği korelasyon.....	101
Şekil 7.1 $D = 4,8\text{ mm}$ çapındaki borunun, kaplamalı ve kaplamasız durumları için yüzey sıcaklığına (T_0) bağlı olarak ölçülen ısılar. ($T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$).....	111
Şekil 7.2 $D = 4,8\text{ mm}$ çapındaki borunun , kaplamalı, kaplamasız ve kaplamalı buharlaşmalı durumları için yüzey sıcaklığına (T_0) bağlı olarak ölçülen ısılar. ($T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$)...	112
Şekil 7.3 Deneysel noktalar, oluşturulan yeni korelasyonve önceki çalışmaların korelasyonları	113
Şekil 7.4 Oluşturulan sayısal korelasyon ve Merkin'in sonlu farklar yöntemini kullanarak önerdiği korelasyon.....	114
Şekil 7.5 Isı taşınım katsayısının sabit olduğu veya değişiminin dikkate alındığı durumlar için, ısı geçişinin kaplama yarıçapına göre değişimi.....	115

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Yüzey gerilimi, Sh ve Nu sayılarının; Gr, Pr, Sc sayıları ve kütle kuvveti cinsinden ifadeleri	12
Çizelge 2.2 Boyutsuz sayıların değerleri	17
Çizelge 2.3 Doğal taşınım için bir terimli yaklaşımla Blasius serilerinin karşılaştırması.....	19
Çizelge 2.4 Serbest taşınım şartlarında yatay silindir için önerilen korelasyon.....	23
Çizelge 2.5 Farklı Pr sayılarında ve azimut açılarında yerel Nu sayısı ve Grashof sayısı arasındaki oranın $Nu / Gr_w^{1/4}$ değişimi	25
Çizelge 3.1 Hesap tablosu	53
Çizelge 4.1 Deneysel ve sayısal ısı geçişinin karşılaştırılması.....	63
Çizelge 4.2 Deneysel ve sayısal Nu sayılarının karşılaştırılması	63
Çizelge 4.3 Deneysel ve sayısal ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması.....	64
Çizelge 4.4 Doğal taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi üzerine daha önceden çalışan araştırmacıların elde ettiği sonuçlarının bu çalışmada kullanılan sayısal çözüm ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.....	68
Çizelge 4.5 Hesaplamalarda kullanılan sayısal değerler	70
Çizelge 4.6 Isı taşınım katsayısı sabit alınarak hesaplanan değerlerin kaplama yarıçapına bağlı değişimleri.....	71
Çizelge 4.7 Isı taşınım katsayısının değişimi dikkate alınarak hesaplanan değerlerin kaplama yarıçapına bağlı değişimleri	72
Çizelge 5.1 Termoeleman Listesi	80
Çizelge 5.2 Kalibrasyonu için ölçülen sıcaklıklar (TE 1)	83
Çizelge 5.3 Isı geçişinin incelendiği deneylerdeki yüzey ve boru sıcaklıkları.....	85
Çizelge 5.4 Isı ve kütle geçişinin incelendiği deneylerdeki sıcaklık ve bağıl nem değerleri ...	87
Çizelge 7.1 Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu sonucunda elde edilen belirsizlikler ve deneylerde ölçülen bağımsız değişkenlerin ısı geçişinin incelendiği örnek bir deneydeki değerleri	105
Çizelge 7.2 Isı geçişinin incelendiği deneyde hesaplanan parametrelerin nominal değerleri ve belirsizlikleri	106
Çizelge 7.3 Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu sonucunda elde edilen belirsizlikler ve deneylerde ölçülen bağımsız değişkenlerin, eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği örnek bir deneydeki değerleri.....	109
Çizelge 7.4 Eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği deneyde hesaplanan parametrelerin nominal değerleri ve belirsizlikleri	110

ÖNSÖZ

Herhangi bir soğutma sisteminde, çekilen ısı miktarı sabit kalacak şekilde, yoğunlaşma sıcaklığının düşürülmesi sonucu, gerekli olan kompresör işi azalacaktır. Bu sayede daha az enerji tüketen veya kompakt kondensere sahip soğutucuların üretimi gerçekleştirilebilecektir. Belirtilen amaca yönelik temel bir çalışma olması düşüncesiyle, bu doktora tezi kapsamında yatay borudan ısı geçişi teorik ve deneysel, eş zamanlı ısı ve kütle geçişi ise deneysel olarak incelenmiştir.

Bu doktora tez çalışması olanağını sağlayan, yorumları ve yapıcı eleştirileri ile çalışmaya yön veren, teorik ve deneysel her sorunumla yakından ilgilenen,engin bilgi ve tecrübesini paylaşarak çalışmamı yöneten, değerli hocam Sayın Prof. Dr İsmail TEKE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın farklı aşamalarında verdikleri bilgi ve önerileri ile çalışmama destek olan hocalarım Sayın Prof.Dr. Hasan HEPERKAN'a ve Sayın Prof.Dr. Feridun ÖZGÜÇ'e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının deneysel kısmının, Arçelik A.Ş.'nin Tuzla Tesislerinde bulunan AR-GE Merkezinde yapılmasını sağlayan, AR-GE Yöneticisi Sayın Fatih ÖZKADI'ya ve deneysel çalışmamda karşılaştığım sorunlarla yakından ilgilenen ve yardımlarını esirgemeyen Termodinamik Ailesi Lideri Sayın Yalçın GÜLDALI'ya teşekkür ederim. Deney tesiaştının kurulmasından devreye alınmasına kadar her aşamada büyük katkıları bulunan AR-GE Uzman Teknisyenleri Sayın Fikri ÇAVUŞOĞLU'na, Sayın Sabahattin HOCAOĞLU'na ve ismini sayamadığım tüm AR-GE çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Her türlü problemimde yanımda olan ve teknik desteklerini esirgemeyen tüm mesai arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Ayrıca, maddi manevi desteklerini hiçbir zaman üzerimden eksik etmeden, büyük özveride bulunarak beni yetiştiren ve bu günlere gelmemi sağlayan, aileme en içten şükranlarımı sunarım

Ş.Özgür ATAYILMAZ

Kasım 2006

ÖZET

Bu doktora tez çalışmasında, serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi deneysel ve sayısal olarak, aynı borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişi ise deneysel olarak incelenmiştir.

Tez çalışması sekiz ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmaya başlama nedenleri ve ulaşılmak istenen sonuçlar genel olarak açıklanarak konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümde konu ile ilgili önceki araştırmacıların yayınları değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde tez konusu kapsamındaki temel kavramlara değinilerek kullanılan hesap yöntemi açıklanmıştır. Hava su buharı karışımının ideal bir gaz karışımı olduğu ve boru etrafındaki akışı oluşturan potansiyelin sıcaklık ve derişikliğe bağılı yoğunluk farkından meydana geldiği esas alınarak bir hesap tablosu oluşturulmuştur.

Dördüncü bölümdeki sayısal çalışmada; kütle geçişinin bulunmadığı serbest taşınım şartlarında ısı geçişi için çözüm yapılmıştır. Sayısal olarak elde edilen ısı geçiş miktarları, Nusselt sayıları ve yüzeydeki ısı taşınım katsayıları deneylerden bulunanlarla karşılaştırılmış ve ortalama sapma değerleri hesaplanmıştır. Sayısal Nu sayıları kullanılarak $Nu=c.Ra^n$ formunda korelasyon oluşturulmuş ve önceki araştırmacılar tarafından önerilen korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Sayısal çalışmalar için Fluent 6.0 CFD programı kullanılmıştır. Ayrıca bu bölümde serbest taşınımında kritik kaplama (ısı yalıtım) kalınlığı incelenmiş ve kritik çapın, ısı taşınım katsayısının değışiminin dikkate alınarak belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Beşinci bölümde; Arçelik A.Ş'nin Araştırma ve Geliştirme Merkezindeki şartlandırılmış hassas odada gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Deneysel çalışmalar, üç ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda; serbest taşınım şartlarında ve sabit dış ortam sıcaklığında, çapı kritik çaptan küçük olan iki farklı çaptaki yatay boru için verilen elektriksel enerjiler ölçülerek ısı taşınım katsayıları belirlenmiştir. Deneyler farklı dış ortam sıcaklıklarında (10-20-30-40-50 °C) yüzey sıcaklıkları (20-30-40-50-60 °C) değıştirilerek tekrarlanmıştır. İkinci kısımda; boru yüzeyine, boru yalıtım çapı kritik çap değerinin altında kalacak kalınlıkta kaplama yapılarak kaplamasız boru deneylerindeki şartlarda deneyler tekrarlanmış ve elektriksel enerjiler ölçülerek ısı taşınım katsayıları belirlenmiştir. Deneysel çalışmanın üçüncü kısmında; kaplama malzemesi ıslatılarak buharlaşma ile yüzeyde eş zamanlı ısı ve kütle geçişi sağlanmıştır. Isı ve kütle geçişinin belirlenmesi için verilen elektrik enerjisi ve buharlaşan su miktarları ölçülerek, ısı ve kütle taşınım katsayıları belirlenmiştir. Ayrıca derişiklik farkının ısı ve kütle taşınımı üzerindeki etkisini analiz edilebilmek için deneyler üç farklı bağıl nem değerinde yapılmıştır. Hazırlanmış olan hesap tablosunda, toplam yoğunluk farkına bağılı tek bir Grashof sayısı tanımlanarak Ra , Ra' değerleri Gr 'a göre hesaplanmıştır. Ayrıca ölçülen elektrik enerjisi ve buharlaşan su miktarları kullanılarak Nu , Sh sayıları deneysel olarak belirlenmiştir.

Altıncı bölümünde yatay borunun her üç durumu için benzer şartlarda ölçülen ısı geçiş miktarları karşılaştırılmış ve değışim grafikleri çizilmiştir. Deneysel çalışmanın birinci ve ikinci kısmında elde edilen deneysel veriler kullanılarak her deney için hesaplanan Nu ve Ra değerleri ile serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi için $7,462.10^1 < Ra < 8,593.10^3$ aralığında $Nu_D=0,898.Ra^{0,201}$ korelasyonu önerilmiştir. Yeni korelasyon, önceki araştırmacılar tarafından tanımlanan genel kabul görmüş korelasyonlar ile karşılaştırıldığında yeni korelasyonun literatürle uyumlu olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmanın üçüncü kısmında elde edilen deneysel veriler kullanılarak Nu , Ra ve Sh , Ra' değerleri ile serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için $7,405.10^2 < Ra' < 1,0269.10^4$ aralığında $Sh_D = 0,751.Ra'^{0,181}$ ve $8,543.10^1 < Ra < 1,1794.10^4$ aralığında $Nu_D = 0,258.Ra^{0,313}$ korelasyonları elde edilmiştir.

Yedinci bölümde belirsizliklerin tespiti yapılmış ve sekizinci bölümde sonuçlar değerlendirilerek öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Yatay silindir, serbest taşınım, ısı geçişi, eş zamanlı ısı ve kütle geçişi

ABSTRACT

In this doctorate thesis, heat transfer from horizontal tubes in free convection has been investigated experimentally and numerically. Simultaneous heat and mass transfer in free convection from the same tube has been investigated experimentally.

Thesis consists of eight chapters. In the first chapter, the aim of the study and the results to be reached have been explained generally. In the second chapter, studies that are related to our subject in the literature have been reviewed. In the third chapter, fundamental concepts which are in scope of this thesis and the calculation method have been explained. According to air-water vapor mixture is an ideal gas mixture and potential, which forms flow around a tube, arises from density difference depending on temperature and concentration, a calculation table have been formed.

In the fourth chapter, a numerical study of heat transfer in free convection has been carried out. Heat transfer rate, Nu number and convective heat transfer coefficient values obtained numerically have been compared to experimental results and average deviation has been calculated. Using numerical Nu values the results correlated in the form of $Nu=c.Ra^n$ and compared to available literature results. The results are in good agreement with the literature. CFD Software Fluent 6.0 was used for numerical studies. In addition, in this chapter a study related to critical coating thickness in free convection has been done and it is concluded that critical diameter should be determined considering variation of convective heat transfer coefficient.

In the fifth chapter, experiments have been performed in a conditioned room in Arçelik A.Ş. (Araştırma ve Geliştirme Merkezi). Experiments consist of three main parts. In the first part; in free convection and constant ambient temperature, electrical energy that has been given to horizontal tubes having two different diameters, which are smaller than the critical diameter, has been measured and heat transfer coefficients have been calculated. Experiments have been repeated for the different ambient temperature values by changing surface temperature values. In the second part, tube was coated with the diameter below critical diameter. Experiments have been repeated with the boundary conditions of the tube without coating and heat transfer coefficients have been calculated. In the third part, by wetting the coating material on the tube surface, simultaneous heat and mass transfer arising from evaporation has been provided. In order to determine the heat and mass transfer, amount of electrical energy and water evaporating from the surface have been measured and heat and mass transfer coefficients have been determined. Besides, in order to analyze the effect of concentration difference on convection, the experiments have been done for three different ambient relative humidity values. Defining a unique Grashof number depending on total density difference, Ra , Ra' values have been calculated with respect to Gr . In addition, using measured values of electrical energy and mass of evaporated water, Nu , Sh numbers have been determined experimentally.

In the sixth chapter, for three conditions of the horizontal tube at similar boundary conditions measured heat transfer rates have been compared and the increase has been indicated in graphics. Using the results obtained in the first and second parts at the experiments, Nu and Ra number values have been calculated. Results have been successfully correlated by the equation $Nu_D=0,898.Ra^{0,201}(7,462.10^1 < Ra < 8,593.10^3)$ for heat transfer in free convection at horizontal tube. The new correlation has been compared to correlations defined by former researchers. It has seen that the new correlation is in good agreement with the literature. Using the results obtained in the third part of the experiments, Nu , Ra and Sh , Ra' number values have been calculated.

Results have been correlated by the equation $Sh_D = 0,751.Ra^{0.181}$ ($7,405.10^2 < Ra < 1,0269.10^4$) and $Nu_D = 0,258.Ra^{0.313}$ ($8,543.10^1 < Ra < 1,1794.10^4$) for simultaneously heat and mass transfer in free convection at horizontal tube.

In the seventh chapter uncertainty analysis has been done and in the eight chapter conclusions and advices has been presented.

Key words: Horizontal cylinder, free convection, heat transfer, simultaneously heat and mass transfer

1. GİRİŞ

Dünyadaki artan enerji ihtiyacı ve mevcut fosil yakıt rezervlerinin azalması, araştırmacıların enerji ekonomisi ile ilgili çalışmalara yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Doktora tez çalışmasındaki konuyla ilgili olarak CECED'in domestik buzdolabı üreticileri için belirlemiş olduğu enerji indeksi değerini her geçen yıl düşürmesi de araştırmacıları enerji ekonomisiyle ilgili çalışmalara yönlendiren sebeplere örnektir. 2002 yılında 64.99 olarak belirlenen bu değerin 2008 yılında 55'e düşürülmesine karar verilmiştir. Dünyada yoğun olarak kullanılmakta olan soğutucuların, performanslarını yükseltme fikrinden yola çıkarak, bu çalışmanın buharlaşmalı kondensere temel teşkil edecek bir çalışma olması amaçlanmıştır.

Soğutma sistemlerinde, çekilen ısı miktarı sabit kalacak şekilde kompresör işini azaltarak çevrimin performansını artırmak veya kondenser yüzey alanını küçülterek üretim maliyetini azaltmak mümkündür. Soğutma sistemlerinde yoğuşma sıcaklığının düşürülmesi sonucu gerekli olan kompresör işi azalacaktır. Bu sayede daha az enerji tüketen soğutucuların üretimi gerçekleştirilebilecektir. Ayrıca teknolojik gelişmeler karşısında ısıtma ve soğutma sistemlerinin de küçültülmesi beklenen bir gereklilik olmuştur. Elde edilen bu avantajın, kondenser yüzey alanını küçültmeye yönelik kullanılması ile belirtilen amaca ulaşılacağı gibi aynı zamanda üretim maliyetini düşürmekte mümkün olacaktır. Belirtilen her iki iyileştirmenin gerçekleştirilebilmesi için kondenser sıcaklığının düşürülmesi amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle boru yüzeylerine su emici bir malzeme sarılması ve bu sayede, yüzey sıcaklığının düşürülmesi öngörülmüştür.

Soğutma sistemlerinde kullanılan kondenser boruları genelde küçük çaplıdır. Ev tipi soğutucularda kullanılan boruların dış çapı 4.8 mm'dir. Kritik çapın altındaki çapa sahip borularda kritik çap değerine kadar kaplama yapılması durumunda ısı geçişi artar. Yüzeye kaplanacak malzemenin aynı zamanda su emici özellikte olması sayesinde, oluşturulan buharlaşmalı kondenserde buharlaşma yüzeyi arttığından ısı geçişi ikinci defa artar. Ayrıca bu durumda ilkine göre ek olarak kütle geçişi de söz konusudur.

Bu çalışma kapsamında, üst üste dizilmiş çoklu yatay borulardan oluşan açık kondensere ve buharlaşmalı kondensere temel teşkil edeceği düşünüldükçe, yatay borudan, doğal taşınım şartlarında ısı geçişi daha sonra da eş zamanlı ısı ve kütle geçişi analizleri yapılmıştır.

Serbest taşınım şartlarında, yatay borudan ısı geçişi teorik ve deneysel olarak birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Fakat önerilen korelasyonların birbirlerinden çok farklı olabildiği görülmüştür.

Serbest taşınım şartlarında, yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişi ile ilgili teorik birkaç çalışma bulunmuş, yapılan deneysel çalışmaların tümünün elektrokimyasal yöntemle yapıldığı görülmüştür. Bu çalışma, serbest taşınım şartlarında, hava içindeki yatay borudan, eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için yapılmış ilk deneysel çalışmadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapılan kaynak araştırması sonucunda, serbest taşınım şartlarında yatay boruda eş zamanlı ısı ve kütle geçişi ile ilgili birkaç teorik çalışma olduğu belirlenmiş, deneysel çalışmaların ise farklı olarak elektrokimyasal yöntemle gerçekleştirildiği görülmüştür. Yatay silindir için yeterli teorik çalışma bulunmadığından, doğal taşınım şartlarında dikey levhadan eş zamanlı ısı ve kütle geçişini konu alan çalışmalar öncelikle incelenmiştir. Bu çalışmalar çoğunlukla teorik olup, yatay silindir için de temel teşkil etmektedir.

Konu ısı geçişi ile de ilgili olduğundan ve $Pr=Sc$ olması halinde ısı geçişi için elde edilen korelasyonların eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için de kullanılabileceğinden, ikinci olarak, doğal taşınım şartlarında yatay borudan sadece ısı geçişini konu alan deneysel ve teorik çalışmalar incelenmiştir.

Üçüncü kısımda ise, konu ile doğrudan ilgili doğal taşınım şartlarında yatay boruda eş zamanlı ısı ve kütle geçişini teorik olarak inceleyen iki adet çalışma ve elektrokimyasal yöntemle gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar incelenmiştir.

Anlatılanlar doğrultusunda, kaynak araştırması üç ana başlık altında gruplandırılmıştır:

- Doğal taşınım şartlarında, dikey levhada eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği çalışmalar
- Doğal taşınım şartlarında, yatay boruda ısı geçişinin incelendiği çalışmalar
- Doğal taşınım şartlarında, yatay boruda eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği çalışmalar

2.1 Dikey Levha ve Dikey Silindirde Eşzamanlı Isı ve Kütle Geçişini Konu Alan Çalışmalar

Yatay boruda yalnız ısı geçişi veya eşzamanlı ısı ve kütle geçişi problemlerinin çözümünde dikey levha geometrisi temel teşkil ettiğinden öncelikle bu konu ile ilgili çalışmalar incelenmiştir.

Somers (1956), tarafından yapılan çalışma, doymamış atmosferik ortamda bulunan sabit sıcaklıktaki dikey ve ıslak bir yüzeyden, birleştirilmiş ısı ve kütle difüzyonuyla ilgilidir. Çok düşük difüzyon kütle derişiklik değerleri kullanmış ve normal diferansiyel denklemleri, hız, sıcaklık ve derişiklik polinomlarını kullanarak, integral yöntemiyle çözmüştür. Bu yöntemle, sıfır duvar hızında kütle geçişi için doğru sonuçlar bulunsa da, çok karışık ve özel problemlere uygulanabilirliği çok zordur.

Mathers v.d (1957), ise benzer şekilde diferansiyel denklemleri çözmek için analog bilgisayar kullanmıştır. Ayrıca momentum denklemindeki atalet terimlerini ihmal etmiştir. Sonuçları yüksek Pr ve Sc sayıları için kesin çözüm vermektedir.

Wilcox (1960), tarafından yapılan çalışmada, dikey levhadan laminar doğal akışta, eş zamanlı ısı ve kütle geçişi problemi teorik olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, Somers ve Matters tarafından yapılmış teorik çalışmaların eksikliklerini kapatarak geliştirmek ve farklı durumlar için tüm Pr ve Sc sayılarında basit çözümler veren bir eşitlik oluşturmaktır. Çalışmada öncelikle sıfır duvar hızında çözümlemeler yapılmış ve sıfır duvar hızının kesinlikle, eşit molar karşı yayılım durumu için geçerli olduğu belirtilmiştir. Momentum, enerji ve kütle denklemleri oluşturulduktan sonra, hız, sıcaklık ve derişiklik sınır tabakaları arasında bir bağıntı varsayılmıştır. $Sc > Pr$ ($Pr = \nu / \alpha$, $Sc = \nu / D_{AB}$; $\alpha > D_{AB} \Rightarrow Sc > Pr$) durumu için sıcaklık profilinin derişikliğe göre daha etkili olduğu düşünülerek $\delta' > \delta''$ ve $\delta = \delta'$ olacağına düşünülmüş ve bu durum 'Isı Geçiş Kontrollü' olarak tanımlanıp çözülmüştür.

Somers ve Mathers'in bulduğu $r \approx \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{1/2}$ kabulü ile ısı ve kütle geçişi için farklı Nu ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$Nu = 0,58 \frac{(Pr)^{1/4} [Gr_L + (Pr/Sc)^{1/2} Gr_{LC}]^{1/4}}{[1 + (0,625/Pr)]^{1/4}} \quad Sh = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{1/2} Nu \quad (2.1)$$

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

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

$$r = \frac{\delta''}{\delta'} = \text{Derişiklik sınır tabaka kalınlığının ısı sınır tabaka kalınlığına oranı}$$

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

$$Nu = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{1/2} Sh \quad Sh = 0,58 \frac{(Sc)^{1/4} [Gr_{LC} + (Sc/Pr)^{1/2} Gr_L]^{1/4}}{[1 + (0,625/Sc)]^{1/4}} \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Sıfır duvar hızında bulunan eşitliklerden sonra Parabolik sıcaklık ve derişiklik profilleri için Somers ve Mathers'ın tanımladığından farklı $\frac{Pr}{Sc} = r^3 \left(\frac{5}{2} - 2r + \frac{1}{2} r^2 \right)$ olarak tanımlanmış ve eşitlikler aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

Isı geçiş kontrollü durum için:

$$Nu = 0,667 \frac{(Pr)^{1/4} [Gr_L + (Pr/Sc)^{1/2} Gr_{LC}]^{1/4}}{[1 + (0,952/Pr)]^{1/4}} \quad Sh = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{1/2} Nu \quad (2.3)$$

Kütle geçiş kontrollü durum için:

$$Nu = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{1/2} Sh \quad Sh = 0,667 \frac{(Sc)^{1/4} [Gr_{LC} + (Sc/Pr)^{1/2} Gr_L]^{1/4}}{[1 + (0,952/Sc)]^{1/4}} \quad (2.4)$$

Sc ve Pr sayıları büyüdükçe ve birbirine yaklaştıkça bu sonuçların Mathers'in sonuçlarına yakınsadığı söylenmiştir. Bu şartlarda (2.3) ve (2.4) Eşitlikleri aşağıdaki hale getirilmiştir.

$$Nu = 0,677(Pr)^{1/4} [Gr_L + (Pr/Sc)^{1/2} Gr_{LC}]^{1/4}, \quad Sh = 0,677(Sc)^{1/4} [Gr_{LC} + (Sc/Pr)^{1/2} Gr_L]^{1/4} \quad (2.5)$$

Bulunan sonuçların sadece ısı geçişinin gerçekleştiği hale göre ($Gr_{LC}=0$) indirgenmiş durumları Ostrach'ın kesin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta Eşitlik (2.1)'in düşük Pr sayıları için, Eşitlik (2.2)'nin yüksek Pr sayıları için, Eşitlik (2.5)'in 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 sonuçlar vereceği tahmin edilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen diğer bir sonuçta "r" ve $\frac{Pr}{Sc}$ arasındaki ilişkidir ve $r = (Pr/Sc)^{1/2}$ eşitliğinin, integral yöntemde de verildiği gibi uygun bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir.

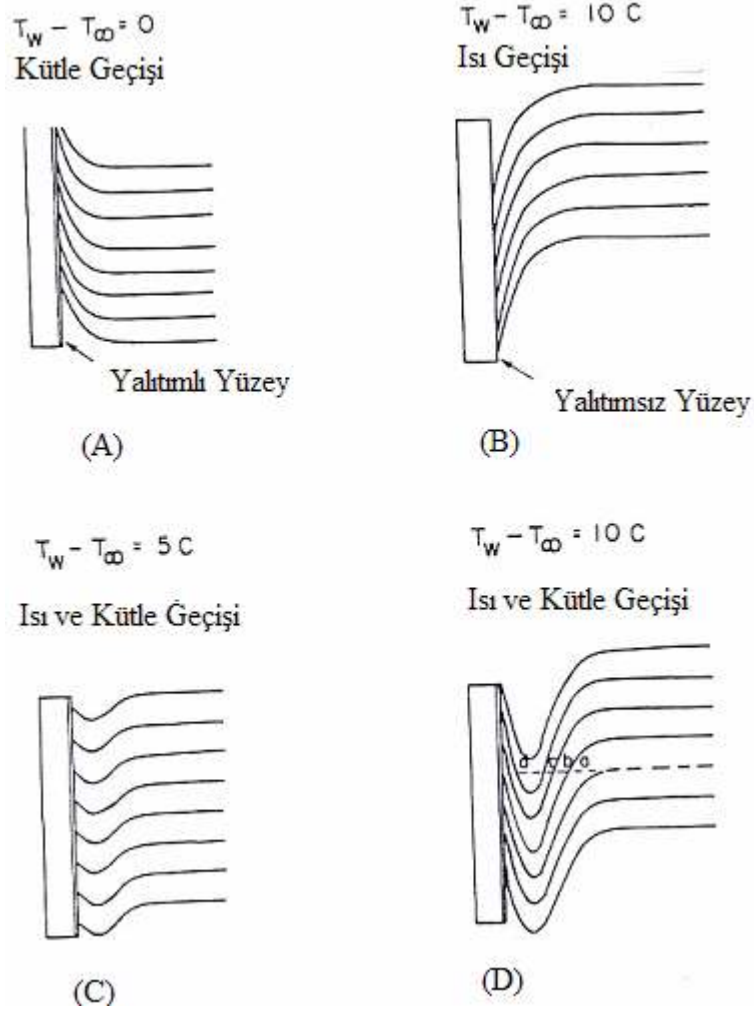
Çalışmada ideal gaz için hacimsel genleşme katsayıları tanımlanmıştır (Eşitlik(2.6),(2.7)).

$$\beta^* = - \frac{1}{\bar{C} - (P/R\bar{T})[1 - (M_1/M_2)]} \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \left\{ 1 - (\bar{C}\bar{T}R/P)[1 - (M_1/M_2)] \right\} \quad (2.7)$$

Ayrıca sıfır duvar hızının dışında, sonlu duvar hızı çözümleri çerçevesinde, belirli bir duvar hızında ve adyabatik duvarda çözümler yapılmıştır. Yaklaşık integral çözümleri için temel denklemler yazılmıştır. Çalışmanın genelinde, eşit molar karşı yayılım halinde, sabit sıcaklıktaki duvarda ve adyabatik duvarlardaki üç farklı durum için detaylı inceleme yapılmış ve sonuçların doğruluğunun, $\frac{Pr}{Sc}$ değerinin 1'e yaklaşmasıyla arttığı görülmüştür.

Adams ve McFadden (1966), yaptıkları çalışmada, Mach-Zehnder interferometresi kullanarak eş zamanlı ısı ve kütle geçişi şartlarında yerel ısı ve kütle geçiş katsayılarını deneysel olarak belirlemişlerdir. Deneysel çalışmada dikey olarak p-diklorobenzen süblimleşmesi incelenmiştir. Kütle kuvvetinin, sınır tabakadaki ağır organik buhara karşı yönde ve yüzeyin ısıtılmasıyla yukarı doğru oluşan ısı kütle kuvvetinden kaynaklandığı açıklanmıştır. Sistem, sıcaklık farkından kaynaklanan kütle kuvvetinin, süblimleşen yüzeydeki kütle transferinden kaynaklanan kütle kuvvetine yaklaşık eşit olmasını sağlayacak şekilde tasarlanmış ve deneyler yapılmıştır. Deneyler; yüzeyi ince p-diklorobenzen tabakası ile kaplı 22,8x61x3,18cm boyutlarında, paslanmaz çelik ve ısıtılan dikey bir levhada yapılmıştır. Farklı durumlar için akışın karakteristiğini gösteren yatay (fringe) belirlenebilmesi için interferometer cihazı kullanılmıştır. Sıcaklık farkının ve süblimleşmesinin artması sonucu değişik saçak profillerinin oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 2.1). Ayrıca Gladstone-Dale bağıntısı (hava- p-diklorobenzen) kullanılarak bir eşitlik elde edilmiştir. Karışımın ideal bir gaz karışımı olduğu kabul edilerek çözümler molar olarak yapılmış ve Nu, Sh sayıları hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar Somers ve Wilcox'un analitik çözümleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların %10-15 düşük olduğu görülmüştür. Aradaki farkın yapılan uygunsuz kabullerden değil, sınır tabaka karakterinden kaynaklandığı açıklanmıştır.



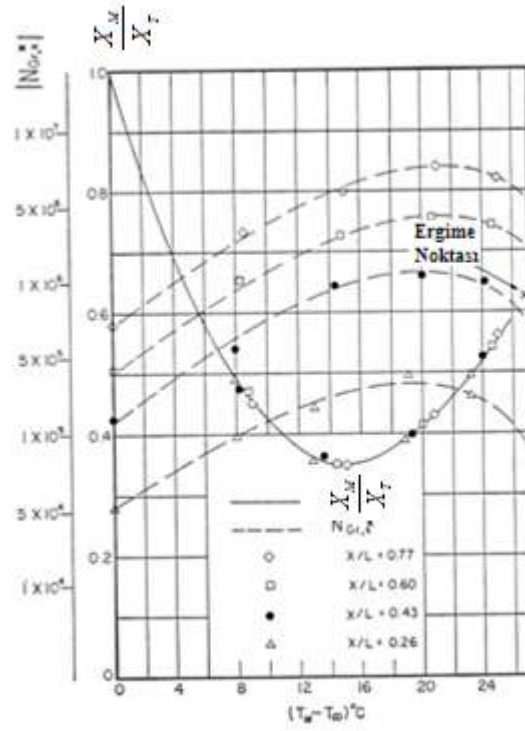
Şekil 2.1 Interferogramlar (Adams ve McFadden, 1966)

P-diklorobenzen'in molekül ağırlığı havadan beş kat fazla olduğundan, organik yüzeydeki süblimleşme yoğunluğu artırıcı etki yapmaktadır. Oluşan karşı kütle kuvveti duyulur ısı geçişini düşürmektedir. Aşağı doğru kütle kuvvetinin, toplam kütle kuvvetine oranı X_M / X_T ($T_w - T_\infty$)'un fonksiyonu olarak Şekil (2.2)'de verilmiş olup, $T_w - T_\infty = 15\text{ }^\circ\text{C}$ 'de bu değer minimum olmaktadır. Ayrıca aynı grafikte Merk tarafından tanımlanmış birleştirilmiş Gr sayısının $N_{Gr,x}^*$ 'in değişimi ($T_w - T_\infty$)'un fonksiyonu olarak gösterilmiştir.

$$N_{Gr,x}^* = \frac{gx^3}{\nu^2} \left[\frac{T_w - T_\infty}{T_\infty} - \frac{T_w}{T_\infty} \left(\frac{M_b - M_a}{M_a} \right) \left(\frac{P_{b,w}}{P} \right) \right] \quad (2.8)$$

b = organik bileşik, p-diklorobenzen

a = atmosferik hava



Şekil 2.2 $N_{Gr,x}^*$ ve $\frac{X_M}{X_T}$ 'ın sıcaklık farkına bağlı değişimi (AdamsveMcFadden,1966)

Grafikte 21 °C'de $N_{Gr,x}^*$ en büyük değerine ulaşmaktadır, ΔT artırılrsa bile Gr, Nu, Sh sayıları düşüş eğilimi göstermektedir. Aynı zamanda ısı ve kütle transfer katsayıları da bu noktadan sonra azalmaktadır. Gr sayısının düşmeye devam etmesi sonucu sınır tabaka akışının görünmez hale geleceği ve bunun $Gr=10^4$ değerinde sağlanacağı söylenmiştir. Fakat bu değer için deney yapılmamıştır.

Diğer bir grafikte, elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda verilen korelasyonlar ile karşılaştırılmıştır.

$$N_{Sh,x}=0,475 \left[N_{Gr,x}^* \frac{N_{Sc}}{N_{Pr}} \right]^{1/4} \quad (2.9)$$

$$N_{Nu,x}=0,475 \left[N_{Gr,x}^* \frac{N_{Pr}}{N_{Sc}} \right]^{1/4} \quad (2.10)$$

İzotermal bir duvarda ısı geçişi varken $N_{Nu,x}$ 'ın yerel değerleri için kullanılan sabit sayı $0,555/(3/4)=0,416$ 'dır. Burada ayrıca sadece ısı geçişinin veya ısı ve kütle geçişinin beraber

olması durumunda $\frac{Nu(\text{sabit ısı akısında})}{Nu(\text{sabit duvar sıcaklığında})}$ oranının eşit olacağı kabulü yapılmıştır. Bu kabul ile birlikte Sparrow ve Gregg'in sonucundan hareketle 0,416 sabiti 1,14 ile çarpılarak 0,475 katsayısı elde edilmiştir. Bu şekilde de sabit ısı akısı sınır şartlarına getirilmiş olacağı belirtilerek korelasyonlardaki sabit hesaplanmıştır. Yerel ısı ve kütle geçiş katsayılarının belirlenebilmesi için yapılmış bu çalışmada, ortalama değerlerin hesaplanabilmesi için ise elde edilen eşitliklerde $x=L$ ve $0,475.(4/3)$ değerlerinin kullanılmasının yeterli olacağı açıklanmıştır.

Gebhart ve Pera (1971), tarafından yapılan çalışma, eş zamanlı ısı ve kütle difüzyon kaynaklı oluşan yoğunluk farklarının, yerçekimiyle etkileşimi sonucu akışkan içinde meydana gelen laminar akımı konu almaktadır. Su ve atmosferik hava içindeki birçok proseste olduğu gibi, bu çalışmada da 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. Bu benzeşimin, tekli kaldırma mekanizmalı akışlar için bulunan form ile aynı olduğu söylenmiştir. Sonuç denklemleri hava ve su için, Sc sayısının değişik pratik değerlerinde, destekleyen ve zıt yönlü kaldırma etkileri için integre edilmiştir. Sonuçlar laminar rejimde hız, ısı ve kütle geçişi için birçok ilginç etkiler göstermiştir. Sonuçları integral yöntem analizleri ile karşılaştırarak, daha karışık birleşik kaldırma etkili akışlarda burada yapılan yaklaşık hesaplamaların limitlerini ve başarısız olduğu noktaların sebeplerini göstermişlerdir. Derişiklik seviyesinin çok düşük olduğu analizlerde, ara yüzey hızları ile kütle-ısı (Defour) ve ısı-kütle (Soret) enerji etkileri ihmal edilmiştir. Yapılan kabullerin, kaldırma kuvvetini oluşturan derişiklik ve farkların az olduğu atmosferik hava ve su içindeki bir çok proses için gerçekçi olduğunu söylemişlerdir. Bu durumda viskoz yayılım(viscous dissipation) teriminin de ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Akımı harekete geçiren yoğunluk farkını oluşturan iki etkinin ısı ve kimyasal difüzyon olduğu söylenmiştir. Akımı harekete geçiren toplam yoğunluk farkını sağlayan, kimyasal ve ısı difüzyonunun bağıl önemini belirten bir "N" katsayısı tanımlanmıştır.

$$N = \frac{Gr_{x,C}}{Gr_{x,t}} = \frac{\beta^*(C_0 - C_\infty)}{\beta(t_0 - t_\infty)} \quad (2.11)$$

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

İki etkinin ters yönde olmaları halinde, akışın pozitif x yönünde olabilmesi için N sayısının negatif bir limit değeri vardır. $Pr=Sc$ durumu için limit değerin $N=-1$ olduğu belirtilmiştir.

Yapılan kabuller ve hesaplamalar sonucunda, dikey bir yüzeydeki akış için yerel Nu ve yerel Sh sayıları sırasıyla Eşitlik (2.12) (2.13) ile ifade edilmiştir.

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} = -\frac{\phi'(0)}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(PGr_{x,t} + QGr_{x,C})} = -\frac{\phi'(0)}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(Gr_{x,t})^4} \sqrt[4]{(P + QN)} \quad (2.12)$$

$$Sh_x = \frac{h_{m,x} x}{D} = -\frac{C'(0)}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(PGr_{x,t} + QGr_{x,C})} = -\frac{C'(0)}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{(Gr_{x,C})^4} \sqrt[4]{\left| \frac{P + QN}{N} \right|} \quad (2.13)$$

P, Q = Boyut faktörü (Sabit)

ϕ = Boyutsuz sıcaklık

C = Boyutsuz derişiklik

Hesaplamalar $Pr=Sc$ ve $Pr \neq Sc$ durumları için yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuç 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.

Saville ve Churchill (1970), sıcaklık ve derişiklikteki farklar sonucu oluşan laminar doğal taşınımında, farklı asimptotik durumlarda, ısı ve kütle geçiş katsayıları için değişik ifadeler oluşturmuşlardır. Çalışmanın yapıldığı dört farklı asimptotik durum: eşit ve sıfıra yaklaşan Sc ve Pr sayılarında, eşit ve sonsuza yaklaşan Sc ve Pr sayılarında, sonsuza yaklaşan Sh ve sıfıra yaklaşan Pr sayılarında, Sc sayısının Pr 'den büyük olduğu ve Pr sayısının sonsuza yaklaştığı durum, şeklinde açıklanmıştır. Sonuçların yatay silindire veya dikey asimetrik cisimlere uygulanabileceği belirtilmiştir. Mevcut sınır tabaka yaklaşımlarının geçerli olduğu ve sonuçların mevcut çözümlere ve belirli durumlardaki deneysel sonuçlara yakın olduğu söylenmiştir.

Çalışmadaki analizler, dış yüzeyi uniform sıcaklık ve bileşime (composition) sahip daldırılmış cisimler etrafındaki ikili karışımlarda oluşan laminar sınır tabaka akımları ile sınırlandırılmıştır.

Kütle kuvveti ile ilgili, yoğunluk dışında diğer fiziksel özellikler sabit alınmıştır. İkinci olarak, ısı difüzyon, ara yüzey hızı ve Merk tarafından açıklanan Ackerman etkisi olarak bilinen difüzyon ısı kapasitesi göz önüne alınmamıştır. Von Karman integral yöntemi kullanılarak sonuçlar, Sc ve Pr sayılarının eşit veya yaklaşık eşit olduğu durumlarla sınırlandırılmıştır. Elde ettikleri sonuçlar aşağıdaki şekilde verilmiştir:

Sc ve Pr $\rightarrow 0$, Sc=Pr durumu için asimptotik çözümler:

$$NuGr^{-1/4} \sim \phi_2(x) [\xi(x)]^{-1/4} (1 + \sigma) Pr^{1/2} [-t'_0(0)] \quad (2.14)$$

$t'_0(0)$ 'ın her cisim için ilgili eşitliklerin çözümlerinden tayin edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca bu durum için sıcaklık ve derişiklik farklarının birbirini destekler yönde etki yaptığı söylenmiştir.

Sc ve Pr $\rightarrow \infty$, Sc=Pr durumu için asimptotik çözümler:

$$NuGr^{-1/4} \sim 0,54 \phi_2(x) [\xi(x)]^{-1/4} (1 + \sigma)^{1/4} Pr^{1/4} \quad (2.15)$$

Şeklinde ifade edilmiş, yine burada da sıcaklık ve derişiklik farklarının birbirini destekler yönde etki yaptığı belirtilmiştir.

Küçük Pr ve büyük Sc sayıları için asimptotik çözümler:

Küçük Pr ve büyük Sc sayılarının sıvı metalleri karakterize ettiği açıklanmış ve yukarıdaki durumlardakine benzer olarak ifadeler genişletilmiştir. Yukarıdakilerden farklı olarak sadece dış akım değil aynı zamanda iç akım içinde ifadeler irdelenmiştir. Dış akım problemi ve sıcaklık fonksiyonunun önceki durumlarla aynı olduğu fakat iç akım problemi eşitliklerinin birleştirilmiş doğal ve zorlamalı taşınım eşitlikleri şeklinde olduğu vurgulanmıştır.

$$ShGr^{-1/4} \sim \phi_2(x) [\xi(x)]^{-1/4} K_0^{-1/4} (a/6)^{1/3} [\Gamma(4/3)]^{-1} Sc^{1/3} \quad (2.16)$$

Büyük Pr ve Sc sayıları için Asimptotik çözümler:

$$NuGr^{-1/4} \sim \phi_2(x) [\xi(x)]^{-1/4} Pr^{1/4} [-t'_i(0)] \quad (2.17)$$

$$ShGr^{-1/4} \sim \phi_2(x) [\xi(x)]^{-1/4} Pr^{1/4} [-m'_i(0)] \quad (2.18)$$

şeklinde verilmiştir.

Çizelge 2.1 Yüzey gerilimi, Sh ve Nu sayılarının; Gr, Pr, Sc sayıları ve kütle kuvveti cinsinden ifadeleri

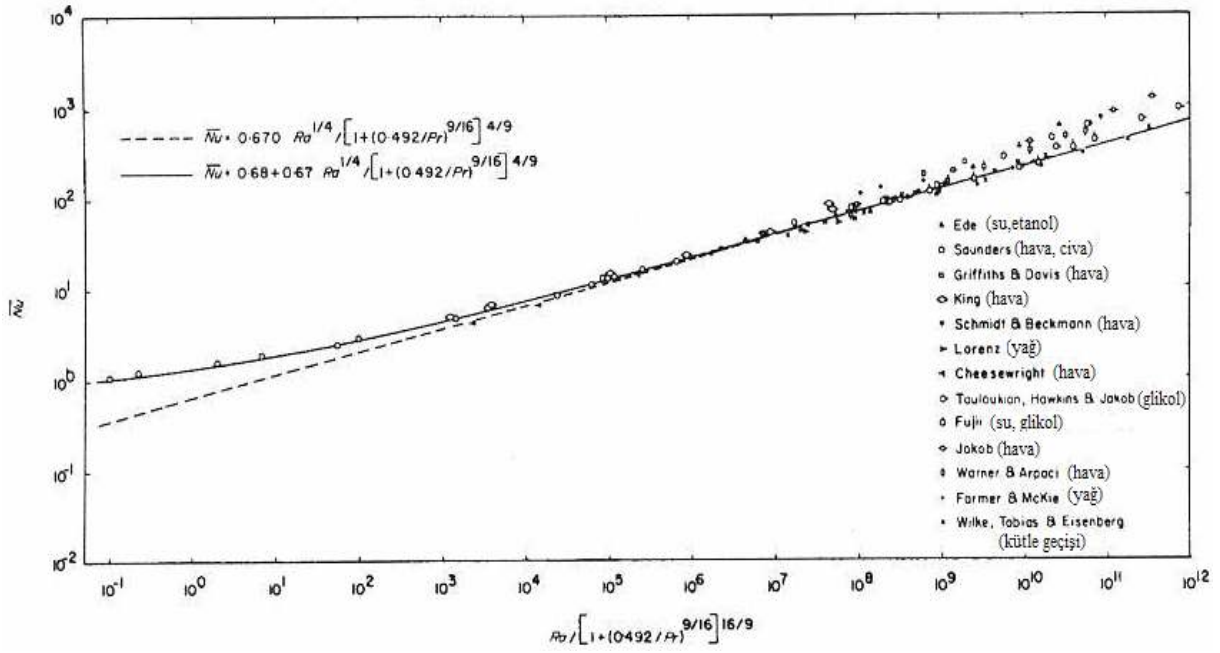
	T	Nu	Sh
$N_{Pr}, N_{Sc} \rightarrow 0$ ($N_{Pr}=N_{Sc}$)	$Gr^{3/4} (1+\sigma)^{3/4}$	$Gr^{1/4} (1+\sigma)^{1/4} Pr^{1/2}$	$Gr^{1/4} (1+\sigma)^{1/4} Sc^{1/2}$
$N_{Pr}, N_{Sc} \rightarrow \infty$ ($N_{Pr}=N_{Sc}$)	$Gr^{3/4} (1+\sigma)^{3/4} Pr^{-1/4}$	$Gr^{1/4} (1+\sigma)^{1/4} Pr^{1/4}$	$Gr^{1/4} (1+\sigma)^{1/4} Sc^{1/4}$
$N_{Pr} \rightarrow 0, N_{Sc} \rightarrow \infty$	$Gr^{3/4} (1+\sigma)^{3/4}$	$Gr^{1/4} (1+\sigma)^{1/4} Pr^{1/2}$	$Gr^{1/4} Sc^{1/3}$
$N_{Pr}, N_{Sc} \rightarrow \infty$ ($N_{Sc} \gg N_{Pr}$)	$Gr^{3/4} Pr^{-1/4}$	$Gr^{1/4} Pr^{1/4}$	$Gr^{1/4} Pr^{-1/12} Sc^{1/3}$

Tablodan da görüldüğü gibi, eş zamanlı sıcaklık ve derişiklik farkıyla oluşan doğal taşınım şartlarında, Nu, Sh ve T sayıları için asimptotik ifadeler geliştirilmiştir. Sonuçlar sıcaklık ve derişiklik farklarının her zaman birbirini destekler yönde olmadığını göstermiştir. Etkili Gr sayısının her zaman ısı ve kütle transferi için hesaplanan sayıların toplamı şeklinde olmadığı belirtilmiştir. Çalışma sonucundaki önemli diğer bir husus, etkili kütle kuvvetinin, akışkan içindeki sıcaklık ve bileşim değışikliklerine bağı yoğunluk gradyanı ile oluştuğunun vurgulanmış olmasıdır. $Pr=Sc$ durumu için bu değışiklikler birbirini destekler yöndedir ve bu makalede yayınlanan eşitlikler bu değışikliklerin birbirini destekler yönde etki yaptığı durumları kapsamaktadır.

Churchill ve Chu (1975) yaptıkları çalışmada, Churchill ve Usagi'nin (1972) modelini kullanarak, tüm Ra ve Pr (veya Sc) sayılarında yüzeydeki ortalama Nu (veya Sh) sayıları için basit bir ifade geliştirmişlerdir. İfadenin oluşturulması için, sıfır ve sonsuza yakınsayan deneysel Ra değeri ve laminar sınır tabaka teorisinin sonuçları kullanılmıştır. Oluşturulan ifadenin, üniform ısıtma, üniform yüzey sıcaklığı, kütle geçişi, eş zamanlı ısı ve kütle geçişi şartları için uygulanabilir olduğu söylenmiştir. Korelasyonlar, newtonien olmayan akışkanların ve eğik yüzeyler için geçiş hızlarının belirlenmesinde temel oluşturmaktadır. Ayrıca sınırlı aralıktaki şartlar için daha basit ifadeler geliştirilmiş olup, genel ve sınırlı ifadeler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada, doğal taşınım şartlarında, ortalama geçiş hızlarının belirlenebilmesi için basit fakat çok genel korelasyonlar, Churchill ve Usagin modelinden oluşturulmuştur. Korelasyon öncelikle üniform yüzey sıcaklığındaki levhadan ısı geçişi için oluşturulmuş, daha sonra sırasıyla üniform ısıtma, kütle geçişi, eş zamanlı ısı ve kütle geçişi durumlarında newtonien olmayan akışkanlar ve eğik yüzeyler için ne olması gerektiği düşünülmüştür. Laminer rejimde üniform sıcaklıktaki levhadan ısı geçişi için (2.19), (2.20) korelasyonları oluşturulmuş ve Şekil 2.3'de grafik olarak verilmiştir.

$$Nu = 0,670 Ra^{1/4} / [1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{4/9} \quad 10^5 < Ra < 10^9 \quad (2.19)$$

$$Nu = 0,68 + \frac{0,670 Ra^{1/4}}{\left[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra < 10^9 \quad (2.20)$$



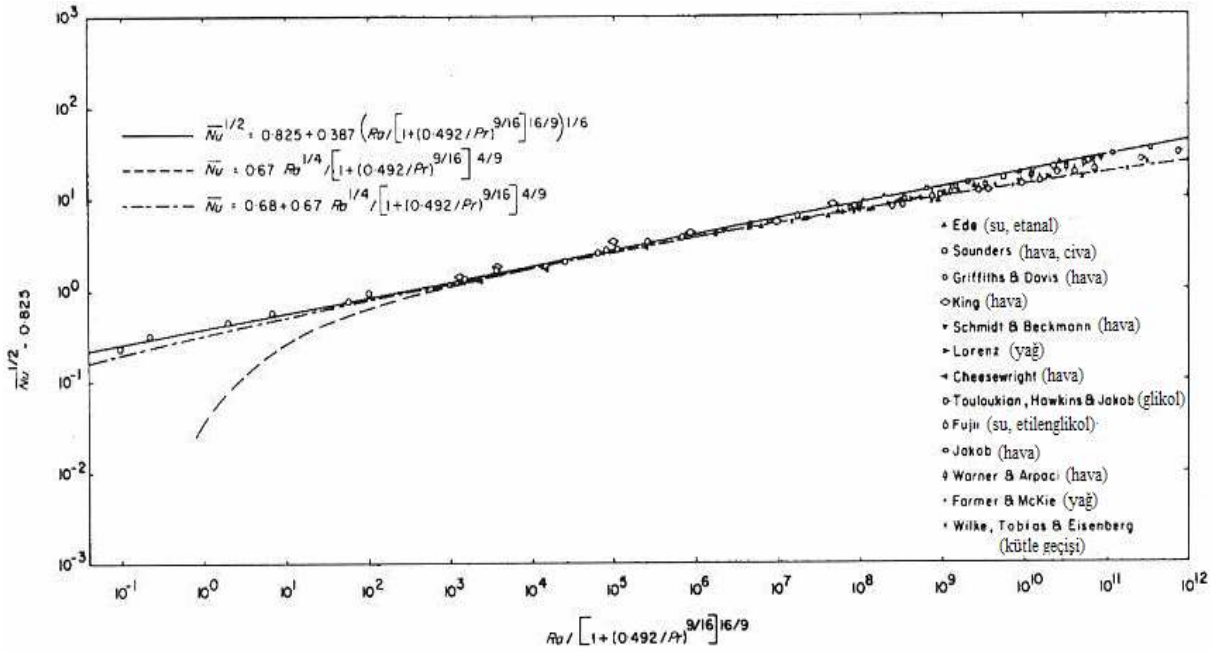
Şekil 2.3 Laminer rejimde sabit sıcaklıktaki dikey levha için oluşturulan korelasyonlar (Churchill ve Chu, 1975)

Laminer + Türbülanslı rejimde üniform sıcaklıktaki levhadan ısı geçişi için (2.21) korelasyonu oluşturulmuş ve Şekil 2.4’de önceki deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

$$Nu^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \quad (2.21)$$

Sabit ısı akısı için (3.22)

$$Nu^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0,437 / Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \quad (2.22)$$



Şekil 2.4 Laminer akışlı ve sabit sıcaklıktaki dikey levha için oluşturulan korelasyonların önceki deneysel verilerle karşılaştırması (Churchill ve Chu, 1975)

Kütle geçişi için yapılan çalışmada, kütle geçiş miktarı hız alanını önemli miktarda değiştirecek kadar büyük değilse, laminer ve laminer+türbülanslı durum için oluşturulan eşitliklerde (2.20),(2.21) Nu yerine Sh, Pr yerine Sc ve Ra yerine Ra' yazılarak kütle geçişi için aynı eşitliklerin kullanılabileceği belirtilmiştir. Laminer ve liminer+türbülanslı rejim için oluşturulan korelasyonları aşağıdaki şekilde oluşturmuştur. Eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için, sadece sıcaklık gradyanından dolayı oluşan kütle geçişinde ($\alpha(w_s - w_b) / \beta(T_s - T_b) \rightarrow 0$, $Pr/Sc \rightarrow 0$) sabit sıcaklıktaki levhada laminer+türbülanslı durum için oluşturulan korelasyonda (3.21) Nu yerine Sh, Ra yerine $Ra(Sc/Pr)^{4/3}$ yazılarak çözümleme yapılabileceği belirtilmiştir. $Sc=Pr$ olması halinde ise (2.21) korelasyonun Ra yerine $Ra+Ra'$ yazılarak eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için kullanılabileceğini eklenmiştir.

Chen ve Yuh (1979) yaptıkları çalışmada, doğal taşınım şartlarında, dikey silindir üzerinde, ısı ve kütle geçişinin birlikte oluşturduğu kaldırma kuvvetleri sonucu oluşan akıştaki ısı ve kütle geçişini analitik olarak incelemişlerdir. Çalışma dikey silindir için yapıldığından dikey levha ile yapılan çalışmalarla aynı bölümde incelenmiştir. İncelenen prosesler Defour, Soret etkilerinin ve difüzyondan kaynaklanan ara yüzey hızlarının ihmal edildiği durumlarla sınırlandırılmıştır. Silindir yüzeyinde, uniform sıcaklık ve derişiklik veya uniform ısı/kütle akısı kabulleri yapılmıştır.

Silindir eğriliği, Pr ve Sc sayıları, $Gr_{x,t}$ ve $Gr_{x,c}$ sayıları, kütle ve ısı difüzyonu arasındaki bağıl kaldırma kuvveti etkisi, çalışmadaki temel parametreler olarak belirtilmiştir. Isı ve kütle geçişinin beraber olduğu durumda, yerel yüzey gerilimi, yerel Nu ve Sh sayılarının silindir eğriliği ile doğru orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir. Kütle geçişinden kaynaklanan kaldırma kuvvetinin ısı kaldırma kuvvetini destekler yönde olması halinde yukarıda bahsedilen iki büyüklük artan etki gösterirken tersi olması durumunda azalan etki göstereceği söylenmiştir. Isıl kaldırma kuvvetinin artışı ile kütle geçiş katsayısı ve Sh sayısı artmaktadır. Sonuçta, uniform ısı/kütle akısında, ısı ve kütle geçişi sonucu oluşan kaldırma kuvvetinin sağladığı Nu ve Sh sayılarının; uniform yüzey sıcaklık ve derişikliğinde sağlananlardan daha büyük olduğu belirtilmiştir.

Sonuçlar benzerlik formunda elde edilmiş olup, nümerik sonuçlar hava ve su için geçerli Sc sayılarını kapsayacak aralıktadır. Laminer sınır tabaka denklemleri boyutsuzlaştırıldıktan sonra, sonlueleman yöntemiyle çözülmüştür. Çözümler $Pr=0,7 - Sc=0,2-1$ ve $Pr=7 - Sc=7-500$ aralıklarında yapılmıştır. İncelenen şartlarda derişiklik seviyesi düşük olduğundan, kütle geçişinden kaynaklanan ara yüzey hızları ihmal edilmiştir. İlgilenilen önemli fiziksel büyüklüklerin yerel duvar gerilimi, yerel Nu ve yerel Sh sayıları olduğu söylenmiş ve uniform duvar sıcaklığı/derişikliği ve uniform ısı/kütle akısı durumları için hesaplamalar yapılmıştır. Uniform duvar sıcaklığı/derişikliği için yapılan incelemede N sayısının kimyasal düfüzyonun, ısı difüzyon üzerindeki bağıl etkisini ifade ettiği açıklanmıştır.

$$N = \frac{\beta^*(C_w - C_\infty)}{\beta(T_w - T_\infty)} = \frac{Gr_{x,c}}{Gr_{x,t}} \quad (2.23)$$

$$Gr_{x,t} = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad Gr_{x,c} = \frac{g\beta^*(C_w - C_\infty)x^3}{\nu^2} \quad (2.24)$$

$N>0$ olması durumunda ısı ve kütle difüzyonlarından kaynaklanan kaldırma kuvvetlerinin birbirlerini destekler yönde akışı oluşturdıkları, $N<0$ olması halinde ise birbirlerine ters yönde etki yaptıkları belirtilmiştir. Uniform ısı/kütle akısı şartlarında yapılan incelemede geliştirilmiş N^* , $Gr_{x,c}^*$ ve $Gr_{x,t}^*$ sayıları tanımlanarak gerekli hesaplamalarda kullanılmıştır.

$$N^* = \frac{Gr_{x,c}^*}{Gr_{x,t}^*} \quad (2.25)$$

$$Gr_{x,t}^* = \frac{g\beta q_w x^4}{kv^2} \quad Gr_{x,c}^* = \frac{g\beta^* m_w x^4}{\rho D_{AB} v^2} \quad (2.26)$$

Sonuçta, serbeset taşınım şartlarında, ısı ve kütle difüzyon kaynaklı birleştirilmiş kaldırma kuvveti etkisindeki dikey bir silindirde, yerel Nu ve Sh sayılarının eğrilik etkisi ile doğru orantılı olarak arttığı belirtilmiştir. Kütle difüzyonu kaynaklı kaldırma kuvvetinin, ısı kaldırma kuvvetini destekler yönde olması halinde yerel Nu sayısının artacağı, aksi halde azalacağı söylenmiştir. Isıl kaldırma kuvvetinin artışıyla kütle geçişinin daha etkili hale geleceği sonuçlara eklenmiştir. Ayrıca uniform ısı/kütle akısı şartlarında yapılan inceleme sonucunda elde edilen Nu ve Sh sayılarının uniform duvar sıcaklığı/derişikliğinde elde edilenlerden daha yüksek olduğu vurgulanmıştır.

De Leeuw Den Bouter v.d. (1968), tarafından yapılan çalışmada doğal taşınım ile oluşan eş zamanlı ısı ve kütle geçişi sıvı faz içinde deneysel olarak belirlenmiştir. Daha sonraki bölümde açıklanacak, yatay boru için yapılmış eş zamanlı ısı ve kütle transferini konu alan deneysel çalışmalara temel teşkil etmektedir. Dikey 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:

$$GR_h = Gr_h + \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{1/2} Gr_m \quad (2.27)$$

$$GR_m = Gr_m + \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{1/2} Gr_h \quad (2.28)$$

$$Gr_h = \frac{gl^3}{v^2} \frac{\Delta\rho_T}{\rho} \quad Gr_m = \frac{gl^3}{v^2} \frac{\Delta\rho_C}{\rho} \quad (2.29)$$

Ortalama ısı ve kütle transfer katsayıları ise $Nu = c(GR_h Pr)^n$, $Sh = c(GR_m Sc)^n$ formunda ifade edilmiştir. “c” katsayısının değerinin diferansiyel denklemin çözüm yöntemine ve Pr, Sc sayılarına bağlı olarak 0,56-0,67 arasında değiştiği ve dikey levha için $n=0,25$ olduğu belirtilmiştir. Kullanılan elektrokimyasal yöntemde, derişiklik kontrolü elektrot reaksiyonu ile yapılırken, aynı zamanda ısı geçiş miktarı da kolaylıkla ölçülebilmektedir. Kütle geçişi miktarı belirlenecek elektrot, yığın sıcaklığından farklı sabit bir sıcaklık değerine getirilir. Bu durumda iki farklı şartın oluşacağı belirtilmiştir.

Yığın sıcaklığının elektrot sıcaklığından düşük olması halinde birbirini destekler yönde kütle kuvvetleri oluşurken tersi durumda karşı kütle kuvvetlerinin olduğu söylenmiştir. Yığın sıcaklığının 15-29 °C arasında değiştirildiği deneysel çalışma üç grupta yapılmıştır: Sadece kütle geçişi, 30 °C de katod ile eş zamanlı ısı ve kütle geçişi(kütle kuvvetleri birbirini destekler yönde), 14 °C katod ile eş zamanlı ısı ve kütle geçişi(kütle kuvvetleri ters yönde). Her üç durum için elde edilen deneysel bulgular tek bir grafikte logaritmik olarak gösterilmiştir. Ayrıca aynı grafikte, yüksek Pr ve Sc sayılarında sınır tabaka eşitliklerinin asimptotik çözümlerindeki $c=0,67$ değeri için oluşturulan teorik sonuç da gösterilmiştir. Deneyler sonucunda $n=0,243$ $c=0,79$ olarak bulunmuştur ($n= 0,243\pm0,07$, $c=0,79\pm0,12$). Teorik yaklaşımdaki $n=0,25$ ve $c=0,67$, değerlerinin deneysel sonuçların 95% güvenilirlik limitleri içinde kaldığını belirtmişlerdir. Karşı kuvvetlerin olduğu noktaların ihmal edilmesi durumunda, değerler daha da yakınsamaktadır. ($n=0,252\pm0,003$, $c=0,64\pm0,05$). Deneysel veriler değerlendirildiğinde, kütle geçişi prosesinde, sıcaklık gradyanının etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun birçok elektrolitik proses için de önem teşkil ettiği belirtilmiştir.

Çizelge 2.2 Boyutsuz sayıların değerleri

Derişiklik	$T_{\text{yığın}}$	Sh_I	Sh_{II}	Sh_{III}	Nu_{II}	Nu_{III}
0 1	22	201	339	220	48	42
0 2	22	236	360	212	46	35
0 3	22	265	381	220	50	37
0 3	15,75	-	438	-	51	-
0 3	19,80	-	393	190	51	35

Sh_I = Sadece kütle geçişinin olduğu durumda

Sh_{II} , Nu_{II} = Kütle kuvvetlerinin destekler yönde olduğu durumda

Sh_{III} , Nu_{III} = Kütle kuvvetlerinin zıt yönde olduğu durumda

Deneysel çalışma sonunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Katot sıcaklığı yığın sıcaklığının altında ise ısı transferi, kütle transferine ters etki yaptığı için hesaplanan Nu ve Sh sayıları; katot sıcaklığının yığın sıcaklığından fazla olduğu durumda hesaplanan Nu ve Sh sayılarından daha düşüktür.

- İki etkinin birbirini destekler yönde etki yaptığı (katod sıcaklığının yığın sıcaklığından fazla olduğu $T_y=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{yığın}=22\text{ }^{\circ}\text{C}$) durumda derişiklik farkı artırıldığında Sh sayısı artarken, $T_y=14\text{ }^{\circ}\text{C}$ olması halinde yani zıt etki oluştuğunda Sh sayısı sabit kalmaktadır.
- $Pr \approx 10 \ll Sc \approx 2000$ olduğu durumda kütle transferinin ısı transferi üzerindeki etkisi fazla değildir. Fakat eldeki datalardan, ısı transferinin kütle transferi üzerinde etkisi olduğu net olarak gözükmemektedir.

2.2 Yatay Boruda Isı Geçişini Konu Alan Çalışmalar

Saville ve Churchill (1966) tarafından yapılan çalışmada, yatay silindir veya dikey asimetrik cisimlerdeki serbest taşınım problemi incelenmiştir. Sıcaklık ve akım fonksiyonu için birleştirilmiş kısmi diferansiyel denklemlerin çözümleri universal seriler ile ifade edilmiştir. Genel benzerlik dönüşümüne uymayan durumlarda bile serilerin hızlı yakınsadığı görülmüştür. Ayrıca silindirler veya kürelerde seri çözümlerin Blasius'a göre daha hızlı yakınsadığı ve tek terimli yaklaşımların eldeki deneysel veriler ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Sıcaklık etkili serbest taşınım şartlarında, cisim şeklinin nasıl etki yapacağını, daha önceki çalışmaların sadece birkaçında incelendiği söylenmiştir. Büyük Gr ve büyük veya küçük Pr sayılarında, Nu, Gr ve Pr sayıları arasındaki ilişkinin asimptotik karakterinin diferansiyel denklemlerden öğrenildiği belirtilmiş olup ilişki Eşitlik (2.30) ve (2.31) deki gibi verilmiştir.

$$Nu \sim (Gr.Pr)^{1/4} \quad Pr \rightarrow \infty \quad (2.30)$$

$$Nu \sim (Gr.Pr^2)^{1/4} \quad Pr \rightarrow 0 \quad (2.31)$$

Cismin şekline bağlı değişen orantı karakteristiğinin, büyük Pr sayılarında kapalı(explicit) formda elde edilebileceği fakat küçük Pr sayılarında cismin şekil etkisinin belirlenmesi için daha kapsamlı bir analiz yapılması gerektiği söylenmiştir.

Ara yüzey hızlarının ihmal edilmesi halinde, bileşim (composition) gradyanlerinin oluşturduğu doğal taşınım olayının sıcaklık sonucu oluşan taşınım ile benzeşim yapılarak açıklanabileceği belirtilmiş ve ihmal edilmiştir. Ayrıca, cismin dışındaki akışkanın fiziksel özellikleri(kaldırma kuvveti terimi içindeki yoğunluk dışında) ve cismin yüzey sıcaklığı sabit kabul edilmiştir. Çalışmada Goertler serileri kullanılmış olup, nümerik çözümlerden çıkan sonuçlar, literatürden alınan deneysel datalar ve diğer yöntemlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Daha önceden Jodlbauer (1933) tarafından hava için yapılmış deneyler sonucunda elde edilen veriler ile serilerin 1 terimli veya 2 terimli olması halinde elde edilecek

boyutsuz sıcaklık ve hız değerlerinin boyutsuz normal mesafe(dimensionless normal distance) ile değişimi karşılaştırılmıştır. Sonuçların uygun olduğu gözlenmiş, yığılma noktasından itibaren 150^0 noktasına kadar 1 terimli serilerin sıcaklık dağılımını temsil ettiği belirtilmiştir.

Pr sayısının artması ile diferansiyel denklemlerin içindeki lineer olmayan terimlerin etkisinin azaldığı ve yüksek Pr sayılarında doğru sonuçlar için terim sayısının az olması gerektiği vurgulanmıştır. $Pr \rightarrow 0$ a gitmesi yani azalması halinde, lineer olmayan terimlerin öneminin artacağı, bu nedenle 1 terimli yaklaşımlar sonucunda oluşan hatanın artacağı beklenildiği belirtilmiştir. Yine de $Pr = 0,01$ değerinde, silindir için oluşturulan serideki 2. terim 1. terimin %5'inden azdır. Fakat yapılacak düzeltmeler her zaman küçük olmayacağından, cismin şekline bağlı olarak değişeceği söylenmiştir. Silindirde ortalama Nu sayısı için oluşturulan serilerde tek terimli olanların sıfır terimli olanlara oranı Goertler için 0.013 iken Blasius serisinde 0.14'dür. Bunun ve deneysel veriler ile sağlanan uyumun bir sonucu olarak, 1 terimli Goertler serilerinin daha doğru olacağı belirtilmiştir. Oluşturulan 1 terimli yaklaşımlarla (one-term approximations) , 1 ve 2 terimli Blasius serileri doğal taşınım için karşılaştırılmıştır. (Çizelge 2.3)

Çizelge 2.3 Doğal taşınım için bir terimli yaklaşımla Blasius serilerinin karşılaştırması

$Nu Gr^{-1/4}$	1 Terimli Yaklaşım	1 Terimli Blasius	2 Terimli Blasius
Silindir	0.298	0.37	0.317
Küre	0.353	0.458	0.358

Yatay silindirde nümerik çözümler elde edebilmek için sınır-tabaka teorisinden yararlanılan bu çalışmada, çözümlerin ortalama Ra sayıları için doğru olduğu ve sınır tabaka ayrılmasının silindirin üzerinde küçük bir bölgeye sıkıştığı belirtilmiştir.

Gebhart ve Pera (1970) yapmış oldukları deneysel çalışmada, farklı uzunluktaki tellerden değişik Pr sayılarına sahip akışkanlara olan ısı geçişini incelemişlerdir. Çalışma doğal, zorlamalı ve birlikte doğal ve zorlamalı taşınımın olduğu durumlarda yapılmıştır. Deneysel sonuçlar daha önceki analiz ve korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Doğal ve zorlanmış taşınımda silindir boyunun olaya etkisinin ne olduğu gösterilmiştir(uç etkilerinin önemi). Silindir boyunun çapına oranının (L/D) önemli bir değişken olarak kalmaması için gerekli olan büyüklük ne olmalıdır yani silindirden oluşan geçişin, sonsuz silindirinkine denk olabilmesi için farklı rejimlerde L/D ne kadar büyük olmalıdır sorusuna cevap aranmıştır.

Akışın tabiatının (doğal-karışık-zorlamalı), ısı geçişinin olduğu akışkanın Pr sayısına bağlı olduğu ve bu sayının akışı kontrol eden ısı ve hız alanlarının bağlı büyüklüğünü belirlediği söylenmiştir. Ayrıca, sıkıştırılabilirlik ve/veya viskoz yayılım etkisinin önemli olduğu fakat burada değinilmediği belirtilmiştir. Bu çalışmada küçük çaplı ve elektrikle ısıtılan farklı boylardaki tellerle $Pr=0,7 \div 63$ aralığında ve akımın yukarı doğru olduğu durum için deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha önceden sonsuz uzunluktaki silindirden zorlanmış taşınım ısı geçişini konu olan birçok analitik çalışma yapıldığı fakat serbest taşınım analizlerinin çok daha karmaşık olduğu belirtilmiştir. Tellerdeki boy çap oranı, serbest taşınım şartlarında incelenen $L/D=1000 \div 16000$ aralığında, zorlanmış ve doğal ve zorlanmış taşınımın birlikte olduğu durumlar için ise $L/D = 8000, 12000, 16000$ olarak seçilmiştir. Çalışmanın sonuçları daha önceki doğal ve zorlanmış çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve birlikte doğal ve zorlanmış taşınımın limitlerini belirleyebilmek için kullanılmıştır. Işınımından dolayı oluşan kayıplar hesaplanmış ve toplam ısı akısının %0.01'den küçük olduğu görülerek ihmal edilmiştir.

Sonuç olarak $L/D=8000$ değerinin hava içindeki yatay silindirin zorlanmış taşınım ısı uzunlukta silindir özelliği göstermesi için yeterli olduğu belirtilmiştir. Fakat bu serbest taşınım için geçerli değildir. $Pr= 6,3$ (hafif silikon) için ise sonsuz uzunluk etkisini sağlamak için gerekli L/D değerinin havaya göre daha fazla olduğu belirtilmiştir. Serbest taşınım şartlarında L/D oranı etkisinin sıvılarda düşük havada ise yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca L/D oranının arttıkça Nu' in azaldığı tespit edilmiştir. Sonsuz uzunluk etkisi oluşması için gerekli olan L/D değerinin doğal taşınım şartları için diğer iki duruma göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Ayrıca tüm durumlar için bu değerin Pr sayısı ile de arttığı belirtilmiştir.

Churchill ve Chu (1974) yapmış oldukları çalışmada, Churchill ve Usagi (1972)'nin modelini kullanarak, serbest taşınım şartlarında, yatay silindir üzerinde tüm Ra ve Pr değerleri için, ortalama Nu sayısını bulmak amacıyla, basit bir ampirik ifade oluşturmuşlardır. Bu ifade, üniform ısı akısı, üniform duvar sıcaklığı, kütle geçişi ve eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için uygulanabilmektedir. Ayrıca sınırlı koşullar için daha basit ifadeler de elde edilmiştir. Daha önceden elde edilmiş olan limit çözümleri ($Pr \rightarrow \infty$ ve $Pr \rightarrow 0$) Churchill ve Usagi (1972)'nin tavsiye ettikleri eşitlik formuyla birleştirilerek yeni bir ifade vermişlerdir.

$$Nu = 0,518Ra^{1/4} / [1 + (0,599 / Pr)^{n/4}]^{1/4} \quad (2.32)$$

Saville ve Churchill tarafından önerilen korelasyona yakın sonuç veren üst değerinin $n=9/4$ olduğu belirlenmiş ve tüm Pr değerleri için (2.33) Eşitliği oluşturulmuştur.

$$Nu = 0,518 \left[Ra / \left[1 + (0,559 / Pr^{9/16})^{16/9} \right] \right]^{1/4} \quad (2.33)$$

Tsubochi ve Masuda'nın, deneysel verilerine dayanarak önerdikleri ampirik limit değeri 0,36 katsayısı ve Eşitlik (2.33) birleştirilerek laminar rejim için Eşitlik (2.34) tanımlanmıştır.

$$Nu^n = 0,36^n + \left[0,518 Ra^{1/4} / \left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{4/9} \right]^n \quad (2.34)$$

Deneysel veriler, Churchill ve Usagi (1972) tarafından tavsiye edilen formda 'n' üssü için 1 değerinin uygun olacağını göstermiş ve bu değer kullanılarak korelasyon oluşturulmuştur.

$$Nu = 0,36 + 0,518 \left[Ra / \left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{16/9} \right]^{1/4} \quad (2.35)$$

Yapılan diğer çalışmalar ile Eşitlik (2.35) karşılaştırılmış ve $10^{-6} < Ra < 10^9$ aralığında tüm Pr değerleri için uyumlu olduğu görülmüştür.

Tüm Ra sayısı değerlerini kapsayacak şekilde bir korelasyon çalışması yapılmış ve Eşitlik (2.36) önerilmiştir.

$$Nu^{1/2} = 0,6 + 0,387 \left[Ra / \left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{16/9} \right]^{1/6} \quad (2.36)$$

Eşitlik (3.35) ve (3.36)'ün basit $Nu = A.Ra^a.Pr^b$ formunda olduğu ve geniş Ra ve Pr aralıklarında başarılı sonuçlar vermeyecekleri belirtilmiştir. Sıcaklık farklarının fazla olduğu, fiziksel özelliklerin değişikliklerinin belirginleştiği durumlarda, yığın sıcaklığı ile yüzey sıcaklığının ortalamasının alınarak bir yaklaşım yapılabileceği belirtilmiştir. Üniorm ısı akısında, birkaç sonlu Pr sayısı için Wilks(19)'un nümerik çözümleri ve Churchill'in geliştirdiği laminar sınır tabaka kullanılarak Eşitlik (2.37) oluşturulmuştur.

$$Nu = 0,579 \left[\frac{Ra}{(1 + (0,442 / Pr)^{9/16})^{16/9}} \right]^{1/4} \quad (2.37)$$

Sparrow ve Gregg (21) dikey bir levha için, Nu ve Ra tanımındaki mesafenin yarısındaki sıcaklık farkının kullanılmasının, sabit duvar sıcaklığını kullanmaktan daha doğru sonuçlar verdiğini söylemektedirler. Düz levha için katsayıların oranı $2^{1/4} / 5^{5/4}$ olarak verilmiştir. Bu faktörün bir yaklaşım olarak yatay silindire uygulanması sonucu 0,579 katsayısı 0,521 olarak değiştirilmiş ve Eşitlik (3.37)'de, $Ra \rightarrow 0$ değeri için çözümleme yapılamayacağından Eşitlik (2.34)'de olduğu gibi korelasyona 0,36 eklenerek önerilmiştir.

$$Nu = 0,36 + 0,521 \left[\frac{Ra}{(1 + (0,442 / Pr)^{9/16})^{16/9}} \right]^{1/4} \quad (2.38)$$

Eşitlik (2.38)'in küçük Pr sayılarında ve laminar rejimde daha kesim çözümler vereceği belirtilerek tavsiye edilmiştir.

Kütle geçişi ve eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için yapılan çalışmada, yüzeye dik yönde önemli bir hız değeri oluşmadığı durumlarda, Eşitlik (2.35) ve (2.36)'de 'Nu, Pr, Ra' yerine 'Sh, Sc, Ra¹' yazılarak, korelasyonların kütle geçişi için de kullanılabileceği söylenmiştir Saville ve Churchill (1970)'in çalışması ışığında, sadece sıcaklık gradyanına bağlı kütle geçişi için

$$\left(\frac{\gamma(w_s - w_b)}{\beta(T_s - T_b)} \rightarrow 0 \text{ ve } \frac{Pr}{Sc} \rightarrow 0 \right) \text{ verilmiş olup Eşitlik (2.35) ve (2.36)'da Nu yerine Sh ve Ra}$$

yerine $Ra(Sc / Pr)^{4/3}$ yazılabileceği belirtilmiştir. Ek olarak, Eşitlik (2.35) ve (2.36)'da özel bir durum için (Sc=Pr) Ra yerine 'Ra+Ra¹' konularak Nu ve Sh sayılarının hesaplanabileceği söylenmiştir. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçları vurgulamışlardır:

- Eşitlik (2.36) ve (2.33)'ün üniform yüzey sıcaklığında tüm Pr ve Ra sayılar için geçerli olduğu sadece laminar rejimden türbülanslı rejime geçişte sorun olduğu belirtilmiştir. Ra ve Nu'nun tanımında 90⁰'deki sıcaklık farkının alınması tavsiye edilmiştir.
- Eşitlik (2.35)'nin $10^{-6} < Ra < 10^9$ aralığında geçerli olduğu belirtilmiştir.
- Eşitlik (2.33)'ün üniform yüzey sıcaklığında ve tüm Pr değerlerinde, laminar sınır tabaka teorisinden hesaplanan ortalama Nu sayıları ile ve $Pr \rightarrow 0$ ve $Pr \rightarrow \infty$ $10^4 < Ra < 10^9$ aralığındaki deneysel sonuçların uyum içinde olduğu söylenmiştir.
- 90⁰'deki sıcaklık farkına göre hesaplanan Eşitlik (2.38)'in laminar rejimde üniform ısıtmada küçük Pr sayıları için Eşitlik (2.35) ve (2.36)'ya göre daha uygun bir korelasyon olduğu belirtilmiştir.

Morgan (1975), serbest taşınım şartlarında yatay silindirden ısı geçişini konu alan birçok bağıntıyı derleyerek, sabit sıcaklıkta bir silindir için, değişik Ra aralıklarında farklı korelasyonlar oluşturmuştur. Birçok deneysel ve teorik çalışmayı incelemiş ve sonuçta verilen eşitliklerin $(Nu)_{D,f} = A_1 + B_1(Gr.Pr)_{D,f}^{m_1}$ formunda olduğunu belirlenmiştir. Bu eşitliklerde; D, Gr ve Nu sayıları için silindir çapının karakteristik uzunluk olarak alındığını, f ise fiziksel büyüklüklerin film sıcaklığında $T_f = 1/2(T_0 + T_\infty)$ belirlendiğini ifade etmektedir. Deneysel çalışmalar üzerinde yaptığı inceleme sonunda; Nu sayılarındaki sapmaların Ra sayısına bağlı

olarak %3 -% 35 arasında değiştiğini belirlemiştir. Literatürde verilen korelasyonlar için ise bu sapmaların %5 - %26 arasında değiştiğini görmüş ve bu sebeple, korelasyonların Nu ile Ra sayıları arasındaki ilişkideki belirsizliği azaltmadıkları sonucuna varmıştır. Deneysel çalışmalardaki sonuçların geniş bir aralığa dağılmasının sebeplerini birkaç ana başlık altında toplamış ve sonuçlardaki sapmaların bu sebeplerden biri veya birkaçının beraber olması durumunda oluştuğunu belirtmiştir:

- Destek ve sıcaklık ölçüm noktalarına iletim yoluyla olan ısı geçişi.
- Yığın akışkanında oluşan hareketler sonucu sıcaklık ve hız alanlarında meydana gelen dengesizlik.
- Doğru seçilmemiş, sıcaklık ölçüm sistemi veya doğru ölçülendirilmemiş deney odacığı.

Yayımlanan tüm deneysel verileri, muhtemel hataları hesaba katarak analiz etmiş ve yatay silindir için Nu ile Ra sayıları arasında Çizelge 2.4’de verilen korelasyonları önermiştir.

Çizelge 2.4 Serbest taşınım şartlarında yatay silindir için önerilen korelasyon

$(Gr.Pr)_{D,f} = Ra$		$(Nu)_{D,f} = B_1 (Gr.Pr)_{D,f}^{m_1}$	
		B_1	m_1
10^{-10}	10^{-2}	0.675	0.058
10^{-2}	10^2	1.02	0.148
10^2	10^4	0.850	0.188
10^4	10^7	0.480	0.250
10^7	10^{12}	0.125	0.333

Belirtilen tüm Ra aralıklarında, geçiş bölgesi değerleri dışında (10^{-2} , 10^2 , 10^4 , 10^7) önerilen korelasyonun, maksimum belirsizliğinin $\pm$ %5 olacağı belirtilmiştir. Geçiş değerlerinde ise eğrinin gradyanında beklenmedik bir değişimin imkânsız olduğu söylenmiştir.

Pera ve Gebhart (1971), yaptıkları deneysel çalışmada silindir üst yüzeyinde ısı nedenlerle oluşan akımın karakteristiğini incelemeyi ve yüzeyde oluşan sınır tabaka ayrılmasını görsellemeyi amaçlamışlardır. Akışın yüzeyden ayrıldığı kaldırma etkisi ile yükseldiği durumlar için matematiksel inceleme yapmanın çok zor olduğunu söylemişlerdir. Damıtılmış su içindeki ısıtılmış silindirik yüzeyde oluşan akışı görüntüleyebilmek için, su içine yoğunluğu $\rho = 1,026$ olan plastik granülleri karıştırmışlar ve granüllerin akışı tam olarak takip edeceğini kabul etmişlerdir.



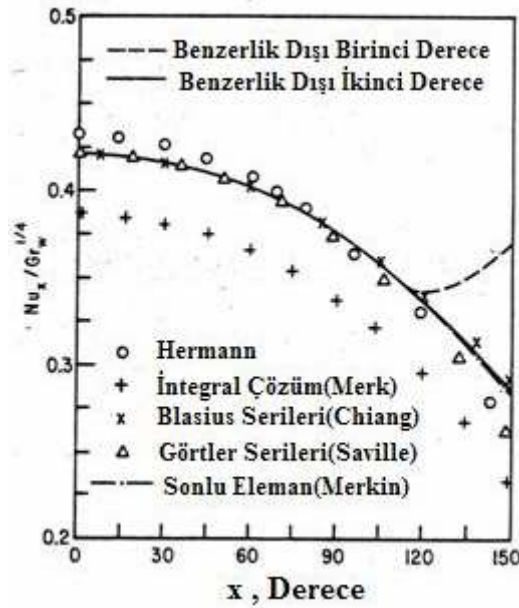
Şekil 2.5 Serbest taşınım şartlarında, ısıtılan yatay silindirik yüzeyde ve üzerinde oluşan akışın resmi (Pera ve Gebhart, 1971)

Ters U şeklindeki cismin her iki dik yüzeyinden dikey bir sınır tabaka geliştiğini ve silindirik yüzeyde devam ederek yüzey üzerinde birleşip şekilde görüldüğü gibi akışa devam ettiklerini söylemişlerdir. Daha çok zorlanmış taşınım ile ilgili olan ters akış ve sirkülasyonun gözlenmediği belirtilmiştir.

Muntasser ve Mulligan (1978), serbest taşınım şartlarında, sabit sıcaklıktaki yatay silindir yüzeyinden ısı geçişi problemini yerel benzerlik dışı (local nonsimilarity) metodunu kullanarak çözmüşlerdir. Bu problemin literatürde analitik olarak birçok defa incelendiğini belirtmişler ve çalışmalarının sonuçlarını diğer araştırmacılarınkilerle karşılaştırmışlardır. Serbest taşınımın yatay silindir çevresi boyunca değişimi incelenmiş ve sonuçlar alt yığılma noktasından itibaren 150° 'ye kadar verilmiştir. Farklı Pr sayıları için değişik açılardaki 1.derece ve 2.derece benzerlik yöntemi kullanılarak hesaplanan $Nu / Gr_w^{1/4}$ sonuçları ve aritmetik ortalamaları $Nu_m / Gr_w^{1/4}$ Çizelge 2.5'de verilmiştir. Ayrıca aynı çizelgede diğer araştırmacıların ampirik korelasyonları sonucunda elde edilen ortalama değerler de gösterilmiştir. $Pr=1$ için hesaplanan yerel değerlerle diğer araştırmacıların farklı yöntemlerle elde ettikleri değerler Şekil 2.6'da karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.5 Farklı Pr sayılarında ve azimut açılarında yerel Nu sayısı ve Grashof sayısı arasındaki oranın $Nu / Gr_w^{1/4}$ değişimi

Pr	0.72		0.733		1.0		5.0		10.0	
x	Birinci	İkinci	Birinci	İkinci	Birinci	İkinci	Birinci	İkinci	Birinci	İkinci
0	0.3743	0.3745	0.3768	0.3770	0.4216	0.4214	0.7169	0.7142	0.8821	0.8822
30	0.3697	0.3700	0.3722	0.3724	0.4164	0.4162	0.7075	0.7051	0.8703	0.8699
60	0.3565	0.3567	0.3588	0.3590	0.4013	0.4010	0.6798	0.6790	0.8356	0.8350
90	0.3347	0.3344	0.3368	0.3365	0.3762	0.3753	0.6330	0.6325	0.7765	0.7753
120	0.3062	0.3020	0.3081	0.3039	0.3427	0.3379	0.5665	0.5617	0.6912	0.6877
150	0.3424	0.2598	0.3442	0.2611	0.3704	0.2853	0.5276	0.4485	0.6163	0.5435
AritmetikOrt	0.3473	0.3329	0.3500	0.3350	0.3881	0.3729	0.6386	0.6235	0.7787	0.7656
Jodbauer	0.3330		0.3354		0.3789		0.6512		0.7435	
Churchill	0.3040		0.3060		0.3397		0.5813		0.7150	
Morgan	0.3718		0.3734		0.4036		0.6035		0.7178	
Hermann	0.3106		0.3128		0.3534		0.6073		0.7401	

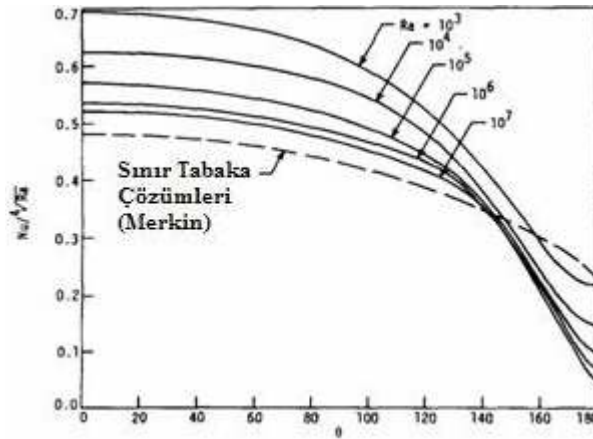


Şekil 2.6 Yatay silindirde $Pr=1$ için yerel ısı taşınımının çevresel değişimi

Birinci dereceden sonuçların, Merkin'in sonlu farklar denklemi ile $x=120^\circ$ 'ye kadar uyum içinde olduğu, sapmaların %1,87'yi geçmediği, fakat $x>120^\circ$ den sonra sapmaların arttığı ve 150° de %30'a ulaştığı söylenmiştir. 1. ve 2.dereceden sonuçlar arasındaki farkın ihmal edilebilecek kadar az olduğu belirlenmiştir. Herman'ın sonuçlarının 90° de en doğru ve tutarlı değerleri verdiği, yüksek açılarında ise, 2. derece sonuçları ile arasındaki sapmanın arttığı belirtilmiştir. 2. derece ile Görtler serileri arasındaki farkın 150° de %9 mertebelerinde olduğu, ön tarafta ise ihmal edilebileceği söylenmiştir. 2.dereceden benzerlik dışı yöntem

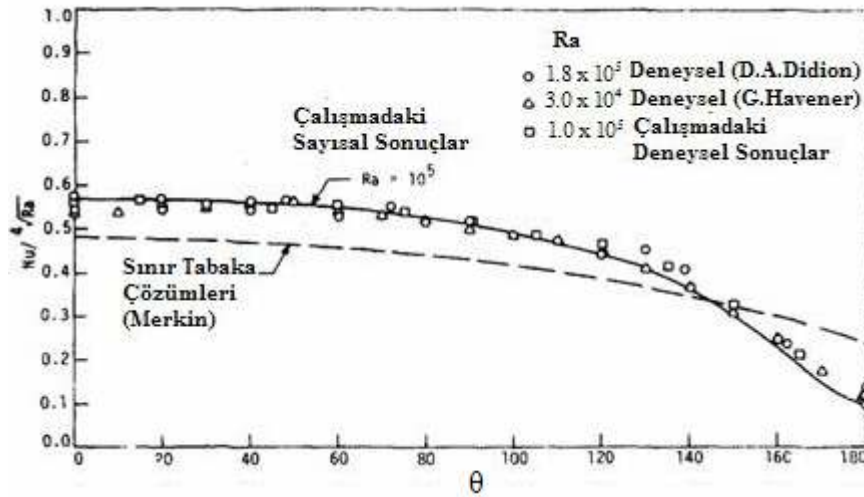
kullanılarak elde edilen ortalama değerler, Churchill'in sonuçlarından %9, Merger'in sonuçlarından %10, Jodlbawr'in sonuçlarından %4 daha fazladır. Burada ilgilenilen Pr sayılarının ortalama değerleri için Jodlbawer'in ampirik ifadesinin Merk ve Prins'in Pr sayısı entarpolasyon formülünü kullanarak düzeltilmesi ile elde edilen sonuçların en doğru olduğu belirlenmiştir.

Kuehn ve Goldstein (1979) tarafından yapılan çalışmada, laminar doğal taşınım şartlarında, sabit sıcaklıktaki yatay silindirden ısı geçişi problemi, Navier Stokes ve enerji eşitlikleri nümerik yöntemler kullanılarak çözülmüş olup sonuçların $10^0 \leq Ra \leq 10^7$ aralığında geçerli olduğu belirtilmiştir. Çalışma teorik ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Tanımlanan Ra aralığında yapılan sınır tabak çözümlerinin, eğrilik etkilerinin ihmal ve sınır tabaka kabullerinden dolayı, akışı ve ısı geçişini açıklamak için yeterli olmadığı söylenmiştir. Eliptik denklemlerin sayısal çözümü için sonlu fark yöntemi kullanılmıştır. $Ra=10^4$ için sınır tabaka kalınlığının yaklaşık olarak silindir yarıçapına eşit olduğu ve eğrilik etkilerinin ihmal edilmemesinden dolayı, sınır tabaka denklemlerinin doğru sonuçlar vermeyeceği belirtilmiştir. Fakat irdelemede $Ra=10^6$ için sınır tabakanın daha ince oluşacağı bu yüzden sınır tabaka denklemlerinin doğru sonuçlar vereceği belirtilmiştir. $Ra=10^5$ için $0^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ aralığında radyal sıcaklık profilinin sınır tabakadakine benzer olduğu belirlenmiş olup açı değeri arttıkça oluşan akış karakterinin sıcaklık dağılımını değiştirdiği söylenmiştir. $Pr=0,7$ için lokal ısı geçiş katsayıları, θ açısı ve Ra 'nın fonksiyonu olarak verilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için Merkin tarafından bulunan sınır tabaka denklemlerinin nümerik sonuçlarına da yer verilmiştir. Fakat $\theta=0$ olsa dahi $Ra=10^7$ de Merkin'in değerinden %9 daha büyük olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple $\theta > 130^\circ$ için sınır tabaka çözümlerinin, ısı geçişi için yeterli bir yaklaşım olmayacağı belirtilmiştir.



şekil 2.7 Ra sayısının yerel ısı geçiş katsayısına etkisi

Deneysel çalışma kapsamında, 3,56 cm çapında ve 20,3 cm boyunda ısıtılan yatay bir silindir için doğal taşınım şartlarının sağlanması ile oluşturulan ısı geçişi deneysel olarak incelenmiştir. $Ra=10^5$ ve $Pr=0.7$ için $\theta=90^\circ$ ve $\theta=180^\circ$ 'de hesaplanan sıcaklık dağılımları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış, $\theta=90^\circ$ için değerlerin uyumlu olduğu saptanmıştır. $Ra=10^5$ ve $Pr=0.7$ değerleri için nümerik sonuçlar, yapılan deneysel çalışmanın sonuçları, eldeki diğer çalışmaların deneysel verileri ve Merkin'in sınır tabaka çözümleri Şekil 2.8'de karşılaştırılmış ve değerlerin uyumlu olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.8 $Ra=10^5$ için deneysel ve teorik hesaplanan ısı geçiş katsayılarının karşılaştırılması

Fand v.d. (1977), yapmış oldukları çalışmada, doğal taşınım şartlarında, yatay silindirden havaya, suya ve üç farklı silikon yağına olan ısı geçişini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma aralığı $Ra=2,5 \cdot 10^2 \div 1,8 \cdot 10^7$; $Pr=0,7 \div 3090$ olarak belirlenmiş olup, elde edilen deneysel datalarla aynı formda üç farklı korelasyon oluşturulmuştur. θ

Ayrıca viskoz yayılım etkisinin ne derecede etkili olduğu çalışma kapsamında tartışılmıştır. Detaylı bir literatür araştırması yapılmış ve sonuçta Morgan'ın bağıntıları ile Kutateladze'nin ve diğerlerinin arasında temel farklar olduğu belirlenmiştir. ($Nu_{Morgan}=f(Ra)$ - $Nu_{Kutateladze}=f(Pr,Ra)$). Bu nedenle, deneysel verilerin de ışığında hangi yaklaşımın doğru olduğunun anlaşılması ve yeni bağıntıların oluşturulması çalışmanın temel amacı olarak belirlenmiştir. Çapı 19,45cm yüksekliği 124,5cm ölçülerinde olan silindirik bir tank içinde çapı $d=11,57$ cm olan yatay bir boru ile deney düzeneği hazırlanmış ve deneyler su ve üç farklı silikon yağı kullanılarak yapılmıştır. Hava için kullanılan deneysel veriler ise Fand (1961) çalışmasından alınarak değerlendirilmiştir. Sıcaklık ölçümü test borusu yüzeyine 90° 'lik fark ile yerleştirilen termoelemanlar ile yapılmıştır.

Ayrıca test borusu su içinde 30^0 döndürülerek ΔT hesaplanmış $\Delta T = (T_0 - T_\infty)$ ve bu değerin tüm ısı akılarındaki ortalamasının test borusunun açısal durumuna göre değişiminin çok az olduğu $\Delta(\Delta T) / \Delta T \leq 0.027$ belirtilmiştir. Ayrıca ışınlama ısı geçişinin toplam verilenin %0,1 ‘den az olduğu hesaplanmış ve ihmal edildiği söylenmiştir. Bu çalışmada serbest taşınım şartlarında, yatay silindirden ısı geçişi için üç farklı hipotez ifade üretilmiştir.

$$Nu_f = C.Ra_f^{0,25}.Pr_p^m \quad (2.39)$$

$$Nu_j = C.Ra_j^{0,25}.Pr_j^m \quad (2.40)$$

$$Nu_n = C.(Gr_g.Pr_p)^{0,25}.Pr_p^m \quad (2.41)$$

Tüm hipotez ifadelerin aynı cebirsel düzende olduğu ve birbirinden ayrılan noktalarının, sıcaklığın fonksiyonu olan akışkan fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan farklı metodlardan kaynaklandığı belirtilmiştir.

$$Nu_f = 0,474.Ra_f^{0,25}.Pr_f^{0,04} \quad T_f = T_\infty + 0,5(T_0 - T_\infty) \quad (2.42)$$

$$Nu_j = 0,478.Ra_j^{0,25}.Pr_j^{0,050} \quad T_j = T_\infty + j(T_0 - T_\infty) \quad j = 0,32 \quad (2.43)$$

$$Nu_n = 0,456.(Gr_g.Pr_p)^{0,25}.Pr_p^{0,057} \quad n = 0,2 \quad p = g = 0,5 \quad (2.44)$$

veya

$$Nu_n = 0,456.Ra_y^{0,25}.Pr_p^{0,057} \quad n = 0,2 \quad p = y = 0,5 \quad Pr_p = Pr_s(Pr_b/Pr_s)^p \quad (2.45)$$

Oluşturulan bu üç eşitlik ile Kutateladze, Mikheyeva, Churchill, Raithby ve Morgan’ın eşitlikleri deneysel veriler ile karşılaştırılarak sapmalar hesaplanmış ve tablo halinde verilmiştir. Çalışmada oluşturulan her üç eşitlikteki sapmaların da diğerlerinden az olduğu belirtilmiş ve sebepleri tartışılmıştır.

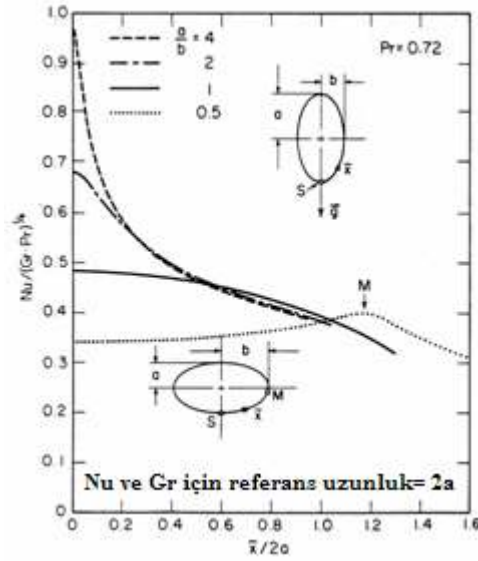
Yazarlar, aradaki farkın sadece Ra sayısı ile hesaplanamayacak ve serbest taşınımda yatay silindirden ısı geçişi problemleri için genellikle ihmal edilen viskoz yayılım etkisinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca viskoz yayılım etkisinden kaynaklanan sapmaların Ra sayısı azaldıkça artacağı ($Ra=10^4$ için %20, $Ra=3.10^2$ için %30) vurgulanmıştır.

Fand ve Brucker (1982), sabit sıcaklıktaki yatay bir silindir etrafındaki serbest taşınım olayı üzerinde yapılan önceki çalışmalardan elde edilen sekiz adet ampirik veya yarı ampirik bağıntıyı ve oluşturulan yeni bağıntıyı, literatürde $10^{-8} < Ra < 10^8$ ve $0,7 < Pr < 10^4$ aralığında yapılmış olan deneysel dataları kullanarak karşılaştırmış ve bu sekiz ifadenin birbirleriyle pek uyuşmadığını belirlenmiştir. Örneğin hava için $R=1$ değerinde Churchill ve Raithby'nin eşitliklerinden hesaplanan Nu değerleri arasında %50 fark olduğu görülürken, aynı şekilde bu çalışmaya konu olan Ra sayıları için hesap yapılması halinde ($Ra=10^5$ ve $Pr=0,7$), farkın %43 olduğu belirtilmiştir. Belirlenen bu farkların, serbest taşınımında genellikle ihmal edilen viskoz yayılım etkisinden kaynaklandığı düşünülerek, bu etkinin, birimsiz bir parametre olarak Pr ve Ra sayılarının yanında Nu sayısının fonksiyonu olması amaçlanmıştır. Bu düşünceyle eldeki veriler kullanılarak aşağıda gösterilen yeni bir Nu ifadesi tanımlanmıştır: $Nu=f(Pr,Ra,Ge)$

$$Nu=0,400Pr^{0,0433}Ra^{0,25}+0,503Pr^{0,0334}Ra^{0,0816}+0,958Ge^{0,122}/Pr^{0,06}Ra^{0,0511} \quad (10^{-8}<Ra<10^8) \quad (2.46)$$

Gebhart sayısı, $(Ge = g.\beta.D/c_p)$ serbest taşınımında viskoz yayılım etkisini ifade eden boyutsuz bir sayıdır. Önceki çalışmalardan alınan deneysel veriler gruplanarak, diğer bağıntılar ve son oluşturulan bağıntının değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Hesaplanan sapmalar istatistikî olarak değerlendirildiğinde oluşturulan son bağıntının en uygun olduğu belirtilmiştir.

Lin ve Chao (1974), yaptıkları teorik çalışmada, sabit sıcaklıktaki düzgün yüzeylerde laminar serbest taşınımında, iki boyutlu veya asimetric sınır tabakadaki ısı geçişini belirleyebilmek için hızlı bir hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir. Hesaplamalar için seri çözümler kullanılmış ve sonuçlar yatay dairesel ve eliptik silindir ile küre için tekrarlanmıştır. Yatay silindir için elde edilen sonuçlar, Blasius ve Görtler serilerinin kullanıldığı önceki çalışmalar ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Dairesel silindirin rasgele boyutlarda eliptik olması halinde ısı geçiş katsayılarının Nu sayısına bağlı olarak ne şekilde değişeceği elde edilen eşitliklerden hesaplanabilmektedir. Hesaplanan değerler grafik halinde sunulmuştur.



Şekil 2.9 Sabit sıcaklıktaki yatay ve eliptik silindirdeki ısı geçişi, $Pr=0,72$ (Lin ve Chao, 1974)

Kuehn ve Goldstein (1976), yapmış oldukları çalışmada, bir iletim sınır tabaka modeli kullanarak, doğal taşınım şartlarında yatay silindirden, silindirik kapalı bir hacme olan ısı geçişi için yeni korelasyonlar oluşturmuşlardır. Korelasyonların, dış silindirik cisim içinde eş ve dış eksenli silindirleri veya sıralı silindir geometrilerini kapsadığını söylemişlerdir. Çalışma laminar ve türbülanslı akış durumları için yapılmış ve daha önce oluşturulan bağıntılar kullanılarak geliştirilmiştir. İç içe geçmiş farklı yüzey sıcaklıklarındaki iki silindirde oluşacak ısı geçişinin aradaki akışkan üzerinden doğal taşınım ile oluşacağı belirtilmiştir. Ayrıca yüzeylere yakın kısımda, bir iletim filmi varsayılmış ve bunun ısı direnç yaratacağı düşünülmüştür. Isıl enerjinin de iç film tabakasından dış film tabakasına taşınım yoluyla kayıpsız olarak geçeceği temel alınarak korelasyonlar oluşturulmuştur. Sonuç olarak elde edilen eşitliklerle doğal taşınım şartlarında iki yatay eş veya dış eksenli silindir için ısı geçişi sonuçlarının korele edilebileceği belirtilmiştir.

Incropera ve Yaghoubi (1979), yatay silindirik kaynaklarla ısıtılan ve yukarıdan hava ara yüzeyi ile soğutulan sığ su tabakasındaki şartların incelenmesi için, sıcaklık ölçümü yapmışlar ve akımı incelemişlerdir. Deneyleri $10^5 < Ra < 10^6$ aralığında tek ve beşli dizili silindirler için yapmışlardır. Doğal taşınım şartlarında silindir yüzeyinde gelişen sınır tabakanın laminar olduğunu ve yukarıya doğru ayrılma olmadan devam eden akışın silindir üzerinde oluştuğunu söylemişlerdir. Silindir yüzeyinde oluşup yukarı doğru devam eden laminar akışın, hava ara yüzeyi ile etkileşimi sonucu yatay türbülanslı karıştırıcı bir tabakanın oluştuğu anlatılmıştır. Akıştaki bu etkileşimin farklı şekillerde olabileceği ve bu olayın su derinliği ile silindir çapı

arasındaki orana bağılı olarak değişeceği belirtilmiştir. Bu oran yükseklik oranı olarak tanımlanmış ve artışı ile yüzeydeki dalgalanmanın büyüklüğünün ve periyodunun artacağı söylenmiştir. Sonuç bölümünde bu oranın değiştirilmesi ile akışın karakterinin değişiminin ne şekilde olacağı tartışılmıştır.

Warrington v.d. (1987), sonsuz akışkan ortamı ve kapalı akışkan ortamında doğal taşınım şartlarında ısı geçişini incelemiş ve ilgili korelasyonları karşılaştırmışlardır. Sonsuz akışkan ortamında en uygun korelasyonun Jakob tarafından verilen $Nu_D = 0,52(Ra_D)^{0,25}$ olduğunu belirtmiştir. Kapalı hacimler için oluşturulacak korelasyonlarda, sonsuz akışkan için oluşturulan korelasyonlardaki boyutsuz parametrelere ek olarak karakteristik boyutların oranını ifade eden bir parametre daha eklenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu parametre aralık-genişlik oranı $(R_0 - R_i)/R_i$ veya L/R_i olarak tanımlanmıştır. Warrington ve Powe'nın küp, silindir ve küreden, kübik kapalı hacme olan ısı geçişi için yukarıda tanımlanan kuramsal oranı kullanarak, bir korelasyon oluşturdukları belirtilmiştir. Bu korelasyon $Nu_b = 0.585(Ra_b^*)^{0.236}$, $(Ra_b^* = Ra.(L/R_i))$ şeklinde tanımlanmış olup, kapalı hacimler için en uygun korelasyon olduğuna karar verilip, karşılaştırma yapılmıştır. Küp ve silindir için elde edilen veriler ile bu iki korelasyon kullanılarak elde edilen değerler hesaplanmış ve oluşan sapmalar yüzdesel olarak tablo halinde verilmiştir. L/R_i oranının artışı ile kapalı hacimler için oluşturulan korelasyon ile sonsuz akışkan için belirlenen korelasyonun ısı geçiş sonuçlarının birbirine yaklaştığı hesaplanmış ve grafik olarak gösterilmiştir. Ayrıca yatay silindirde $Ra = 2,9.10^4 \div 9.10^8$ aralığında $L/R_i = 2,28 \div 5,89$ için bu oranın ilgili denklemlerin doğruluğuna etkisinin az olduğu ve bu aralıktaki orana sahip kapalı hacimlerde ısı geçişi üzerine etkisinin de az olduğu belirtilmiştir.

Kitumura v.d. (1999), yaptıkları deneysel çalışmada doğal taşınım şartlarında su içindeki yatay silindirde ısı geçişini ve akışı incelemiştir. Çapları $60 \div 800$ mm arasında değişen silindirler sabit ısı akısında ısıtılarak, $Ra_D^* = 3.10^8 \div 3,6.10^{13}$ ($Ra_D^* = g.\beta.q_0.D^4 / \lambda \alpha \nu$) aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Silindir etrafındaki akış alanları ve yüzey sıcaklıkları gözlenerek türbülanslı bölgeye geçiş ve bunun ısı geçişine etkisi araştırılmıştır. Sınır tabaka ayrılmasının $Ra_D^* = 2,1.10^9$ değerinde görülmeye başladığı ve Rayleigh sayısı arttıkça ayrılmanın başlangıcının yığılma noktasına doğru kaydığı anlaşılmıştır. Türbülanslı akışta, ayrılmanın aşağı noktalarda olduğu yüksek Ra sayılarında olduğu belirtilmiştir. Yerel ısı geçiş katsayıları da ölçülmüş, geçiş ve türbülanslı bölgede arttığı sonucuna varılmıştır.

Elde edilen ortalama Nu korelasyonları,

$$Nu_D = 0,6.Ra_D^{*0,2} \quad (3.10^8 < Ra_D^* < 2,5.10^{10}) \quad \text{ve} \quad Nu_D = 0,23.Ra_D^{*0,24} \quad (2,5.10^{10} < Ra_D^* < 3,6.10^{13})$$

önceki deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Düşük Ra aralığı için verilen korelasyonun uyum içinde olduğu fakat ikinci korelasyon ile hesaplanan Nu sayılarının öncekilerden %15 düşük olduğu görülmüştür. Bunun iki farklı sebepten kaynaklanabileceği açıklanmıştır.

- Daha önceki çalışmalar hava ortamında bu deneysel çalışma ise su içinde gerçekleştirilmiştir. Sapmaların test akışkanının Pr sayılarından kaynaklanabileceği belirtilmiştir.
- Daha önceki çalışmalarda oluşturulan korelasyonlar için kullanılan deneysel datalar birçok ayrı çalışmadan temin edilerek, ortalamaları alınmıştır. Buradaki çalışmada alınan basit ortalama gerçek Nu sayısına olan farkı oluşturmuş olabileceği düşünülerek deneylerin bir sonraki çalışmada hava ortamında tekrarlanmasına karar verilmiştir.

Toshiyuki v.d. (2003), bir önceki çalışmada planlanan deneysel çalışmayı hava içinde gerçekleştirmişlerdir. Esas ilgilenilen konuların, türbülanslı rejim bölgesi ve türbülanslı akım karakteri olduğu belirtilmiştir. Çapları 200÷1200 mm arasında değişen silindirler üniform ısı akısında ısıtılarak, ($Ra_D^* = 1.10^8 \div 5,5.10^{11}$) aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Silindir etrafındaki akış alanları ve yüzey sıcaklıkları duman kullanılarak gözlenmiş, türbülanslı bölgeye geçiş ve bunun ısı geçişine etkisi araştırılmıştır. Sınır tabaka ayrılmasının $Ra_D^* = 3,5.10^9$ değerinde görülmeye başladığı ve Ra arttıkça ayrılmanın başlangıcının yığılma noktasına doğru doğru kaydığı anlaşılmıştır. Türbülanslı akışta, ayrılmanın aşağı noktalarda olduğu yüksek Ra sayılarında olduğu belirtilmiştir. Yerel ısı geçiş katsayıları da ölçülmüş, geçiş ve türbülanslı bölgede arttığı sonucuna varılmıştır. Hava ortamında yapılan deney sonuçları daha önceden suda yapılan deneysel veriler ile karşılaştırılmış, Pr sayısının akım ve ısı geçişi üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Türbülanslı rejimde yatay boru için yapılan çalışmalar analiz edilmiş ve sonuçta, silindir yüzeyinde nasıl ve nerede türbülanslı akımın olduğu, hangi parametrelerin etkili olduğu sorularının cevabının verilemediği söylenmiştir. Deneyler hava ortamında yapıldığı için ışıının etkisi hesaba katılarak enerji dengesinde toplam ısı akısının, taşınım ve ısınım ile ortama geçtiği düşünülmüştür. Ayrılma noktalarının sudakine göre daha kuvvetli hareket ettiği ve dış ortamdan ciddi olarak etkilendikleri gözlenmiştir. Tam türbülanslı rejimde Nu sayısının sabit kalacağı söylenmiş fakat burada maksimum Ra sayısının hesaplandığı 1200 mm çapındaki boru için yapılan deneylerde dahi tam türbülanslı rejimin gerçekleştirilemediği anlaşılmıştır.

Elde edilen korelasyonlar,

$$Nu_D = 0,4.Ra_D^{*0,21} (1.10^8 < Ra_D^* < 1.10^{10}) \text{ ve } Nu_D = 0,126.Ra_D^{*0,26} (1.10^{10} < Ra_D^* < 5,5.10^{11})$$

önceki deneysel veriler ve suda yapılan deneyler sonucunda elde edilen korelasyonlar ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan Nu sayılarının öncekilerden %15-20 düşük olduğu, suda yapılan deneyler sonucunda elde edilen korelasyonlar ile hesaplanandan da düşük olduğu görülmüştür. Su ortamında yapılan deneylerde hesaplana Nu sayılarının yüksek olmasının sebebinin ısı geçişinin laminar rejimde olmasından kaynaklandığı söylenmiştir. Kuehn ve Goldstein (1979)'ın Pr sayısının laminar rejimde ısı geçişi üzerine etkisini nümerik olarak inceledikleri çalışmalarında, Pr sayısı ile Nu sayısının orantılı artacağı sonucunu buldukları hatırlatılmış, bu sonucun Nu sayısındaki düşüşün sebebini açıkladığı belirtilmiştir. Diğer çalışmalarda hesaplanan Nu sayılarından küçük değerler elde edilmesinin sebepleri ise iki maddede özetlenmiştir.

- Daha önceki çalışmalarda oluşturulan korelasyonlar için kullanılan deneysel veriler birçok ayrı çalışmadan temin edilerek, ortalamaları alınmıştır. Buradaki çalışmada alınan basit ortalamaların farkın sebebi olabileceği
- Önceki çalışmalardaki deney düzeneği ve ölçüm teknikleri hakkında detaylı bilgiye ulaşamadığı, bu nedenle elde edilen korelasyonların gerçek Nu sayısını temsil edip etmediğinin şüpheli olduğu söylenmiştir.

2.3 Yatay Boruda Eşzamanlı Isı ve Kütle Geçişini Konu Alan Çalışmalar

H.Saraç v.d. (1991), serbest taşınım şartlarında yatay silindirik elektrottan, eş zamanlı ısı ve kütle geçişini, elektrokimyasal limit difüzyon akımı tekniğiyle deneysel olarak incelemiştir. Taşınımsal akışı Schlieren fotoğraf tekniği kullanarak, gözlemlemiştir. Bu çalışmada farklı kombinasyonlarda, elektro aktif bileşen konsantrasyonu, silindir çapı ve silindir yüzey sıcaklığı kullanarak deneyleri tekrarlamıştır. Elektrokimyasal proseste iyon kütle geçişinin doğal taşınım, ısı geçişi ile birlikte, elektrot- elektroliz ara yüzeyinde meydana geldiğini ve bu çalışmada ısı geçiş hızlarının eş zamanlı destekler yönündeki ısı taşınım etkisi altında ölçüldüğünü vurgulamıştır. Katot olarak yatay bakır silindir, anot olarak ise 25x15cm ölçülerinde iki adet ince bakır levha kullanmıştır. Elektrolit çözeltisini H₂SO₄ ve CuSO₄ karışımından oluşturmuştur. Silindir çapının kütle geçiş hızlarına etkisini analiz edebilmek için L=100 mm uzunluğunda ve 28,2 -22,0 -15,0 mm çapında üç farklı katot için deneyleri tekrarlamıştır.

Ayrıca derişiklik farkının etkisini görebilmek amacıyla 1,5M H₂SO₄ içine farklı derişiklik değeriinde (0,015 - 0,028 - 0,140 - 0,125 - 0,225 M) CuSO₄ katarak deneyleri yapmıştır. Yığın sıvı sıcaklığını cıvalı termometre ile ve çözeltinin farklı yerlerine yerleştirilen termoelemanlarla okumuş ve 19 °C’de sabit tutmuştur. Katot yüzey sıcaklığını artırabilmek amacıyla içinde rezistans teli yerleştirmiş ve deneyleri dört farklı katod yüzey sıcaklığında yapmıştır (19 – 25 – 40 – 60 °C). Yüzey sıcaklıklarını termoelemanlar ile ölçmüştür. Sonuçta elde edilen deneysel verileri kullanarak kütle geçişi için aşağıdaki korelasyonları önermiştir.

$$Sh=0,53(GR_m.Sc)^{1/4} \quad 7 \times 10^7 < GR_m.Sc < 4 \cdot 10^9 \quad (2.47)$$

$$Sh=0,018(GR_m.Sc)^{2/5} \quad 4 \times 10^9 < GR_m.Sc < 10^{11} \quad (2.48)$$

H.Saraç v.d.(1993), serbest taşınım şartlarında yatay silindir elektrottan eş zamanlı ısı ve kütle geçişini, derişiklik ve ısı kaldırma etkilerinin birbirlerine zıt yönlü olduğu durumda elektrokimyasal limit difüzyon akım tekniği yardımıyla, deneysel olarak incelemiştir. Elektrokimyasal proseste, katot olarak yatay nikel silindir, anot olarak ise 20 x 15 cm ölçülerinde iki adet ince nikel levha kullanılmıştır. Kütle geçişi ölçümleri için, ferri-ferrocyanide redoks sistemi seçilmiştir. Farklı derişiklik değeriinde (0,01 ; 0,02 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 M) potasyum ferri-ferrocyanide ile destekleyici elektrolit olarak 0,5M NaOH kullanılmıştır. Silindir çapının kütle geçiş hızlarına etkisini analiz edebilmek için L=100 mm uzunluğunda ve 33,2 – 21,3 mm çapında iki farklı katot(nikel silindir) için deneyleri tekrarlamıştır. Daha önceki çalışmada olduğu gibi taşınımsal akışı Schlieren fotoğraf tekniği kullanarak, gözlemlenmiştir. Yığın sıvı sıcaklığını cıvalı termometre ile ve çözeltinin farklı yerlerine yerleştirilen termoelemanlarla okumuş ve 20 °C’de sabit tutmuştur. Katot yüzey sıcaklığını artırabilmek amacıyla içinde rezistans teli yerleştirmiş ve deneyleri yedi farklı katod yüzey sıcaklığında yapmıştır (20 – 22 – 25 – 40 – 60 – 70 – 85 °C). Yüzey sıcaklıkları termoelemanlar ile ölçmüştür. Sonuçta deneysel verileri kullanarak derişiklik ve ısı kaldırma etkilerinin birbirlerine zıt yönlü olduğu durumda, aşağı ve yukarı doğru taşınım için aşağıdaki korelasyonları önermiştir.

$$Sh=0,42(GR_m.Sc)^{1/4} \quad 10^8 < GR_m.Sc < 4 \cdot 10^9 \quad (2.49)$$

$$Sh=0,0155(GR_m.Sc)^{2/5} \quad 4 \times 10^9 < GR_m.Sc < 10^{11} \quad (2.50)$$

Hasan ve Mujumdar (1985), serbest taşınım şartlarında, yatay boru yüzeyinden eş zamanlı ısı ve kütle geçişinde, kararlı laminar sınır tabakayı iki yaklaşık yöntem kullanarak teorik incelemiştir.

Çalışmada yerel benzerlik (local similarity) ve yerel benzerlik dışı (local nonsimilarity) yöntemleri kullanılmıştır. Yerel Nu sayısı, yerel Sh sayısı ve yerel yüzey gerilimi sonuçları tablo halinde verilmiştir. Problemde kullanılan parametrelerin (Pr, Sc, N) aralığı, doğada ve teknik proseslerde genellikle meydana gelen halleri kapsayacak şekilde seçilmiştir. Hesaplamalar su buharı ve naftalinin atmosferik havaya difüzyonu düşünülerek, derişiklik ve ısı kaldırma etkilerinin birbirlerini destekler yönde veya zıt yönde olmaları halleri için tekrarlanmıştır. Diğer eş zamanlı ısı ve kütle geçişini konu alan çalışmalarda değinildiği gibi, $N=0$ halinin sadece ısı geçişini, $N<0$ 'ın zıt yönlü kaldırma kuvvetlerinin oluştuğu hali, $N>0$ 'ın ise ısı ve derişiklik kaynaklı kaldırma etkilerinin birbirini destekler yönde olduğu hali tanımladığı belirtilmiştir.

Eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için iki farklı yöntemle göre yapılan hesaplamalar sonucunda $Pr=0,7$ ve $Sc=0,63-2,57$ değerleri için yerel Sh ve Nu sayıları, N sayısına bağılı olarak $(-0,5-0,5-2)$ $Sh_{D,w} = c.(Gr_{DC,w})^{1/4}$, $Nu_{D,w} = c.(Gr_{D,w})^{1/4}$ formunda, tablo halinde verilmiştir.

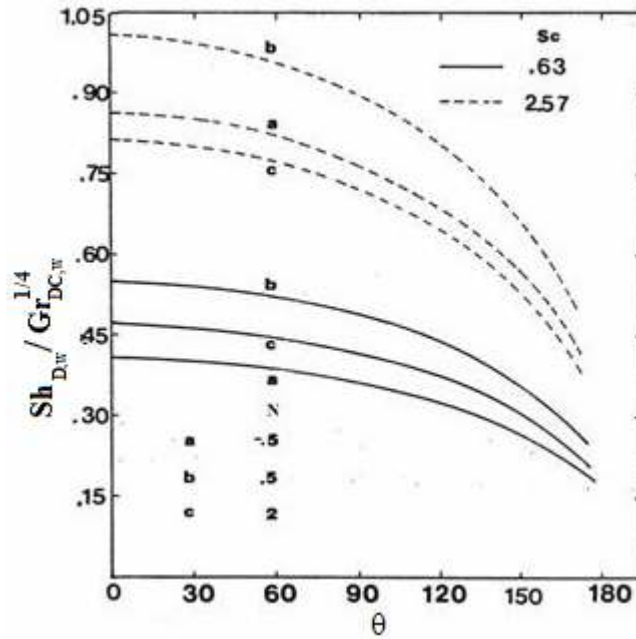
Sadece ısı geçişi için yapılan sayısal çalışma sonuçları ise, $Pr=0,7$ için yerel Nu sayıları $Nu_{D,w} = c.(Gr_{D,w})^{1/4}$ formunda tablo halinde verilerek, diğer araştırmacıların sayısal sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sadece ısı geçişi için olan çalışma, elde edilen sonuçları, literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırarak doğruluğunu görmek ve eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için yapılan sayısal çalışma sonuçlarını karşılaştırabilmek için gerçekleştirilmiştir.

Hasan ve Mujumdar (1987), serbest taşınım şartlarında, yatay boru yüzeyinden eş zamanlı ısı ve kütle geçişini, analitik incelemişlerdir. Silindir yüzeyi uniform sıcaklık ve derişiklikte olduğu kabul edilmiştir. Çalışmada spesifik olarak su buharı ve naftalinin atmosferik havaya difüzyonu incelenmiştir. Kütle difüzyonundan oluşan kaldırma kuvvetinin ısı kaldırma kuvveti ile aynı ve zıt yönlü olması durumunda, net serbest taşınıma bağılı olarak, yerel Nu ve Sh sayılarının sırasıyla arttığı veya azaldığı anlaşılmıştır. Sc sayısının azalması ile yerel Nu sayısının arttığı ve Sc sayısının artışı ile de yüzey kütle geçişinin arttığı belirlenmiştir. Isıl kaldırma kuvvetinin artışı ile Sh sayısının daha etkili hale geldiği görülmüştür.

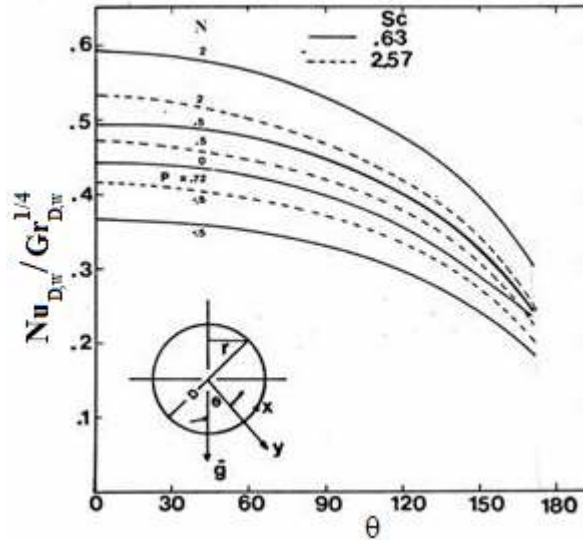
Analizler için yerel benzerlik yaklaşımları yapılmıştır. Problemde kullanılan parametreler Pr, Sc sayıları ile, kütle kaldırma kuvvetinin ısı kaldırma kuvvetine oranı olarak tarif edilen ve N sayısı olarak tanımlanan değerlerdir. Bu parametrelerin sınır tabakadaki net kaldırma kuvvetinin dağılımını yönlendirdikleri belirtilmiştir. Herhangi bir durumda iki etkinin ters olmaları halinde ($N<0$) ve $Sc/Pr=1$ için, toplam kaldırma kuvvetinin sınır tabaka boyunca pozitif kalıp kalmayacağını bilmediği söylenmiştir.

Hesaplanan akışın yerel olarak döneceği veya fiziksel olarak mantıksız bir hale geleceği de bilinmemektedir. Bu tip durumlar için, N sayısının kritik bir negatif değeri olduğu ve bu değerde, kaldırma kuvvetinin sıfırlanarak ısı ve kütle taşıma akışının olamayacağı açıklanmıştır. N değerinin daha da azaltılması durumunda, akışın yönünü değiştireceği ve fiziksel olarak mantıklı sonuçlar elde edebilmek için momentum denklemindeki kaldırma kuvveti teriminin işaretinin değiştirilmesi veya koordinatların tekrardan tanımlanması gerekeceği belirtilmiştir. Bu çalışmada akışı durduracak parametreler seçilerek N 'nin kritik değerinin belirlenmesiyle ilgili araştırma yapılmamıştır. Kullanılan Sc ve Pr sayılarında $N = -0,5$ için yapılan incelemede, akışın ters dönüşünün oluşmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca $Sc=Pr$ için $N=-1$ değerinde sıcaklığa bağlı kaldırma kuvvetinin derişiklik farkına bağlı kaldırma kuvvetini dengelediği söylenerek, $R=-1$ 'in kritik değere uygun geldiği belirtilmiştir.

Yığılma noktasından itibaren yerel olarak Sh ve Nu sayılarının değişimi grafik halinde verilmiştir. $Pr=0,72$ için $Sc=0,63 - 2,57$ ve üç farklı N ($-0,5$; $0,5$; 2) değerinde hesaplamalar yapılmıştır.



Sekil 2.10 Yerel Sh sayılarının açısal değişimi (Hasan ve Mujumdar 1987)



Şekil 2.11 Yerel Nu sayılarının açısal değişimi (Hasan ve Mujumdar 1987)

Kaynak araştırması sonucunda, serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi üzerine yapılan teorik ve deneysel birçok çalışma olduğu belirlenmiştir. Teorik çalışmalarda, yapılan sınır tabaka çözümlerinin, eğrilik etkilerinin ihmali ve sınır tabaka kabullerinden dolayı, akışı ve ısı geçişini açıklamak için yeterli olmadığı vurgulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler ve oluşturulan korelasyonlar değerlendirilerek, farklı araştırmacılar tarafından değişik Ra aralıklarında yeni korelasyonlar önerilmiştir. Yeni korelasyonların değişik formlarda $Nu=f(Ra)$, $Nu=f(Pr,Ra)$, $Nu=f(Pr,Ra,Ge)$ olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca önerilen korelasyonlarda, tanımlanan Ra aralığında hesaplanan Nu değerlerinin %50'ye kadar artan oranlarda sapma gösterdiği belirlenmiştir. Deneysel veriler arasındaki farklılıkların, doğru seçilmemiş, sıcaklık ölçüm sistemi veya doğru ölçülendirilmemiş deney odacığı ve yığın akışkanında oluşan hareketler sonucu sıcaklık ve hız alanlarında meydana gelen dengesizlik gibi sebeplerden oluşabileceği açıklanmıştır. Sınırlı deney verileri ile oluşturulan korelasyonlar ile birçok çalışmacının deneysel verilerinin derlenerek yarı ampirik çalışma sonucunda elde edilen korelasyonlar arasında da sapmaların olduğu görülmüştür. Sınırlı sayıdaki deney verisi ile yapılan çalışmalarda alınan basit ortalamaların bu sapmanın sebebi olabileceği belirtilmiştir. Bu konuda birçok çalışma yapılmasına rağmen tez konusu kapsamında ısı ve kütle geçişinin birlikte olduğu hal ile gerekli karşılaştırmaları yapabilmek ve ilgili test boruları için geçerli Ra aralıklarında yeni korelasyonlar oluşturabilmek amacıyla inceleme yapılmıştır. Serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi öncelikle sayısal olarak, daha sonra serbest taşınım şartlarının sağlandığı bir test odacığı içinde deneysel olarak incelenmiştir.

Önceki deneysel çalışmalarda konu edilen hataları en aza indirmek amacıyla hassas ölçü aletleri kullanılmış ve deneylerin Arçelik A.Ş'nin ARGE laboratuvarlarında bulunan şartlandırılmış odada yapılması sağlanmıştır.

Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği önceki deneysel çalışmaların elektrokimyasal yöntemle yapıldığı belirlenmiştir. Elektrokimyasal yöntemde taşınımdaki kütle geçişi iyon geçişinden kaynaklanmaktadır. Burada yapılan çalışmada ise kütle geçişi moleküler olarak sağlanmaktadır. Eş zamanlı ısı ve kütle geçişinde, kütle geçişini oluşturan toplam potansiyel etkiler farklı olduğundan, elektrokimyasal yöntemin burada konu edilen olayın fizliğini yansıtmadığı belirlenmiştir. Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin teorik incelendiği az sayıda çalışma olması nedeniyle dikey levha için yapılan çalışmalar da incelenmiştir. Bu çalışmalarda bazı kabuller yapılarak sınır tabaka çözümlemeleri gerçekleştirilmiştir. 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 dâhil edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çoğunda ara yüzey hızları ile kütle-ısı (Defour) ve ısı-kütle (Soret) enerji etkileri ihmal edilmiştir. Yapılan kabullerin, kaldırma kuvvetini oluşturan derişiklik ve farkların az olduğu atmosferik hava ve su içindeki bir çok proses için gerçekçi olduğunu söylemişlerdir. Bu durumda viskoz yayılım(viscous dissipation) teriminin de ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Akımı harekete geçiren yoğunluk farkını oluşturan iki etkinin ısı ve kimyasal difüzyon olduğu söylenmiştir. Akımı harekete geçiren toplam yoğunluk farkını sağlayan, kimyasal ve ısı difüzyonunun bağlı önemini belirten bir "N" katsayısı tanımlanmıştır. $N=0$ halinin sadece ısı geçişini, $N<0$ 'ın zıt yönlü kaldırma kuvvetlerinin olduğu hali, $N>0$ 'ın ise ısı ve derişiklik kaynaklı kaldırma etkilerinin birbirini destekler yönde olduğu hali tanımladığı belirtilmiştir. Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin teorik incelendiği iki adet çalışmada ise, yine bazı kabuller yapılarak yerel benzerlik ve yerel benzerlik dışı yöntemleri kullanılarak yaklaşık çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir durumda iki etkinin ters olmaları halinde ($N<0$) ve $Sc/Pr=1$ için, toplam kaldırma kuvvetinin sınır tabaka boyunca pozitif kalıp kalmayacağını bilmediği söylenmiştir. Hesaplanan akışın yerel olarak döneceği veya fiziksel olarak mantıksız bir hale geleceği de bilinmemektedir.

Bu tip durumlar için, N sayısının kritik bir negatif değeri olduğu ve bu değerde, kaldırma kuvvetinin sıfırlanarak ısı ve kütsel taşınım akışının olamayacağı açıklanmıştır. N değerinin daha da azaltılması durumunda, akışın yönünü değiştireceği ve fiziksel olarak mantıklı sonuçlar elde edebilmek için momentum denklemindeki kaldırma kuvveti teriminin işaretinin değiştirilmesi veya koordinatların tekrardan tanımlanması gerekeceği belirtilmiştir. Fakat bu durum için bir çalışma yapılmamıştır. Bu tez çalışması kapsamında da akışı ters yöne çevirecek durum için inceleme yapılmamıştır.

Yapılan kaynak araştırması sonucunda, özellikle ısıtma soğutma havalandırma sektöründe sıklıkla karşılaşılan yatay boru geometrisi için serbest taşınım şartlarında eş zamanlı ısı ve kütle geçişi konusunda teorik ve deneysel çalışmalar açısından bir boşluk olduğu belirlenmiştir. Konunun deneysel olarak da incelenmesi gerektiği ve soğutma sistemlerinde kullanılan buharlaşmalı kondenserlere temel teşkil etmesi düşüncesiyle bu doktora tez çalışması yapılmıştır.

3. TEMEL KAVRAMLAR VE TEORİK İNCELEME

Bu bölümde deneysel çalışma sonunda elde edilen deney verilerinin değerlendirilebilmesi için yapılan hesaplamalarda kullanılan temel kavramlara ve prensiplere değinilmiştir.

3.1 Doğal Taşınım ve Kaldırma Kuvveti Etkili Akışlar

Hayatımızı, yakın ve uzak çevremizi etkileyen, akışkan nakil ve hareketlerinin büyük bir bölümü kaldırma etkisi ile oluşmaktadır. Bu tip akışlar, vücudumuz etrafındaki hava dolaşımında, pişirme için kullandığımız kapalı kavitelerde, su havuzlarında ve atmosferde her ölçüde bulunmaktadır. Kaldırma kuvveti, sıcaklık dağılımının homojen olmadığı, kimyasal bileşenlerin farklı derişikliklerde olduğu, maddelerin faz değışimlerinin olduğu durumlarda ve birçok farklı etki sonucunda oluşur. Birbirinden farklı ve ayrı etkiler ve bunların kombinasyonları, oluşan birçok değışik geometrik konfigürasyonlar, farklı sınır şartları ve oluşan kuvvet alanları (force fields) sonucu çok farklı tipte kaldırma etkili akışlar ortaya çıkar.

Bu tip olaylar kendi içinde benzerlikler gösterse de, zorlamalı şartların olduğu taşınım proseslerinden çok farklıdır. Akış ve sıcaklık alanları eştir ve beraber düşünölmelidir. Akışlar oldukça zayıftır, hızlar oldukça küçük ve momentum ile viskoz etkileri de aynı mertebelerdedir.

Bu tip prosesler dış ve iç akışlar olarak iki ana grup altında toplamıştır. Dış akışlar çok büyük dış ortamda veya sabit sıcaklık veya ısı akısındaki bir yüzeydeki yoğunluk değışimlerinden oluşmaktadır. Bir kavite içinde bulunan akışkanda oluşan akış olayı ise iç akıştır. Bu tip akışlar genel olarak doğal taşınım olarak isimlendirilse de kaynaklarda dış akış olayı, genelde serbest taşınım olarak geçmektedir.

Bu tip geçiş (transport) problemleri nadiren basit olup genelde geometri ve mekanizması açısından çok karışık ve anlaşılmazdır. Yoğunluk farkları, faz farklarından, ısı geçişinden ve/veya kimyasal bileşenlerin tekli veya çoklu difüzyonundan ortaya çıkmaktadır. Kaldırma etkili akışlar öncelikle küçük ölçekte laminerdir. Fakat etkin akışlar büyük ölçekte türbölanslıdır. Laminer ve türbölanslı taşınım karakteri zorlanmış akışta olduğu gibi, kaldırma etkili akışlar için de büyük farklılıklar göstermektedir. Laminer taşınım karakteri sınır şartlarına bağlı olarak 1 m civarında sürmektedir. Bu sebeple küçük ölçekli birçok akış laminar olarak konu edilmektedir. Daha yüksek ölçekli akışlarda baştaki laminar bölüm genellikle ihmal edildiğinden, tüm akış alanı türbölanslı olarak konu edilmektedir. Bunların arasında bahsedilen ölçekle ilgili önemli sorular vardır. Laminer akışın ne zaman ve nasıl

kararsız hale geleceği ve türbülanslı bölgeye geçeceği bilinmemektedir. Kaçınılmaz olarak kaldırma etkili akışlarla ilgili yapılan önceki çalışmalarda, laminar akış daha iyi anlaşılmıştır.

Kaldırma etkili akışlar; mekanizmalar, fiziksel büyüklükler ve sonuçta oluşan akış açısından çok farklılıklar göstermektedir. Buna rağmen, çok güncel ve pratik önemi doğrultusunda, bu çeşitli (farklı) faktörlerin birkaç olası kombinasyonu iyi anlaşılmıştır. Eldeki birçok bilgi, sıvı faz (tek faz) içindeki, yer çekimi kuvveti ile ısı geçişinin yoğunluk üzerindeki etkilerini konu alan laminar proseslerle ilgilidir. Düşük derişiklik seviyelerindeki, kimyasal bileşenlerin difüzyonunun yoğunluk üzerindeki etkisi eşit olarak basit analizlerin içine dahil edilebilir. Atmosferdeki ve sudaki difüzyon proseslerinde, difüz eden bileşenin konsantrasyonu düşük seviyededir. Atmosferik nem ve CO₂ seviyeleri sırasıyla 1 ve 0,04% mertebelerindedir. Okyanustaki tuzluluk ise 3,5% mertebelerindedir. Bu nedenle, buradaki maddelerin önemli bir kısmı; tek akışkan fazında, uniform yerçekimi alanı ile termal ve kütle geçişi etkileşiminin yoğunluk üzerindeki etkileri sonucu oluşan laminar akış konusu kapsamındadır

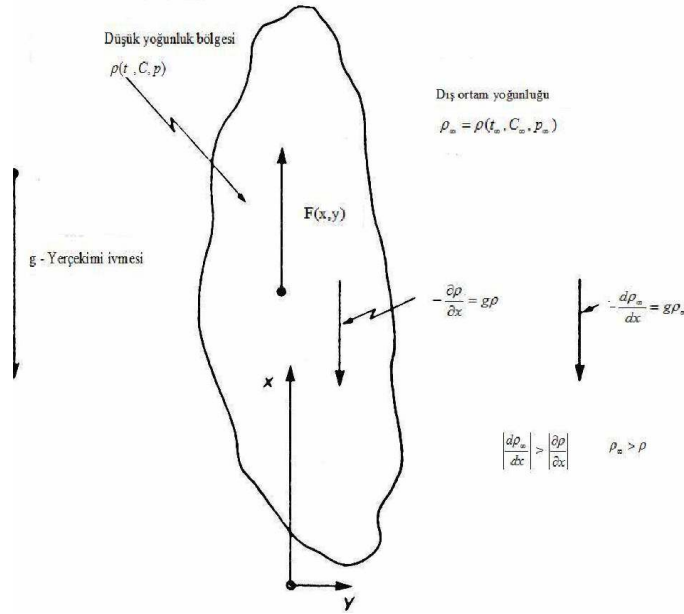
3.1.1 Kaldırma Kuvveti

Bir dış etki sonucu meydana gelmeyen, ama yine de akışkan içinde taşınımın olduğu durumlar, doğal veya serbest taşınım olarak adlandırılırlar ve içinde sıcaklık veya derişiklik gradyanlarının olduğu bir akışkan üzerine kütle kuvvetleri etkidiği zaman ortaya çıkarlar. Literatürde doğal ve serbest taşınım tanımlamaları yapılmış olup; cismin içinde gerçekleşen akışa doğal, dışında gerçekleşene ise serbest taşınım denilmiştir. Net etki doğal akışa neden olan kaldırma kuvvetidir. Kaldırma, akışkan içindeki yoğunluk gradyanı ile, yoğunlukla orantılı bir kütle kuvvetinin birlikte olmalarının sonucu doğardır. En genel durumda, yoğunluk gradyanı sıcaklık gradyanından, kütle kuvvetide yerçekiminden kaynaklanır. Sadece ısı geçişinin düşünüldüğü bu genel durumda sıcak bir yüzey ile temasta bulunan akışkan molekülleri ısınarak yer değiştirir ve ısınan moleküllerin yerine soğuk moleküller gelir.

Hareketsiz bir ortam, yerçekimi ivmesinin (g) etkisindeyken, içindeki düşük yoğunluklu bir bölge, yukarı doğru bir kaldırma kuvveti oluşturur (F). Bu kuvvet hareketin oluşmasını sağlar (Şekil3.1). Yerçekimi kuvveti düşey ve aşağı doğrudur. Hareketsiz ortamdaki basınç veya

hidrostatik gradyan $\frac{dP}{dx} = -\rho_{\infty}g$, ρ_{∞} yoğunluk bölgesindeki diğer alanlardakinden

$\frac{dP}{dx} = -\rho g$ farklı olduğundan hareket oluşur. Burada ‘ ρ ’ anlık yerel yoğunluk değeridir.



Şekil 3.1 Hareketsiz bir dış ortamdaki yoğunluk seviyeleri ve kaldırma kuvveti

Basınç gradyanındaki bu fark, kaldırma kuvveti (F) vasıtasıyla, hareketi, oluşturur. Bu kuvvet $F=F(x,y)= g.(\rho_{\infty} - \rho)$ şeklinde ifade edilip hesaplanır. Bu nedenle F iki kütle kuvveti arasındaki farktır. Sonuçta oluşan akış yukarı doğru ise F pozitif olur. Kaldırma kuvvetinin yerel büyüklüğü, yerel sıcaklık ve derişiklik seviyelerine bağlıdır. Bu kuvvet, viskoz kuvvetlerinin ve momentumun dengesi şeklinde yazılır. Aynı zamanda, kütle süreklilik denklemi de oluşmaktadır. Bir enerji dengesi eşitliği, diğer enerji etkileriyle birlikte, ısı enerjisinin difüzyon ve taşınımını toplamaktadır. Sonuçta her kimyasal bileşenin taşınımında bir difüzyon dengesi ve kimyasal reaksiyona bağlı kayıp veya kazancı oluşacaktır. Isı ve kimyasal geçiş eşitlikleri 'T' ve 'C' cinsinden ifade edilmektedir ve bunlar son eşitlikte, kütle-momentuma karşı F kuvvetinin oluşturulmasıyla birleştirilmişlerdir. Bu kaldırma etkili akışlardaki mekanizmanın karışıklığını oluşturan temel sebeptir.

Momentum ve enerji geçişini tanımlayan denklemler 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 $\frac{\Delta\rho}{\rho_{\infty}} \ll 1$ çok küçüktür. Fakat bu küçük değişim, momentum denklemindeki dış kuvveti oluşturur.

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

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

$$\Delta\rho = \rho_\infty - \rho = \rho\beta(T - T_\infty) \quad (3.1)$$

hesaplanır. Bu eşitlikte

$$\beta = \frac{1}{\nu} \left(\frac{d\nu}{dT} \right)_p = \frac{1}{\nu_\infty} \frac{\nu - \nu_\infty}{T - T_\infty} = \frac{1}{\frac{\rho}{\rho_\infty}} \frac{\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_\infty}}{T - T_\infty} = \frac{\rho_\infty - \rho}{\rho(T - T_\infty)} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right)_p \quad (3.2)$$

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

Doğal taşınım kütlesi geçişinin bir türü, yüzeyde oluşan buharlaşmayı artıran ısı kaynaklı doğal taşınım akışlarıdır. Yatay bir su tabakasından olan buharlaşma, su sıcaklığının, çevresindeki havanın sıcaklığından fazla olması durumunda oluşacak doğal taşınım akışının etkisi ile artar. Bu durumda aynı anda doğal taşınım ısı ve kütlesi geçişi olur. Isı ve derişiklik etkilerinin beraber olduğu bu durumda, yoğunluk farkının basit ve uygun bir yolla ifadesi aşağıdaki şekilde yapılır:

$$\Delta\rho = \rho_\infty - \rho = \rho' \beta(T - T_\infty) + \rho' \beta^*(C - C_\infty) = \Delta\rho_t + \Delta\rho_c \quad (3.3)$$

ρ' = uygun bir yoğunluk seviyesi

β ve β^* ise seçilen ρ' 'ne göre denklemi doğrulamak için gerekli olan değerlerdir. Geçiş prosesi boyunca yoğunluk T ve C ile lineer olarak değişiyorsa, basit olarak:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right)_{p,C} \quad (3.4)$$

$$\beta^* = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dC} \right)_{p,T} \quad (3.5)$$

yazılabilir.

Birçok akışkan ve akış şartları için (3-3)÷(3-5) eşitlikleri, özellikle $T_0 - T_\infty$ ve $C_0 - C_\infty$ 'un küçük olduğu değerlerde iyi yaklaşımlardır. Isıl kaldırma etkisi için (3-3) ve (3-4) eşitlikleri Boussinesq yaklaşımıdır.

Fakat kontrol bölgesinde, T ve C'nin büyüklüklerine göre, yoğunluk değişimi lineer değil ise, β ve β^* 'ın 2.5 Eşitliğinde doğru temsil edilmelerini sağlamak daha karışık olacaktır. Bu olay herhangi bir akışkanda yüksek sıcaklık ve/veya derişiklik farklarında oluşacaktır. Örnek olarak 4 °C'de yoğunluğun en yüksek değere ulaştığı bir durumu ele alalım. $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ve $T_\infty = 6^\circ\text{C}$ için yoğunluk değişimi lineer olmayacaktır. $\beta(t)$ 6 °C'de pozitif, 4 °C civarında sıfır, ve 0 °C'de negatif olacaktır. Bu durumda Eşitlik 3.3 deki gibi yaklaşım yeterli olmaz, bir yoğunluk denklemi kullanılması gerekir.

Ayrıca Eşitlik 3.3'de akışı harekete geçiren yoğunluk farkını oluşturan iki etki vardır. Bunlar ısı ve kimyasal difüzyondur. Akışı harekete geçiren toplam yoğunluk farkını sağlayan, kimyasal ve ısı difüzyonun bağıl önemini ölçen bir "N" katsayısı tanımlanmıştır.

$$N = \frac{Gr_{DC}}{Gr_D} = \frac{\beta^*(C_0 - C_\infty)}{\beta(t_0 - t_\infty)} = \frac{\Delta\rho_c}{\Delta\rho_t} \quad (3.6)$$

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

3.1.2 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.

$$Q = hA(T_0 - T_\infty) \quad (3.7)$$

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.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.8)$$

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

$$Gr_D = \frac{g\beta(T_0 - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (3.9)$$

Benzer sonuçlar 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.

$$N_A = h_m A (C_{A,0} - C_{A,\infty}) \quad (3.10)$$

$$n_A = \bar{h}_m A (\rho_{A,0} - \rho_{A,\infty}) \quad (3.11)$$

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

$$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} \quad (3.12)$$

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

$$Gr_{DC} = \frac{g\beta^*(C_0 - C_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (3.13)$$

3.2 İdeal Gaz Karışımları

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

$$P = R \left(\frac{T}{v} \right) \quad (3.14)$$

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.14 ideal gaz hal denklemidir ve eşitliğe uyangazlar 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 yoğunlaşma sonucu değişir. Havadaki su buharı diğer karışanın, yani kuru havanın varlığından etkilenmez ve $P_v = RT$ ideal gaz denklemini 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.

$$P = P_v + P_a \quad (3.16)$$

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

$$\rho = \rho_v + \rho_a \quad (3.17)$$

$$\rho_v = \frac{P_v}{\frac{R_u}{M_v} T} \quad (3.18)$$

$$\rho_a = \frac{P_a - P_v}{\frac{R_u}{M_a} T} \quad (3.19)$$

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

3.3 Bağlı nem

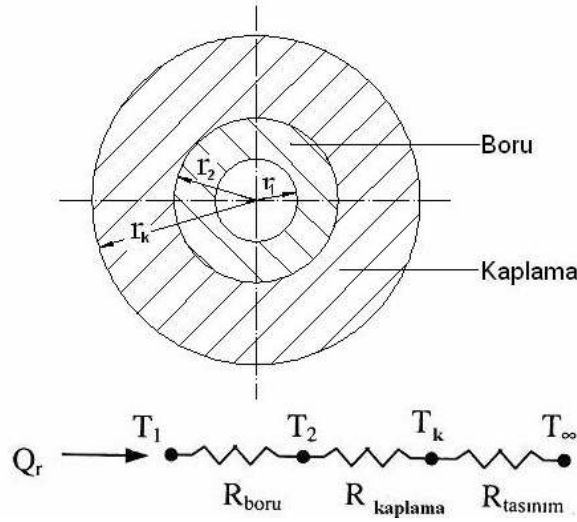
Havanın içerdiği su buharı miktarının (m_v), aynı sıcaklıktaki havada bulunabilecek en çok su buharı miktarına (m_g) oranı bağlı nem olarak ifade edilir ve ϕ ile gösterilir.

$$\phi = \frac{m_v}{m_d} = \frac{P_v V / (R_v T)}{P_{vd} V / (R_v T)} = \frac{P_v}{P_{vd}} \quad (3.20)$$

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

3.4 Kritik Kaplama (Isı yalıtım) Kalınlığı

Silindirik yüzeylerde yüzeye kaplanan malzemenin kalınlığı önem arz etmektedir. Burada kaplanan malzeme kalınlığı ile ısı geçişinin değişimini incelenmektedir.



Şekil 3.2 Kaplamalı bir boru ve elektrik benzeşim devresi

Herhangi bir kaplama olmadığı durumda birim boydaki silindir yüzeyinden birim zamandaki taşınım ısı geçiş miktarı:

$$Q = \frac{T_2 - T_\infty}{R_{ta\ sin\ im}} = \frac{T_2 - T_\infty}{\frac{1}{h_0 A_2}} \quad (3.21)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada $A_2 = 2\pi r_2$ dir.

Isı iletim katsayısı k olan bir malzeme ile kaplanması sonucu birim zamandaki ısı geçiş miktarı ise eşitlik (3.22) deki gibi hesaplanır.

$$Q = \frac{T_2 - T_\infty}{R_{kaplama} + R_{ta\ sin\ im}} = \frac{T_2 - T_\infty}{\frac{\ln(r_k / r_2)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_0 A_k}} = \frac{2\pi L(T_2 - T_\infty)}{\frac{\ln(r_k / r_2)}{k} + \frac{1}{h_0 r_k}} \quad (3.22)$$

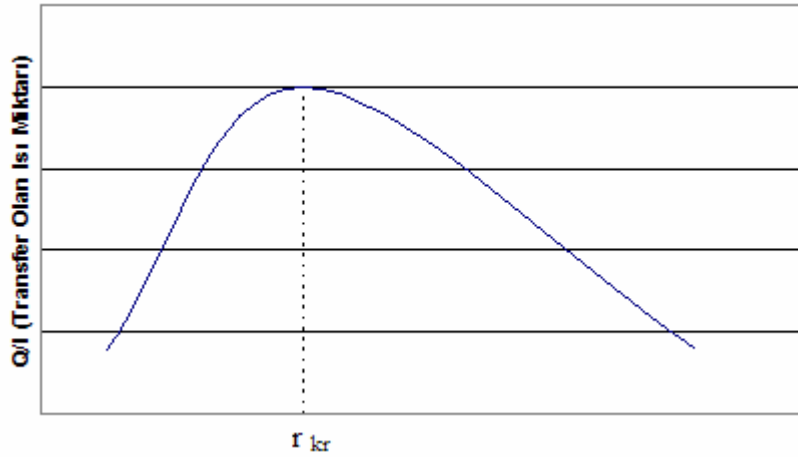
Burada $A_k = 2\pi r_k$ dir ve L silindirin uzunluğudur. Kaplama malzemesi ilavesiyle ısı kaybının maksimum olup olmadığını araştırmak için eşitlik (1) in kaplama yüzeyini veren yarıçap r_k ye göre türevini alıp sıfıra eşitleyerek, kritik kaplama (r_{kr}) değeri hesaplanabilir.

$$\frac{dQ}{dr_k} = \frac{2\pi L(T_2 - T_\infty)(1/k_k r_k - 1/h_0 r_k^2)}{\left[\frac{\ln(r_k/r_2)}{k_k} + \frac{1}{h_0 r_k} \right]^2} = 0 \quad (3.23)$$

$$r_{kr} = \frac{k_k}{h_0} \quad (3.24)$$

$$d_{kr} = \frac{2k_k}{h_0} \quad (3.25)$$

Kritik çapın altındaki çapa sahip borularda kritik çapa kadar kaplama yapıldığında ısı geçişi artar. Isı geçişini maksimum yapan bir kaplama kalınlığı vardır ve bu değer kritik yarıçap (r_{kr}) değerine kadar yapılacak kaplama ile sağlanır. Bu durum Şekil 3.3’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Kaplama yarıçapı ile birim zamandaki ısı transferi miktarındaki değişim

Üzeri kaplamalı evaporatif kondenser borusunun kuru olması halinde oluşacak ısı akısının, kaplama yapılmadan önceki çıplak durumdaki ısı akısından az olmaması için, kaplanacak malzemeye göre oluşturulmuş kritik çap grafiği esas alınmalıdır. Şekil 3.3’de görüldüğü gibi, ısı akılarının maksimum olmasını sağlayacak kaplama kalınlığı kritik yarıçapa kadardır. Yapılan çalışmada bu değere dikkat edilerek sarım yapılmıştır.

3.5 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 Grashof sayısı ile ifade edilmiştir.

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.

$$P = P_v + P_a \quad (3.26)$$

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

$$P_\infty = P_{v,\infty} + P_{a,\infty} \quad (3.27)$$

$$P_0 = P_{v,0} + P_{a,0} \quad (3.28)$$

$$P_f = P_{v,f} + P_{a,f} \quad (3.29)$$

$$P_v = \phi.P_{v,d} \quad (3.30)$$

Deneylerden elde edilen bağıl nem verileri kullanılarak, Eşitlik 3.30 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:

$$\rho_{v\infty} = \frac{P_{v\infty}}{\frac{R_u}{M_v} \cdot (T_\infty + 273)} \quad (3.31)$$

$$\rho_{a\infty} = \frac{P_\infty - P_{v\infty}}{\frac{R_u}{M_a} \cdot (T_\infty + 273)} \quad (3.32)$$

$$\rho_\infty = \rho_{v\infty} + \rho_{a\infty} \quad (3.33)$$

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

$$\rho_{v0} = \frac{P_{v0}}{\frac{R_u}{M_v} \cdot (T_0 + 273)} \quad (3.34)$$

$$\rho_{a0} = \frac{P_0 - P_{v0}}{\frac{R_u}{M_a} \cdot (T_0 + 273)} \quad (3.35)$$

$$\rho_0 = \rho_{v0} + \rho_{a0} \quad (3.36)$$

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

$$\rho_{vf} = \frac{P_{vf}}{\frac{R_u}{M_v} \cdot (T_f + 273)} \quad (3.37)$$

$$\rho_{af} = \frac{P_f - P_{vf}}{\frac{R_u}{M_a} \cdot (T_f + 273)} \quad (3.38)$$

$$\rho_f = \rho_{vf} + \rho_{af} \quad (3.39)$$

Elde edilen yoğunluk değerleri kullanılarak karışımın yoğunluk farkı oranı ve Grashof sayısı,

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_\infty - \rho_0}{\rho_f} \quad (3.40)$$

$$Gr = 9,81 \cdot D^3 \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{\nu^2} \quad (3.41)$$

Serbest taşınım şartlarında yatay boru 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 ısı genleşme katsayısına bağlı hesaplanan Gr sayıları karşılaştırılmış ve değerlerin eşit olduğu belirlenmiştir.

$$Gr = g \cdot D^3 \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{\nu^2} = \frac{g\beta(T_0 - T_\infty)D^3}{\nu^2} \quad (3.42)$$

Bu sonuç yapılan yeni yaklaşımın ve hesaplamaların doğruluğunu göstermektedir. Eş zamanlı

ısı kütle geçişinin incelendiği durum için de Gr sayısı yoğunluk farkı oranına göre (Eşitlik 3.41) hesaplanmıştır.

Hesaplanan Gr sayısı kullanılarak Ra ve Ra' değerleri,

$$Ra = Gr.Pr \quad (3.43)$$

$$Ra' = Gr.Sc \quad (3.44)$$

Amaçlanan $Nu = f(Ra)$, $Sh = f(Ra')$ formunda korelasyonların oluşturulabilmesi için Nu ve Sh sayıları da bilinmelidir. Termodinamiğin 1. yasasına dayanarak yatay deney borusu için enerji eşitliği kullanılarak Nu ve Sh sayıları hesaplanır. Deney tesisatında istenilen sabit yüzey sıcaklığının sağlanabilmesi için, yatay test borusuna verilen elektriksel enerji değeri hassas olarak ölçülmüştür. Bu enerji, buharlaşma, taşınım ve ışınlama yüzeyden ortama transfer edilmektedir.

$$Q_{Top} = Q_B + Q_T + Q_I \quad (3.45)$$

Üçüncü grup buharlaşmalı deneylerde hassas terazi kullanılarak ölçülen buharlaşan su miktarları, toplam ısı geçişi eşitliğindeki buharlaşmadan kaynaklanan enerjinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$Q_B = m_b \cdot h_{fg} \quad (3.46)$$

İşinimla olan ısı geçişi ise Eşitlik 3.47 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Q_I = \frac{E_{b0} - E_{b\infty}}{\frac{1 - \varepsilon_0}{A_0 \varepsilon_0} + \frac{1}{A_0 F_{0\infty}} + \frac{1 - \varepsilon_\infty}{A_\infty \varepsilon_\infty}} \quad (3.47)$$

$$E_{b0} = \sigma \cdot T_0^4 \quad (3.48)$$

$$E_{b\infty} = \sigma \cdot T_\infty^4 \quad (3.49)$$

$$\varepsilon_0 = 0,5 \text{ (Paslanmış Bakır); } 0,95 \text{ (Kumaş)}$$

$$\frac{1 - \varepsilon_\infty}{A_\infty \varepsilon_\infty} \approx 0 \quad (3.50)$$

Deney borusu yüzeyinin, kararlı halde istenilen sıcaklıkta kalabilmesi için verilen toplam enerji hassas güç ölçer ile ölçülmüştür.

Eşitlik 3.46 ve 3.47 ile hesaplanan Q_B ve Q_I değerleri kullanılarak Eşitlik 3.51 ile ısı geçişi Q_T ve buna bağlı olarak ısı taşınım katsayısı belirlenir.

$$Q_T = Q_{Top} - Q_I - Q_B \quad (3.51)$$

$$Q_T = h.A. \Delta T \quad (3.52)$$

$$h = \frac{Q}{A.(T_0 - T_\infty)} \quad (3.53)$$

Kütle taşınım katsayısının hesaplanabilmesi için ise Q_B değeri kullanılır. Buharlaştırmadan kaynaklanan ısı geçişi yüzey ile ortam şartları arasındaki derişiklik farkından kaynaklanmaktadır ve yoğunluk değerleri ile Eşitlik 3.55 ile ifade edilir

$$Q_B = h_m.h_{fg}.\Delta\rho_c.A \quad (3.54)$$

$$\Delta\rho_c = \rho_{v0} - \rho_{v\infty} \quad (3.55)$$

$$h_m = \frac{Q_B}{h_{fg}.\Delta\rho_c.A} \quad (3.56)$$

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

$$Nu_D = \frac{h.D}{k} \quad (3.57)$$

$$Sh_D = \frac{h_m.D}{D_{AB}} \quad (3.58)$$

Yapılan tüm hesaplamalarda yoğunluk dışındaki tüm fiziksel değerler ortalama film sıcaklığında alınmıştır. Film sıcaklığı da ortalama sıcaklık olarak kabul edilmiş ve Eşitlik (3.59) ile hesaplanmıştır

$$T_f = T_\infty + 0,5(T_0 - T_\infty) \quad (3.59)$$

Excel programında bir hesap tablosu oluşturulmuş ve tüm deney verileri girilerek, bağıntıların oluşturulması için gerekli değerler her deney için ayrı hesaplanmıştır. Hazırlanan hesap tablosu Çizelge 3.1'de verilmiştir. Burada örnek olarak verilen 84. deneye ait (buharlaştırmalı deney) hesap tablosunda Nu , Ra , Sh ve Ra' değerlerinin hesaplandığı, fakat sadece ısı geçişinin analiz edildiği deneylerde ise sadece Nu ve Ra hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1 Hesap tablosu

BORU YÜZEY SICAKLIĞINI GİRİNİZ T_o (° C)	40.00675	ÇAP (m)	0.0128			
ORTAM SICAKLIĞINI GİRİNİZ T_a (° C)	20.6425	E	0.95			
ORTALAMA SICAKLIK	30.32463	YÜZEY ALANI (m2)	0.040212			
YÜZEY BAĞIL NEMİ GİRİN	1	mb ml/0,5h	21.65762			
ORTAM BAĞIL NEMİ GİRİN	0.297506	mb ml/h	43.31524			
ORTALAMA BAĞIL NEM DEĞERİ	0.648753	Q Top	43.05			
KONSANTRASYON FARKINA BAĞLI ETK. $\Delta p_c/p$	-0.0402	Q_1	W	4.686973		
SICAKLIK FARKINA BAĞLI YOĞUNLUK ETK. $\Delta p_t/p$	0.129354	Q_B	W	28.95725	h m	0.006543
TOPLAM YOĞUNLUK ETKİSİ $\Delta p/p$	0.089158	Q_T	W	9.40578	h	12.07909
GRASHOF SAYISI Gr	6968.204	Nu		5.824314		
Ra	4923.277	Sh		3.21514		
Ra'	4278.704					

[illegible]

Curve Expert programında $y = a.x^b$ fonksiyonu tanımlanarak, hesaplanan Nu ve Ra ile, serbest taşınım şartlarında yatay boruda ısı geçişi için $Nu_D = c.(Ra)^n$ korelasyonu oluşturulmuştur. Aynı işlem sırasıyla hesaplanan Nu, Ra, Sh ve Ra' değerleri ile serbest taşınım şartlarında yatay boruda eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için $Sh_D = c.(Ra')^n$ ve $Nu_D = c.(Ra)^n$ korelasyonları oluşturulmuştur.

4. SAYISAL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Giriş

Bu bölümde öncelikle Fluent CFD programında kullanılan hesaplama yöntemleri ve ele alınan problem için oluşturulan çözüm algoritması açıklanmıştır. Daha sonra, Gambit programında çizilen model ve çözüm ağı, sayısal çözüm ile elde edilen bulgular, bu bulgulara göre oluşturulan korelasyonlar ve deneysel bulgularla karşılaştırmaları verilmiştir.

4.2 Sayısal Çözümde Kullanılacak Hesaplama Yöntemleri

Bu çalışmada sayısal çözümleme için Fluent 6.0 CFD programı kullanılmıştır. Bu bölümde programda kullanılan çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilecektir.

4.2.1 Sayısal Çözüm Yöntemleri

4.2.1.1 Ayır Çözüm Yöntemi (Segregated Solver)

Bu yöntem, süreklilik, enerji ve momentum denklemlerini yakınsama gerçekleştiği zamana kadar ayrı olarak çözer. Daha çok sıkıştırılamaz akışkanların bulunduğu ortamlarda tercih edilir. Akışkan fiziksel özellikleri, bir önceki iterasyondan elde edilen sıcaklık dağılımları yardımıyla yeniden hesaplanarak belirlenir. Eğer hesaba yeni başlanıyor ise akışkanın giriş sıcaklığındaki fiziksel özellikleri hesaplanır. x, y, z yönlerindeki u, v, w hız değerlerine ait momentum denklemleri, o anki basınç ve yüzey akısı yardımıyla çözülür.

Hesaplamalarda bulunan hız değerleri, süreklilik denklemini sağlamıyorsa, süreklilik ve lineer edilmiş momentum denklemleri yardımıyla, basınç düzeltmesi denklemi türetilir. Bu denklem hız-basınç dağılımları için gerekli düzeltmeyi elde edebilmek ve kütsel debi, süreklilik denklemini sağlaması için çözülür.

4.2.1.2 Bir Arada Çözüm Yöntemi (Coupled Solver)

Süreklilik, momentum, uygun olması durumunda enerji, kütle transferi denklemleri ile eş zamanlı çözülür. İterasyonlarda akışkan özellikleri bir önceki iterasyondan güncellenir. Başlangıçta ise giriş değerleri kullanılır. İterasyonlarda süreklilik, momentum, enerji ve kütle denklemleri eş zamanlı çözülür. Her iterasyon sonucu yakınsama kriterlerine göre yakınsama kontrol edilir. Yakınsama gerçekleşmez ise iterasyon devam ettirilir. Ayır çözüm yönteminde, bir arada çözüm yöntemine göre daha kısa sürede çözüme ulaşılmaktadır.

4.2.2 Lineerleştirme Yöntemleri

Sayısal çözüm yöntemlerinden ayrı çözüm ve bir arada çözüm yöntemlerinde farklı lineer olmayan denklemleri her hücre için bağımlı değişkene ait denklemler sistemi oluşturmak üzere lineerleştirir. Bulunan lineer denklemler, güncellenmiş akış alanı elde etmek için çözümlenir. Bu lineerleştirme bağımlı değişkene göre örtülü veya açık olarak gerçekleştirilebilir.

4.2.2.1 Örtülü Yöntem (Implicit Formulation)

Her hücrede bilinmeyen değerler, komşu hücrelerdeki bilinen ve bilinmeyen değerler yardımıyla hesap edilir. Bununla birlikte her bir bilinmeyen değere ait, sistemde birden fazla denklem ortaya çıkar ve bu denklemler bilinmeyenleri tespit edebilmek için eş zamanlı olarak çözülür.

4.2.2.2 Açık Yöntem (Explicit Formulation)

Verilen bir değişkenin, hücredeki bilinmeyen değerinin sadece bilinen değerler yardımıyla bulunmasıdır. Her bir bilinmeyen sadece bir denklemde yer alır ve her hücredeki bilinmeyenler bir an için çözülür.

Ayrı çözüm yöntemi sadece örtülü yöntem ile lineerleştirmeye müsaade eder. Ama bir arada çözüm yönteminde örtülü veya açık yöntem kullanılabilir. Bir arada çözüm ve örtülü çözümde P, u, v, w ve T değerleri tüm hücrelerde aynı anda çözülür. Bir arada çözüm ve açık yöntemde P, u, v, w ve T değerleri bir hücrede aynı anda çözülür.

Bu çalışmada akışkan hızlarının çok düşük olması nedeniyle ayrı çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem seçildiğinde sadece örtülü yöntemle lineerleştirme gerçekleştirilebildiğinden, örtülü yöntem seçilmiştir.

Fluent'in çözüm yöntemleri içerisinde momentum ve enerji için değişik enterpolasyon teknikleri mevcuttur. Bunlar:

- First Order: Birinci dereceden,
- Second Order: İkinci dereceden,
- Power Law: Üssel,
- Quick: Hızlı enterpolasyon yöntemleridir.

Fluent bunları her bir hücre merkezi için farklı skaler ϕ değeri bulabilmek için kullanır.

$\phi_f \cdot a_p = \sum_{nb} a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b$ formülündeki ϕ_f 'yi merkez değerlerden enterpolasyon ile bulur. Doğal

taşıyım için Fluent programında ikinci dereceden enterpolasyon yöntemi tavsiye edilmiştir.

4.2.3 İkinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi

Hücre yüzeyindeki değişkenler, lineer yeniden yapılandırma yaklaşımı yöntemi kullanılarak çözülür. Yüzey değerleri ϕ_f Taylor serisi yardımıyla;

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \Delta S \quad (4.1)$$

$$\nabla \phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{faces}} \phi_f . A \quad (4.2)$$

ikincil enterpolasyon yöntemi yüksek derecede güvenilirlik sağlar. Burada ΔS bir önceki hücre merkezi ile bundan bir sonraki hücre yüzey merkezi arasındaki yer değişim vektörü, $\nabla \phi$ ise ikisi arasındaki ϕ 'nin değişim miktarıdır.

4.2.4 Basınç- Hız Çifti İçin Simple Metodu

Momentum, süreklilik ve diğer skalerlere ait denklemlerin çözüm algoritması aşağıdaki gibidir:

- Tahmini basınç değerleri P^* belirlenir.
- Tahmini basınçtan tahmini hız u^* , v^* , w^* değerleri bulunur.
- Bulunan bu hız denklemleri ile süreklilik denklemindeki basınç düzeltme değerleri hesaplanır.
- Düzeltme değerleri ile gerçek basınç hesaplanır.
- Gerçek u , v , w hız değerleri bulunur.
- Akışın türbülanslı olması durumunda u , v , w hız değerleri yardımıyla türbülans denklemleri çözülür.
- Sıcaklık değerleri de yukarıda anlatılan yöntemle sırayla bulunur.
- Akışkan özellikleri bulunan sıcaklık değeri ile düzeltilir.
- R artık değeri hesaplanır. Kullanıcının ayarlayabildiği R değerine göre karşılaştırma yapılır. Bulunan değer, ayarlanan değerden büyük ise iterasyon devam eder. Aksi halde iterasyon sonlandırılır. Bir sonraki iterasyon yapılırken en son bulduğu basınç değeri, başlangıç basıncı olarak kabul edilir ve işlemler tekrarlanır.

4.2.5 Artık Değer (Residual)

P hücresi için ϕ değeri:

$$a_p \cdot \phi_p = \sum a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b \quad (4.3)$$

$$S = S_c + S_p \cdot \phi \quad (4.4)$$

$$a_p = \sum_{nb} a_{nb} + S_p \quad (4.5)$$

İlk yazılan denklemde eşitliğin sağlanması gerekir ancak iterasyon sırasında eşitliğin sağ ve sol tarafı farklı olabilir. İki taraf arasındaki farkın tüm P hücreleri boyunca olan toplam değerine ϕ değişkeninin artık R^ϕ değeri adı verilir

$$R^\phi = \sum_{P_{hücreleri}} \left| \sum a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \cdot \phi_p \right| \text{ 'dir.} \quad (4.6)$$

Bu formül ile yakınsamanın olup olmadığını anlamak zordur. Bu nedenle boyutsuzlaştırma yapılarak boyutsuz artık değeri "Residual" aşağıdaki şekilde bulunur:

$$R^\phi = \frac{\sum_{P_{hücreleri}} \left| \sum_{nb} a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \cdot \phi_p \right|}{\sum_{P_{hücreleri}} |a_p \cdot \phi_p|} \quad (4.7)$$

Momentum denklemlerinde paydadaki $a_p \cdot \phi_p$ yerine $a_p \cdot V_p$ gelir. Süreklilik denklemi için net kütle üretimi değeri:

$$R^c = \sum_{P_{hücreleri}} |P \text{ Hücresindeki Kütle Üretimi}| \quad (4.8)$$

Süreklilik denklemi için boyutsuz artık değeri :

$$\frac{R^c \cdot N.iterasyon}{R^c \cdot 5.iterasyon} \quad (4.9)$$

Paydadaki değer ilk beş iterasyondaki en büyük mutlak değer olarak artık R^ϕ 'dır.

4.2.6 Yakınsama ve Kararlılık

Fluent programında yakınsama kriterleri: süreklilik, x,y,z yönlerindeki hızlar için $R=10^{-3}$, enerji için $R=10^{-6}$ dir. Yakınsama kriterleri kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir.

Yapılan nümerik çalışmada Fluent ile hesaplamalar yapılırken Fluent ayar değerleri olan ve yukarıda belirtilen değerler yakınsama kriteri olarak alınmıştır.

Bu kriterlere göre İterasyon sayısı 1000–2000 aralığında değişmektedir, yani Fluent 1000–2000 iterasyonda sonuca gidebilmektedir. Yakınsama kriterlerinin sağlanmasından sonra, yakınsama eğrilerinin yataylaşması için iterasyon devam ettirilmiştir. Çözüm sonuçlarının daha doğru olması, sistemin kararlı hale gelebilmesi için yapılan bu işlem, eğrilerin yataylaşması durumunda sonlandırılmıştır.

4.2.7 Problemin Çözümü İçin Oluşturulan Algoritma

- Gambitte çizilen model Fluent’e aktarılır ve program çalıştırılarak msh dosyaları okutulur.
- Çizilen modelin geometrik kontrolü yapılır.
- Gambit’te girilen ölçülerin birimi tanımlanır.
- Çözüm ağı gerçekleştirilirken yapılan küçük parçalara bölme işleminde gerekli modifikasyonlar gerçekleştirilir.
- Segregated Implicit Steady 2D çözüm yöntemi seçilir.
- Energy komutu aktif hale getirilerek, enerji korunumu denklemlerinin sayısal çözümü sağlanır.
- Laminer viskoz akım için çözüm modeli seçilir.
- Karışım su buharı ve hava olarak tanımlanır.
- Karışım seçilerek tanımlamalar yapılır.
- Yerçekimi terimi aktif duruma getirilerek değeri vektörel olarak girilir.
- Sınır şartları girilir.
- URF (Under Relaxation Factors) değerleri ve parçalara ayırma yöntemleri girilir. URF değerleri: Pressure: 0,3, Density: 1, Body Forces: 1, Momentum: 0,7, h₂O: 1 ve Energy: 1 olarak girilmiştir. Parçalara ayırma yöntemlerinden, basınç-hız çifti: SIMPLE, basınç: Body Force Weighted, momentum: Second Order Upwind, H₂O ve enerji: First Order Upwind seçilmiştir.
- Yazım-çizim ayarları yapılır.

- Yapılan bütün ayarlar ve girilen bütün değerler kaydedilir.
- Hesaplanmış değerler varsa sıfırlanır ve başlangıç ayar konumlarına getirilir.
- İterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatılır.

Sayısal çözümlemede basınç-hız arasındaki bağıntıyı çözebilmek için SIMPLE (Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations) methodu tercih edilmiştir. Bu metot kararlı akış için uygun bir yöntemdir. SIMPLEC (Semi-Implicit Methods for Pressure Linked Equations Consistent) metodu da kararlı akış çözümünde kullanılır. Ama URF (düzeltme katsayısı)'nın 1 alındığı problemlerde, çözümün yakınsamamasına neden olabilmektedir. PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) metodu kararsız akışlarda kullanılan bir çözüm yöntemi olup, tercih edilmemiştir.

Yakınsamanın gerçekleştiğini anlamak için Residual (artık) değerlerine bakılır. Her iterasyondan sonra kontrol gerçekleşir.

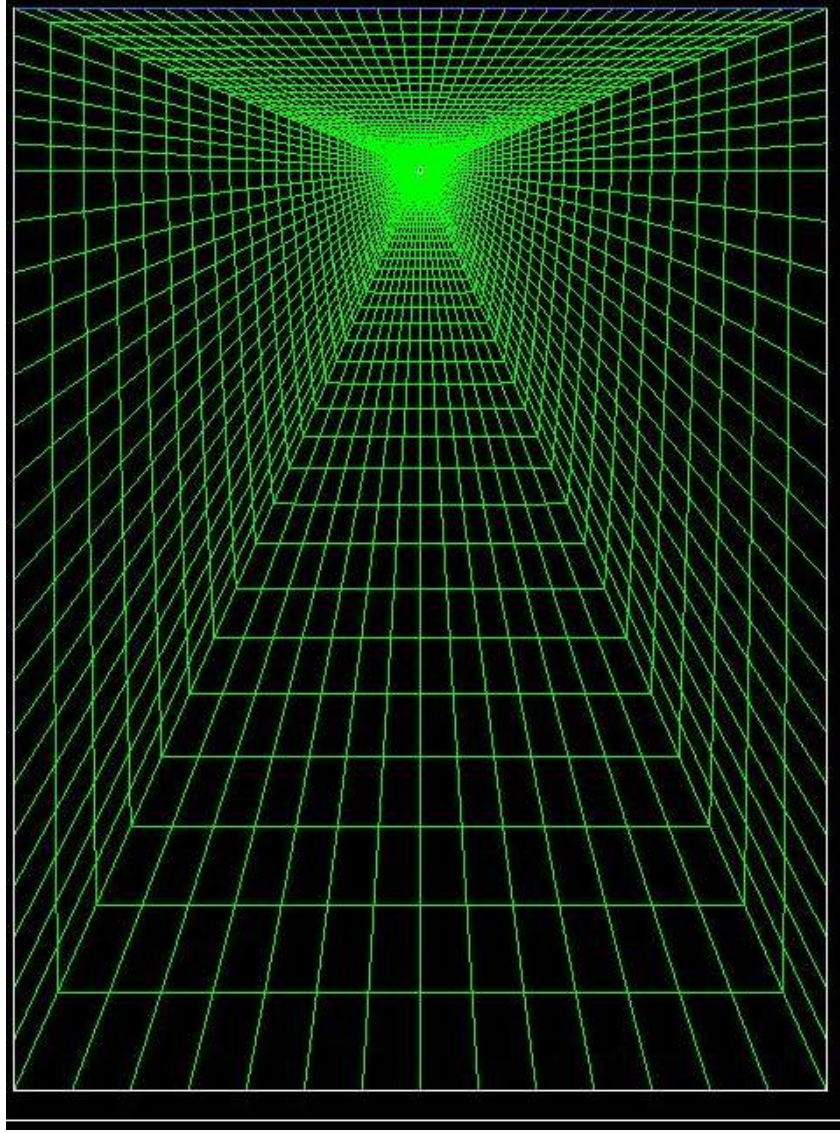
$$\frac{R_{\phi}^n}{R_{\phi}^5} \leq 10^{-3} \quad (4.10)$$

n. iterasyondaki artık, ilk beş iterasyondaki maksimum artığa oranı 10^{-3} değerinden küçük olmalıdır. Süreklilik, x,y,z koordinatlarındaki u,v,w hızlarının artık oranları 10^{-3} 'den ve enerji denklemindeki artık oranı da 10^{-6} 'dan küçük olmalıdır. Bu değerler Fluent programı tarafından tavsiye edilen değerlerdir. Yapılan çözümlemelerde bu değerlerin de altına inilmiş ve yakınsama eğrilerinin yataylaşması beklenerek çözümleme sonlandırılmıştır.

4.3 Modelin Çizimi ve Çözüm Ağının Oluşturulması

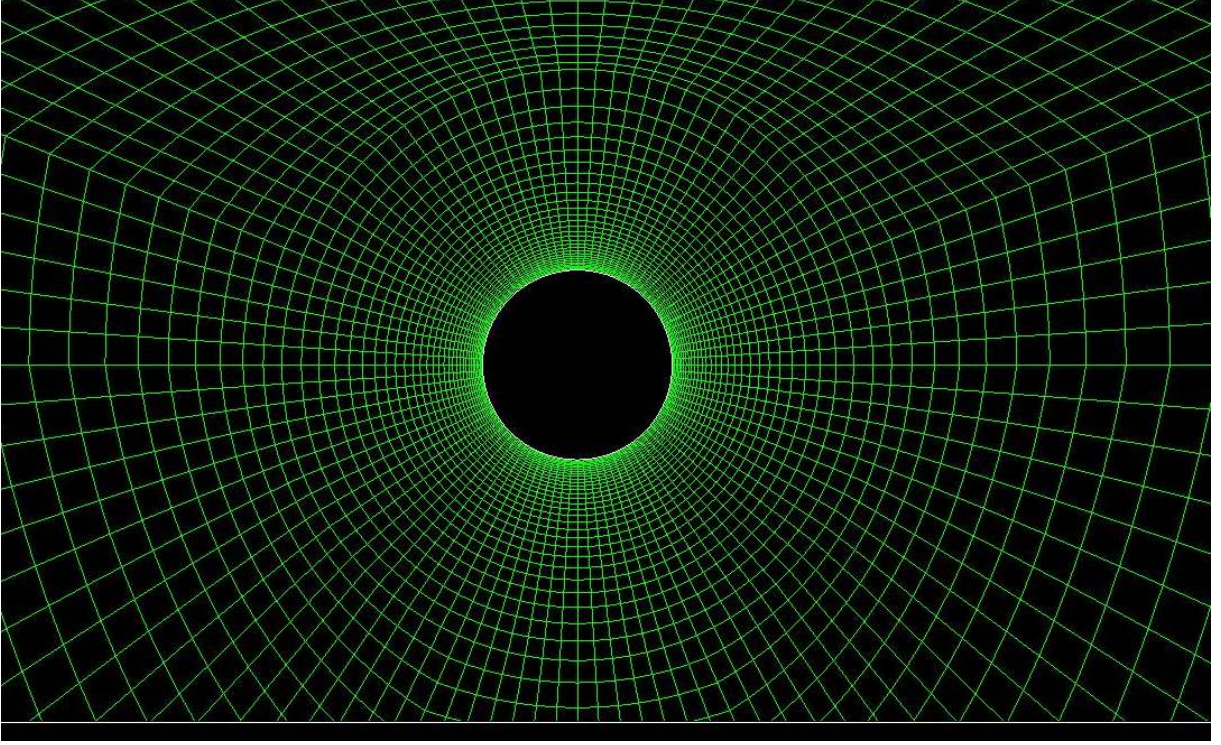
Sayısal çözümlerin gerçekleştirilebilmesi için, analiz edilecek boru doğal taşınım şartlarını sağlamak amacıyla kullanmış olduğumuz kutu içine, deneysel çalışmadaki boyutlar temel alınarak yerleştirilmiş ve çizimi yapılmıştır.

Kutu yüzeyinin düzlemsel, boru yüzeyinin ise dairesel olması nedeniyle çözüm ağının arada kalan tek bölgede oluşturulması ile çözüm ağlarının üst üste gelmediği görülmüştür. Çözüm ağlarının üst üste gelmesini sağlamak amacıyla arada kalan bölgeye bölme işlemi (decomposition) uygulanarak altı ayrı parçaya ayrılmış ve çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Sayısal çözümde kullanılan çözüm ağı

Boru yüzeyi ile kutu iç yüzeyi arasında çözüm ağının oluşturulması sonucu boru yüzeyine çok yakın sınır tabaka bölgesinde uygun ağ yapısının sağlanamadığı belirlenmiştir. Fakat asıl ilgilenilen ve hesaplamaların yapılacağı bölge, boru yüzeyine yakın sınır tabaka bölgesidir. Bu nedenle sınır tabaka bölgesinde yüzeye çok yakın uygun çözüm ağının oluşturulabilmesi amacıyla boru dışına bir sanal daire daha çizilmiştir. İki daire arasındaki bölgeye her yarım daire için 30x50 adet ağdan oluşan çözüm ağı yerleştirilmiştir. Sanal dairenin dışına Şekil 4.1’de gösterildiği gibi altı parçalı çözüm ağı oluşturulmuştur. Bu sayede deneysel çalışmanın yapıldığı kutu içinde uygun çözüm ağı ile çözümler gerçekleştirilmiş ve boru yüzeyindeki sınır tabaka bölgesinde hassas çözümler sağlanmıştır. Boru dış yüzeyi ile sanal daire arasında oluşturulan çözüm ağı ise daha yakın olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Sayısal çözümde kullanılan çözüm ağının yatay silindir yüzeyindeki yakın görünüşü

4.4 Sayısal Çalışma Sonuçları

Isıtılan yatay borudaki ısı akıları ve yüzeydeki ısı taşınım katsayıları Fluent 6.0 CFD programı ile sayısal olarak belirlenmiştir. Sayısal çözüm Şekil 4.1’ de görülen çözüm ağı kullanılarak yapılmıştır. Yatay boru yüzey sıcaklıkları $20^{\circ}\text{C} \div 60^{\circ}\text{C}$, ortam sıcaklığı ise $10^{\circ}\text{C} \div 50^{\circ}\text{C}$ arasında değişecek şekilde sınır şartları belirlenmiştir. Çalışma sıcaklığı (operating temperature), ortalama film sıcaklığı olarak ayarlanmıştır. Çözümleme sonunda programın hesaplar için kullandığı referans sıcaklık değeri ortam (akışkan) sıcaklığı olarak ayarlanmış ve yüzeydeki ısı taşınım katsayıları ve Nu sayıları hesaplatılmıştır.

Aşağıdaki Çizelge 4.1 incelendiğinde deneylerden elde edilen ve nümerik çözümlerle hesaplanan ısı geçiş miktarları arasında mutlak olarak ortalama %5.94 gibi fark olduğu görülmektedir. Aynı şekilde Çizelge 4.2’de Nu sayısı için deneyler ile nümerik çözümler arasında mutlak olarak ortalama %6.04 ve Çizelge 4.3’de taşınım ısı geçiş katsayıları için ise %6.15 fark olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.1 Deneysel ve sayısal ısı geçişinin karşılaştırılması

Deney No	Q _{Sayısal}	Q _{Denev}	% Fark
	W	W	Q _{Denev} -Q _{Sayısal}
4	5,54	6,09	9,14
5	8,64	8,91	3,09
6	12,39	12,22	-1,39
7	16,06	15,58	-3,04
9	2,18	2,57	15,05
10	5,18	5,56	6,77
11	8,40	8,73	3,76
12	12,05	12,14	0,70
14	2,08	2,49	16,51
15	4,87	5,16	5,64
16	8,27	8,37	1,17
18	2,07	2,32	10,64
19	4,95	4,97	0,42

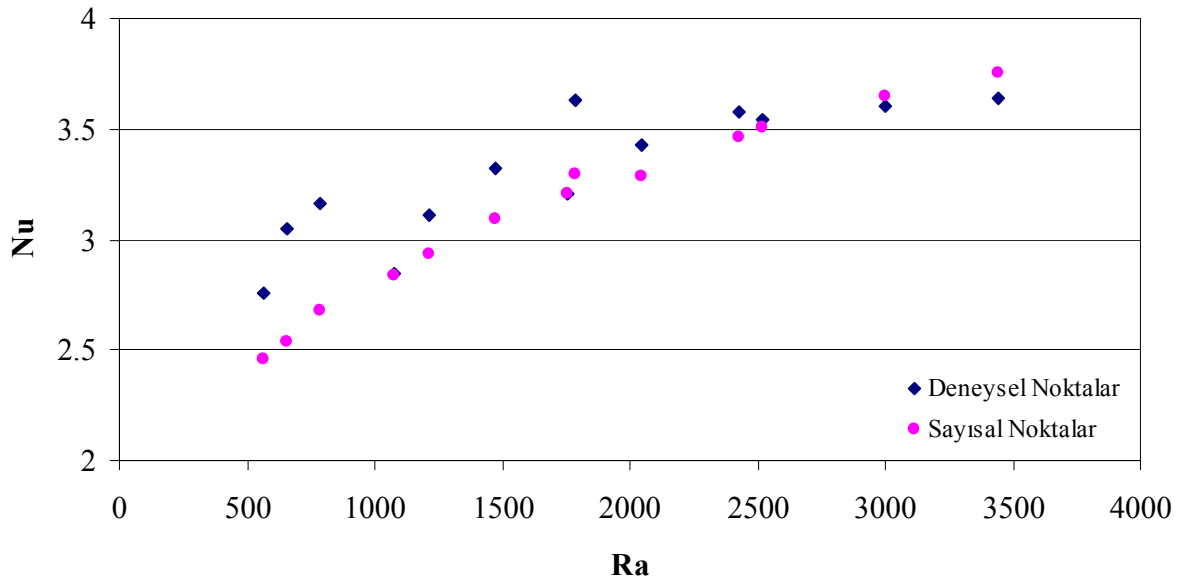
Çizelge 4.2 Deneysel ve sayısal Nu sayılarının karşılaştırılması

Deney No	Nu _{Sayısal}	Nu _{Denev}	% Fark
			Nu _{Denev} -Nu _{Sayısal}
4	3,30	3,63	9,14
5	3,46	3,57	3,10
6	3,65	3,60	-1,31
7	3,75	3,64	-3,03
9	2,68	3,17	15,39
10	3,09	3,32	6,79
11	3,29	3,43	3,99
12	3,51	3,54	0,83
14	2,54	3,05	16,64
15	2,94	3,11	5,65
16	3,15	3,20	1,60
18	2,46	2,75	10,67
19	2,84	2,85	0,48

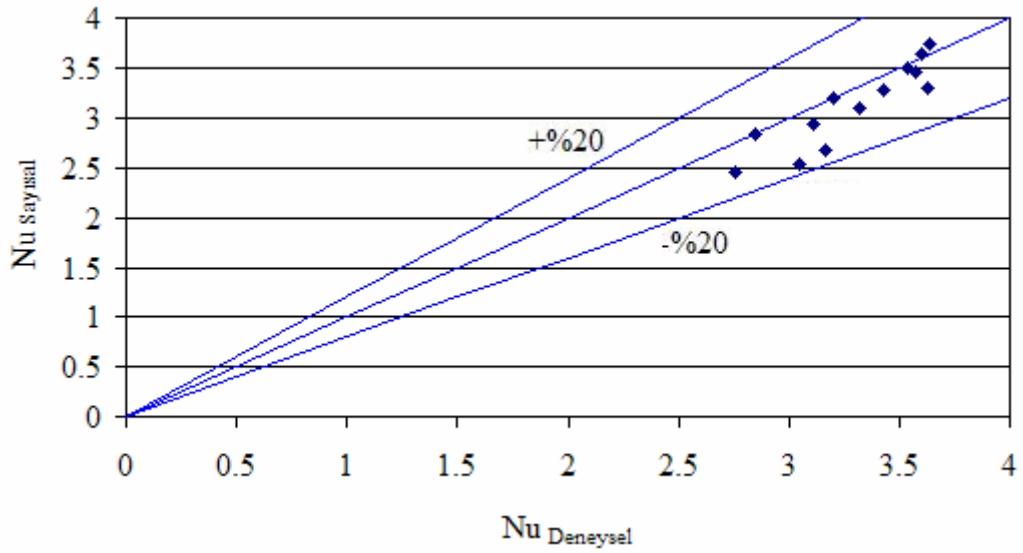
Çizelge 4.3 Deneysel ve sayısal ısı taşınım katsayılarının karşılaştırılması

Deney No	$h_{\text{Sayısal}}$	h_{Deney}	% Fark
	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$h_{\text{Deney}}-h_{\text{Sayısal}}$
4	8,97	9,87	9,14
5	9,57	9,87	3,09
6	10,24	10,10	-1,33
7	10,67	10,36	-3,04
9	7,42	8,75	15,15
10	8,67	9,31	6,79
11	9,39	9,75	3,74
12	10,04	10,19	1,44
14	7,12	8,68	17,96
15	8,45	8,96	5,62
16	9,21	9,36	1,56
18	7,19	8,04	10,62
19	8,4	8,44	0,47

Deneysel veriler kullanılarak, hesaplanan Nu-Ra değerleri ile sayısal çözümleme sonucunda elde edilen değerlerin grafik üzerinde noktasal olarak karşılaştırması Şekil 4.3’de verilmektedir.



Şekil 4.3 Deneysel değerler ve sayısal çözüm sonuçlarının Nu-Ra koordinatlarında gösterimi

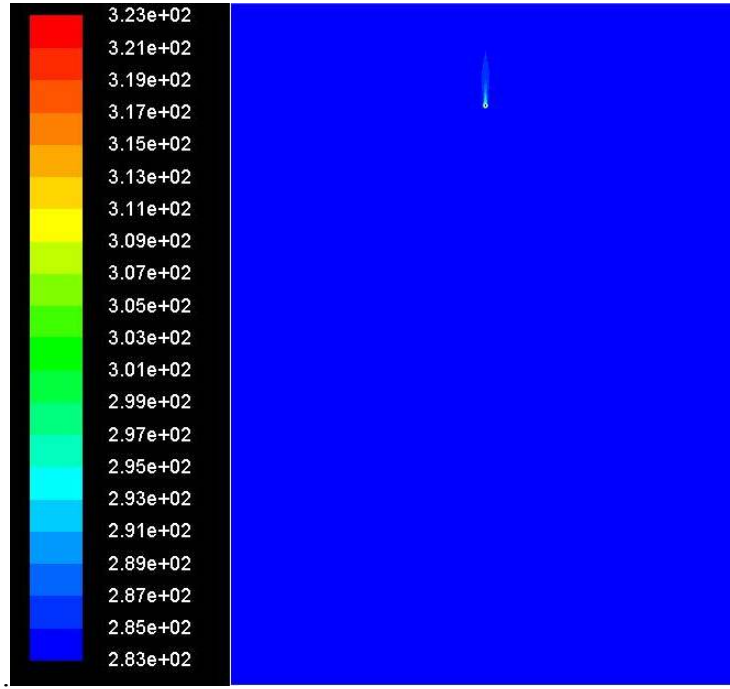


Şekil 4.4 Deneysel ve sayısal Nu sayılarının karşılaştırması

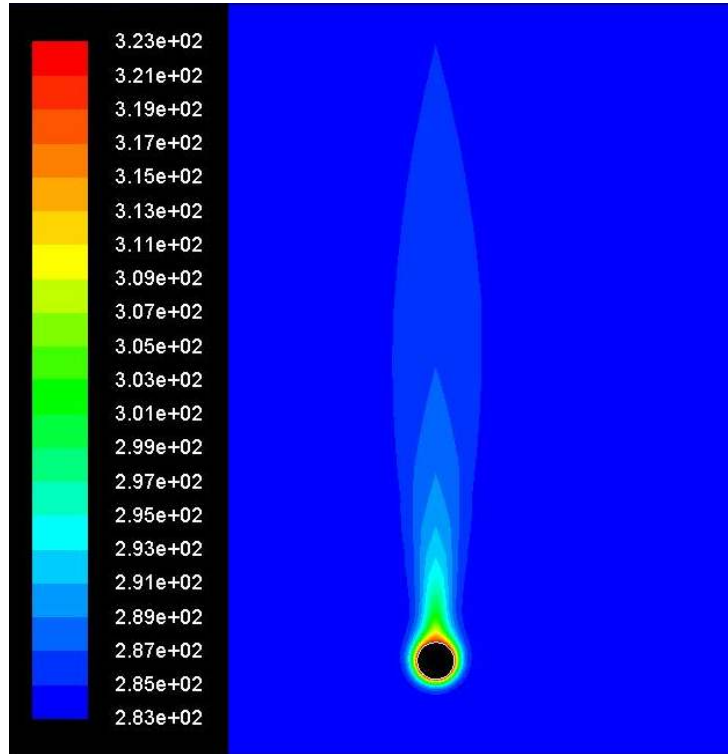
Deneysel ve sayısal Nu sayıları arasındaki sapma değerlerinin $\pm \%20$ aralığında kaldığı Şekil 4.4’de görülmektedir.

Yatay borudan serbest taşınım şartlarında ısı geçişi probleminin sayısal çözümü sonucunda ısı taşınım katsayıları ve Nu sayıları hesaplatıldığı gibi model içindeki sıcaklık dağılımı da çizdirilmiştir. Kutu içindeki kapalı hacmin yatay boruya göre çok büyük olması nedeniyle ısıtılan borunun, kutu içindeki sıcaklık dağılımına etkisinin sınırlı seviyede olduğu gözlenmiştir. Burada, örnek olarak $T_{\infty}=10^{\circ}\text{C}$, $T_0=50^{\circ}\text{C}$, sınır şartlarında yapılan 18. deneyin sonuçları verilmiştir.

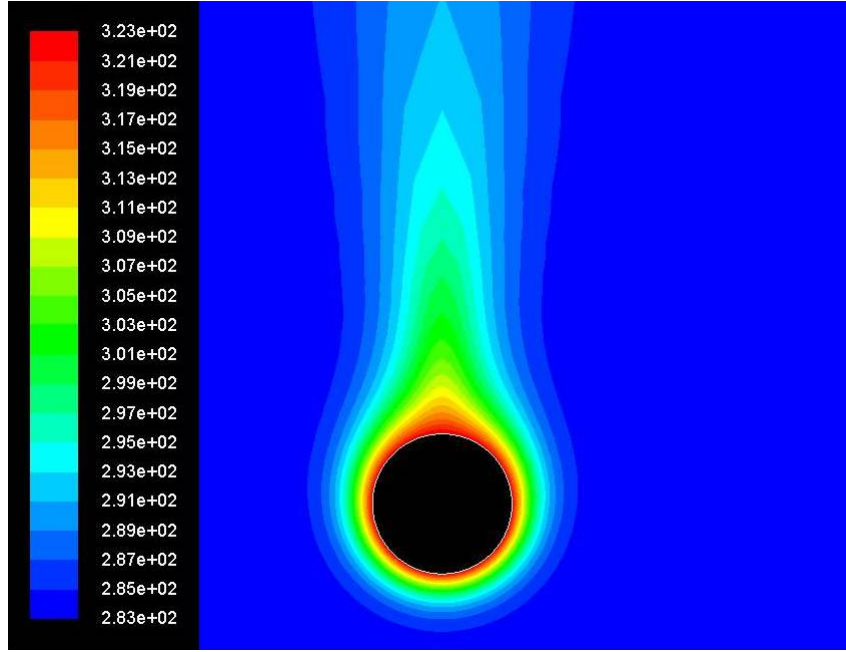
Isıtılan yatay borunun kutu içindeki sıcaklık dağılımına etkisi Şekil 4.6’da daha yakından gösterilmiştir. Ayrıca asıl ilgilenilen ve sayısal çözümlemelerin yapıldığı bölge, boru yüzeyine yakın sınır tabaka bölgesi olduğundan bu bölgedeki sıcaklık dağılımını ve sınır tabaka ayrılmasını daha yakından gösterebilmek amacıyla Şekil 4.7 verilmiştir



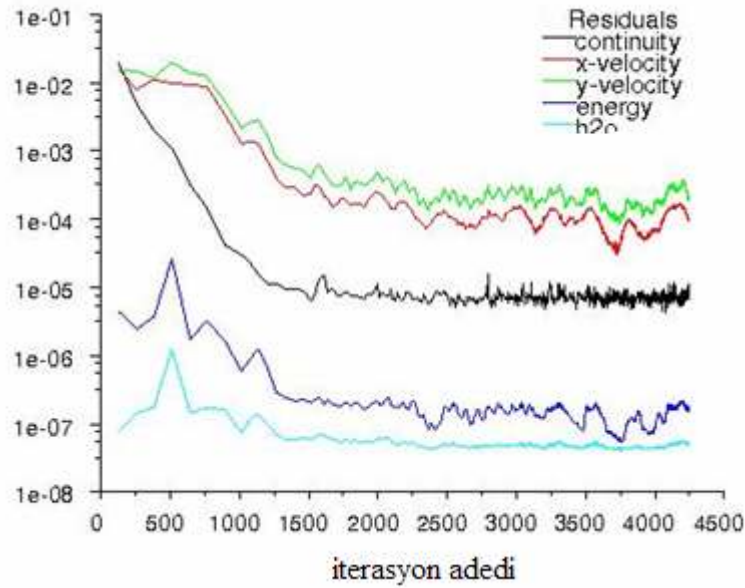
Şekil 4.5 Sayısal çözümde kutu içinde ve silindir yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı



Şekil 4.6 Isıtılan yatay borunun kutu içinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı

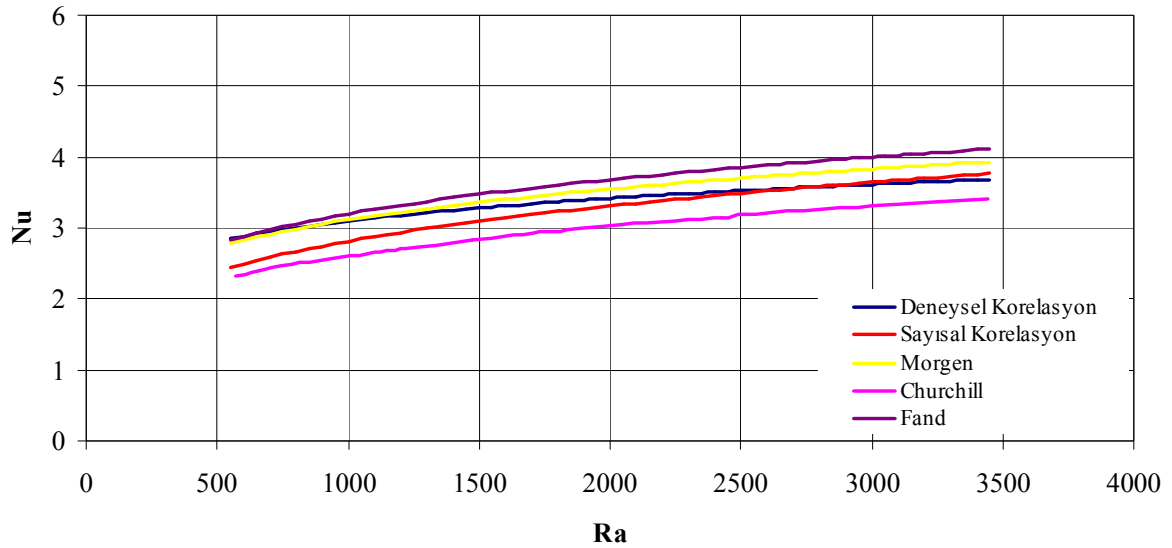


Şekil 4.7 Yatay boru yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ve oluşan sınır tabaka ayrılması



Şekil 4.8 Yakınsaklık kriteri kabul edilebilir hata 'Residual' değerlerinin iterasyonla değişimi

Sayısal çözümde kullandığımız model, metot ve çözüm algoritmalarının seçiminin ne derece isabetli olduğunu anlayabilmek için serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi üzerine çalışmış araştırmacılar tarafından deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen genel kabul görmüş korelasyonlar, aynı sınır şartlarında bilgisayardan elde edilen sayısal çözümlerin sonuçları ile karşılaştırılıp, sonuçlar grafik ve tablo şeklinde sunulmuştur.



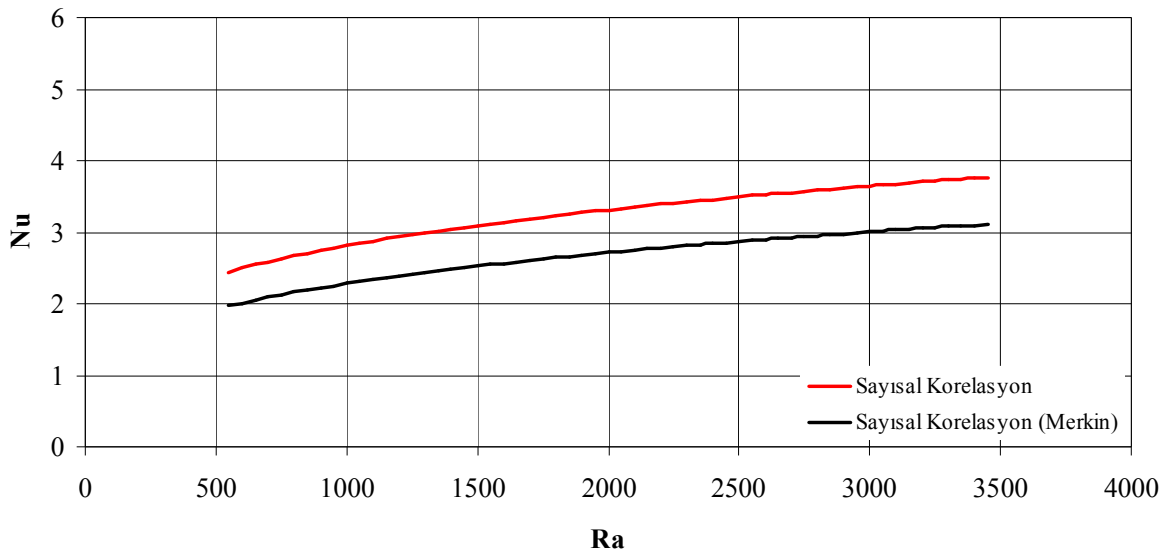
Şekil 4.9 Oluşturulan sayısal korelasyon ve önceki araştırmacılar tarafından deneysel çalışmalar sonucunda önerilen genel kabul görmüş korelasyonlar

Çizelge 4.4 Doğal taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi üzerine daha önceden çalışan araştırmacıların elde ettiği sonuçlarının bu çalışmada kullanılan sayısal çözüm ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

	Deneysel	Morgen	Churchill	Fand	Fluent
Ra	Nu	Nu	Nu	Nu	Nu
1788,10	3,63	3,47	2,95	3,59	3,30
2424,02	3,57	3,68	3,16	3,81	3,46
3003,27	3,60	3,83	3,31	4,11	3,65
3441,81	3,64	3,93	3,41	4,09	3,75
784,61	3,17	2,98	2,48	3,05	2,68
1474,48	3,32	3,35	2,83	3,45	3,09
2044,68	3,43	3,56	3,04	3,68	3,29
2518,99	3,54	3,71	3,18	3,84	3,51
653,19	3,05	2,88	2,39	2,95	2,54
1216,77	3,11	3,23	2,72	3,32	2,94
1754,20	3,20	3,46	2,94	3,57	3,21
567,79	2,75	2,80	2,32	2,87	2,46
1076,22	2,85	3,16	2,65	3,24	2,84

Ayrıca sonlu farklar yöntemini kullanarak hesaplama yapan Fluent programı ile elde edilen sayısal çözüm sonuçları, serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişini sonlu farklar yöntemini kullanarak sayısal incelemiş olan Merkin'in sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Merkin tarafından yapılan çalışmada yerel Nusselt sayıları $Nu_{D,w} = f(Gr_{D,w})$ olarak verilmiştir. Bu tez çalışmasında önerilen korelasyon için gerekli olan hesaplamalar, toplam yoğunluk farkına göre tanımlanan Gr sayısına bağlı yapılmış olmasına rağmen, Merkin 'in çözümleri ile karşılaştırma yapılabilmesi için korelasyon $Nu_D = f(Gr_D)$ formunda tekrar oluşturulmuştur. Deneysel ölçüm sonuçları ile hesaplanan Gr_D değerleri kullanılarak Merkin'in önerdiği korelasyon ile Nu sayıları hesaplanmış ve bu tez çalışması deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sayısal çözüm sonuçları kullanılarak oluşturulan korelasyon eğrisi ile, Merkin'in önerdiği korelasyona bağlı yapılan hesapların sonuç eğrisinin benzer karakterde olduğu görülmektedir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Oluşturulan sayısal korelasyon ve Merkin'in sonlu farklar yöntemini kullanarak önerdiği korelasyon

4.5 Serbest Taşınımında Kritik Kaplama (Isı Yalıtım) Kalınlığı

Serbest taşınım şartlarında boru yüzeyine kaplanan malzeme kalınlığı ile ısı geçişi değişmektedir. Bölüm 3.4'de açıklandığı gibi, kritik çapın altındaki çapa sahip borularda kritik çapa kadar kaplama yapıldığında ısı geçişi artmaktadır. Kritik kaplama yarıçapı, kaplanan malzemenin ısı iletim katsayısı ve yüzeydeki ısı taşınım katsayısına bağlıdır.

$$r_{kr} = \frac{k_k}{h_\infty} \quad (4.11)$$

Literatürde kritik kaplama yarıçapı, boru yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı sabit alınarak hesaplanmaktadır. Fakat yüzeye kaplanan malzemenin kalınlığına bağlı olarak dış yüzey

Serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi için Morgen tarafından önerilen korelasyon kullanılarak $Nu_D=f(Ra)$ sayısı hesaplanmıştır. Problemin birinci bölümünde dış yüzeydeki ısı taşınım katsayısı sabit tutularak, kaplama kalınlıkları değiştirilmiş ve ısı geçiş miktarları hesaplanmıştır.

Sonuçta bu problem için kritik kaplama (yalıtım) yarıçapının $r_{kr}= 8,1\text{mm}$ olduğu belirlenmiştir. Kaplama yarıçapına bağlı olan değerlerin değişimi Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Isı taşınım katsayısı sabit alınarak hesaplanan değerlerin kaplama yarıçapına bağlı değişimleri

$r_k(\text{mm})$	$T_k(^{\circ}\text{C})$	Gr	Nu	$h_o(\text{W/mK})$	$Q(\text{W/m})$
2.50	39.44	301.40	2.33	12.34	3.7672
3.00	38.15	491.17	2.55	12.34	4.2200
3.50	36.87	732.33	2.75	12.34	4.5761
4.00	35.65	1023.96	2.93	12.34	4.8515
4.50	34.51	1364.28	3.09	12.34	5.0612
5.00	33.46	1750.45	3.24	12.34	5.2182
6.00	31.64	2650.94	3.51	12.34	5.4156
7.00	30.15	3709.90	3.73	12.34	5.5076
7.50	29.51	4294.34	3.84	12.34	5.5274
8.00	28.92	4913.42	3.94	12.34	5.5347
8.10	28.81	5043.07	3.96	12.34	5.5348
8.25	28.65	5235.54	3.98	12.34	5.5344
8.50	28.40	5565.86	4.03	12.34	5.5321
9.00	27.91	6250.52	4.12	12.34	5.5218
10.00	27.08	7712.67	4.29	12.34	5.4848
11.00	26.37	9293.17	4.44	12.34	5.4334
12.00	25.78	10986.71	4.58	12.34	5.3739
13.00	25.27	12789.03	4.71	12.34	5.3100
15.00	24.45	16706.60	4.96	12.34	5.1786
20.00	23.14	28216.59	5.47	12.34	4.8719
30.00	21.90	57998.31	6.26	12.34	4.4094
40.00	21.32	96124.87	6.89	12.34	4.0930
50.00	21.00	142102.85	7.41	12.34	3.8631
55.00	20.88	167927.98	7.65	12.34	3.7697

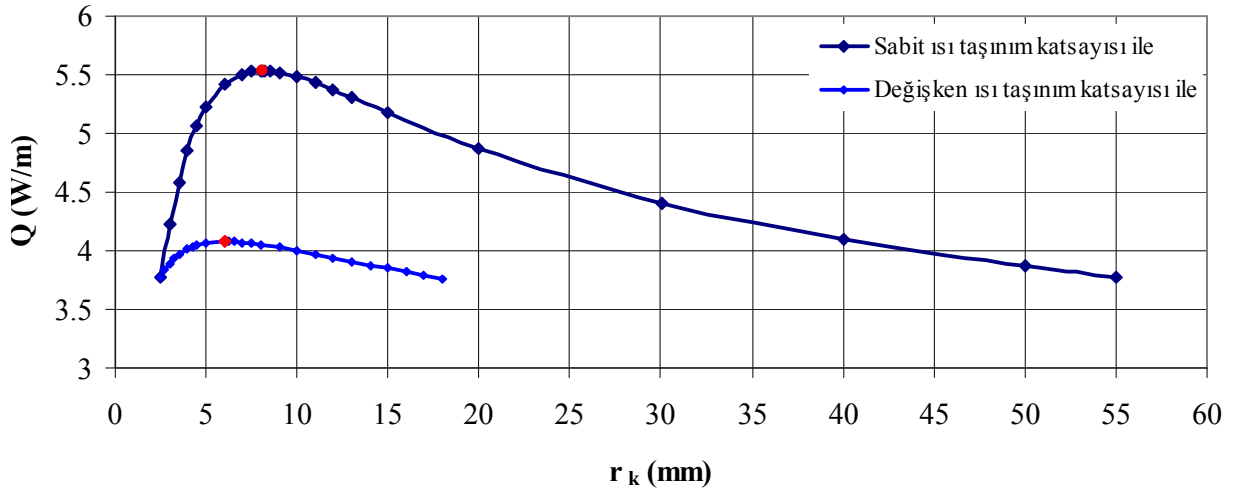
Problemim ikinci bölümünde boru kaplaması dış yüzeyindeki ısı taşınım katsayılarının kaplama yarıçapıyla değişimi hesaplanmıştır (Eşitlik 4.14).

$$h_o = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (4.14)$$

Hesaplanan ısı taşınım katsayıları kullanılarak problemin birinci kısmındaki işlemler tekrarlanmış ve ısı geçişinin kaplama yarıçapına göre değişimi belirlenmiştir. Sonuçta problemin ikinci kısmı için kritik kaplama (yalıtım) yarıçapının $r_{kr}= 6 \text{ mm}$ olduğu görülmektedir. Sayısal sonuçlar Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Isı taşınım katsayısının değişimi dikkate alınarak hesaplanan değerlerin kaplama yarıçapına bağlı değişimleri

$r_k(\text{mm})$	$T_k(^{\circ}\text{C})$	Gr	Nu	$h_o(\text{W/K})$	$Q(\text{W/m})$
2.50	39.44	301.39	2.33	12.34	3.7692
2.75	38.85	390.77	2.45	11.77	3.8322
3.00	38.29	494.57	2.56	11.27	3.8850
3.25	37.77	613.47	2.66	10.83	3.9279
3.50	37.29	748.08	2.76	10.43	3.9627
4.00	36.40	1066.78	2.95	9.74	4.0135
4.25	35.99	1251.95	3.04	9.44	4.0316
4.50	35.61	1455.02	3.13	9.17	4.0458
5.00	34.91	1916.75	3.30	8.68	4.0652
6.00	33.71	3074.17	3.60	7.90	4.0781
6.10	33.59	3221.23	3.64	7.82	4.0780
6.25	33.44	3414.26	3.68	7.73	4.0776
6.50	33.19	3775.50	3.75	7.57	4.0760
7.00	32.72	4562.89	3.88	7.28	4.0702
7.50	32.29	5439.07	4.01	7.02	4.0617
8.00	31.89	6406.65	4.14	6.78	4.0512
9.00	31.19	8625.75	4.38	6.37	4.0261
10.00	30.58	11238.77	4.60	6.02	3.9976
11.00	30.05	14262.89	4.81	5.72	3.9676
12.00	29.58	17714.14	5.01	5.45	3.9371
13.00	29.16	21607.58	5.20	5.22	3.9065
14.00	28.79	25957.46	5.38	5.02	3.8764
15.00	28.45	30777.32	5.56	4.83	3.8469
16.00	28.15	36080.07	5.73	4.67	3.8182
17.00	27.87	41878.08	5.89	4.51	3.7904
18.00	27.61	48183.22	6.05	4.38	3.7634



Şekil 4.12 Isı taşınım katsayısının sabit olduğu veya değişiminin dikkate alındığı durumlar için, ısı geçişinin kaplama yarıçapına göre değişimi

Serbest taşınım şartlarında incelenen borularda, gerçek taşınım katsayılarının dikkate alınması sonucu, kritik çapın küçük çap değerlerine doğru kaydığı anlaşılmıştır (8,1 mm - 6 mm).

Kritik kaplama yarıçapında sağlanan maksimum ısı geçişinin de azaldığı belirlenmiştir (5,53-4,07 W/m).

Ayrıca minimum kaplama yarıçapındaki ısı geçişinin olduğu maksimum kaplama yarıçapının da küçük çap değerlerine doğru kaydığı görülmüştür (55mm - 18mm).

Yukarıda açıklanan üç sonuç, serbest taşınım şartlarında kritik çapın, ısı taşınım katsayısının değişiminin dikkate alınarak belirlenmesi gerektiğini göstermiştir.

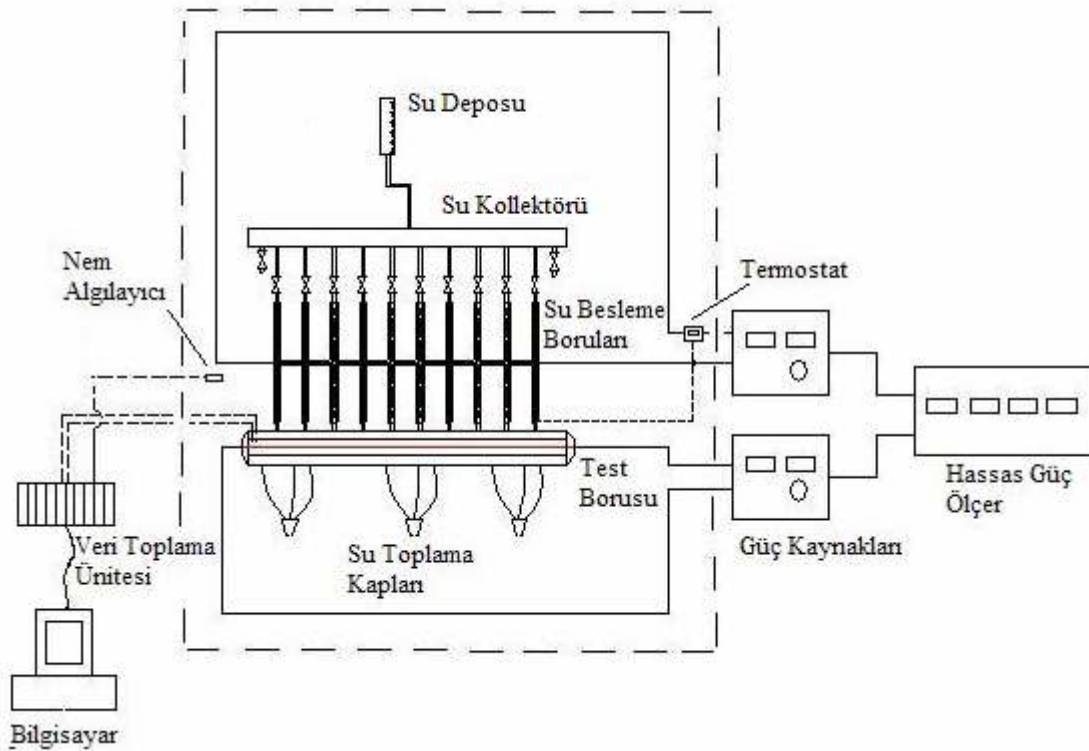
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deney sistemi, deneysel çalışmanın aşamaları ve kullanılan ölçü aletleri hakkında bilgi verildikten sonra, ilgili hesaplamalar açıklanarak, elde edilen deneysel ölçüm sonuçları sunulmuştur.

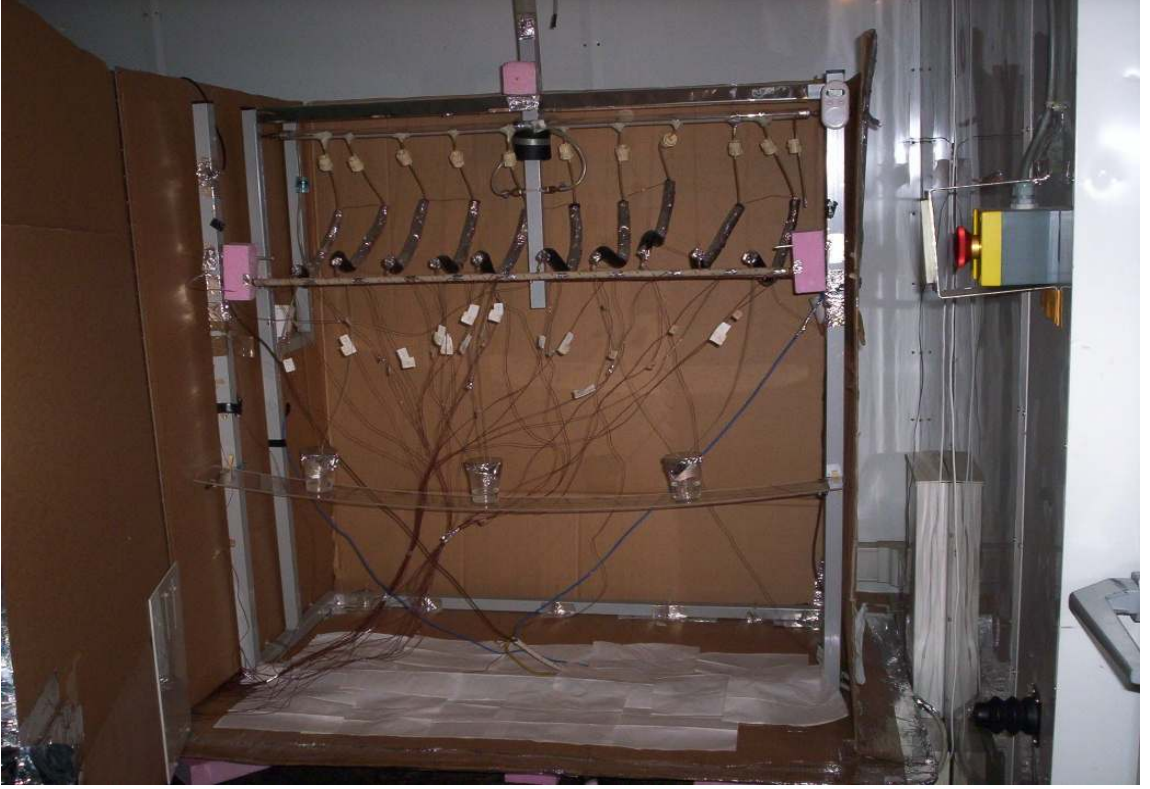
5.1 Deney Tesisatı

Sekiz ana bölümden oluşan deney tesisatı, Yıldız Teknik Üniversitesi'nde oluşturulup Arçelik A.Ş'nin Araştırma ve Geliştirme Merkezinde kurulmuştur.

Deney tesisatı; deneysel çalışma bölgesini çevreleyen ve sert kartondan imal edilmiş koruma kabini, test borusu yüzeyini homojen olarak ıslatabilmek amacıyla kullanılan su besleme ünitesi, iki farklı çapta imal edilmiş test borusu, veri toplama ünitesi, T tipi termoelemanlar, nemölçer, terazi, test borusu içindeki ve su besleme borularının yüzeyindeki ısıtıcılara gerekli olan elektrik enerjisini sağlayan iki adet güç kaynağı ve bu değerleri hassas olarak okuyabilmek için kullanılan dijital güç ölçerden meydana gelmektedir. Deney tesisatının şematik resmi Şekil 5.1'de, fotoğrafı ise Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.1 Deney Tesisatının Şematik Resmi



Şekil 5.2 Deney tesisatının şartlandırılmış oda içindeki görünümü



Şekil 5.3 Deney tesisatının veri toplama durumdaki görünümü

5.1.1 Şartlandırılmış Oda ve Deney Tesisatı Kabini

Test borusunun bulunduğu ortamın sıcaklığını ve bağıl nemini istenilen değerlerde hassas olarak sabit tutabilmek amacıyla deneyler Arçelik A.Ş. 'nin Çayırovadaki ARGE merkezinde Termodinamik laboratuvarında bulunan (WEISS 1) şartlandırılmış odada yapılmıştır. 4x4,9x2,55 ölçülerindeki odada ortam sıcaklığı 5 ÷ 50 °C bağıl nemi %20 ÷ %95 arasında istenilen değere ayarlanabilmektedir. Oda içindeki hava hızının 0,2 m/s'den küçük olduğu üretici firma tarafından belirlenmiştir. Yapılacak deneysel çalışma doğal taşınım şartlarında olacağından dış ortamdaki havanın durgun olması gerekmektedir. Arçelik A.Ş bünyesinde bulunan LDA cihazı ile kalibre edilmiş sıcak-tel hız ölçer ile odanın farklı noktalarından yapılan ölçümler sonucunda, hava hızının 0-0,25 m/s arasında değişken değerler gösterdiği belirlenmiştir. Test borusunun bulunduğu ortamda doğal taşınım şartlarını sağlayabilmek amacıyla, çalışma bölgesini dört yan yüzey ve tabandan çevreleyen ve sert karton malzemeden imal edilmiş bir koruma kabini yapılmıştır. Kabin içinde yapılan hız ölçümleri sonucu istenilen durgun ortam sağlandığı belirlenmiştir. Deney hazırlık çalışmalarının yapılabilmesi için kabinin ön yüzü açılabilir durumdadır ve deney sürecinin izlenebilmesi için bir gözetleme kapağı bulunmaktadır. Hazırlık aşaması bitirildikten sonra ön yüz ve gözetleme kapağı kapatılarak, deneyler yapılmaktadır.

Veri toplama işlemi için odanın mevcut veri toplama ünitesi kullanılmaktadır. İşlem ölçüm aletlerinden alınan sıcaklık ve nem verilerinin analiz edilmek üzere, elektronik kartlar ve bir yazılım programı ile bilgisayar ortamına aktarılmasını kapsamaktadır.

5.1.2 Su Besleme ve Toplama Ünitesi

Su besleme ünitesi test borusu yüzeyine sarılan malzemenin homojen olarak ısıtılabilmesini sağlayan ve dört ana parçadan oluşan bir düzendir.

5.1.2.1 Su Kolektörü-Su Deposu-Ana Besleme Borusu

Su kolektörü, on adet su besleme borusunun bağlandığı, 20,3mm dış çapında, pleksiglas malzemeden imal edilmiş silindirik bir parçadır. Uç noktalarında sistemde oluşabilecek havayı almak amacıyla yerleştirilmiş iki adet boşaltma musluğu bulunmaktadır.

Su deposu yukarıda sözü geçen su kolektörüne üst seviyeden 8 mm çapında esnek bir boru ile bağlantılı ölçekli ve kapalı bir kap olup, içinde en alt noktasına kadar uzanan 3,15mm dış çapında ve 43,5mm uzunluğunda ana besleme borusunu bulundurmaktadır. Ana besleme borusu kullanılarak şırınga ile istenilen miktarda su ile doldurulmaktadır. Deney süresince su

kolektörüne su depodan gelmekte ve deney sonunda kalan su başlangıçta olduğu gibi yine su besleme borusu ve şırınga kullanılarak toplanıp tartılmaya hazır hale getirilmektedir.

5.1.2.2 Su Besleme Boruları

Su deposundan kolektöre gelen suyun yatay boru yüzeyine sarılan emici malzemeyi homojen ıslatabilmesi için, kolektör üzerine eşit uzaklıkta on adet delik açılmış ve buralara dış çapı 3,25mm olan esnek borular bağlanmıştır. Ayrıca boruların kolektöre yakın uçlarında 0-250 ml arasında ayarlanabilen vanalar yerleştirilmiştir. Bu vanalar sayesinde yüzeyin ihtiyacı olan su miktarı, eşit değerlere ayarlanmaları sonucu homojen olarak temin edilebilmektedir.

5.1.2.3 Su Isıtıcısı ve Termostat

Sistemde belirlenen enerji dengesini temel alan hesaplamaların yapılabilmesi için, rejim halinde, ıslak yüzey sıcaklığı ile besleme suyu sıcaklığının eşit olması gerekmektedir. Bu sebeple, sabit dış otam sıcaklığında ortam sıcaklığından yüksek yüzey sıcaklığında yapılan deneylerde beslenen suyun ısıtılması planlanmıştır. Belirtilen amaca yönelik olarak, su besleme borularının dış yüzeyine birer metre boyunda 0,58 mm çapında emaye kaplı direnç teli sarılmış ve dıştan izole edilmiştir. Isıtıcı, on boru boyunca seri bağlı olarak devam etmekte ve tek bir güç kaynağından beslenmektedir. Verilen enerjinin borulara eşit dağıtılmasını sağlamak amacıyla, ısıtıcının eşit uzunlukta ve benzer sarılmasına özen gösterilmiştir. Diğer taraftan su sıcaklığını ayarlayabilmek için PID kontrollü bir termostat kullanılmıştır. Termostat, besleme borularının herhangi birinin ucuna yakın bir noktasından sinyal almakta ve güç kaynağına kumanda etmektedir. Güç kaynağından ihtiyaca yakın ayarlanmış enerji değerini kontrollü olarak sisteme veren termostat, kendi üzerinde set edilmiş olan ıslak yüzey sıcaklığını sağlamaya çalışmaktadır.

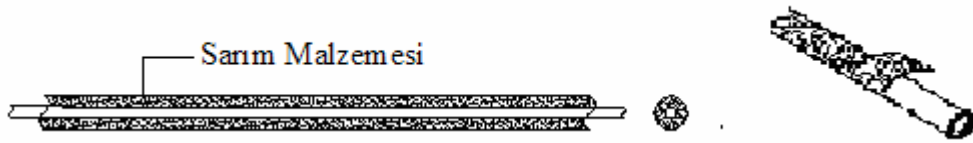
5.1.2.4 Su Toplama Kapları ve Kılcal Su Toplama Boruları

Plastik malzemedan imal edilmiş, dış çapı 1,65mm olan esnek su toplama boruları, yatay test borusu yüzeyindeki fazla suyu toplamak amacıyla kullanılmaktadır. Su toplama borularının bir ucu test borusuna tutturulmuş olup diğer ucu su toplama kabının içine girmektedir. Kılcal boru içinden kendi cazibesıyla süzülen fazla suyun toplandığı üç adet kabın üst yüzeyleri alüminyum folyo bant ile kapatılmış ve sadece kılcal su toplama borularının girebileceği çapta boru sayısı kadar delik açılmıştır. Deney süresince su toplama kaplarının üst yüzeylerinin kapalı olması buharlaşmadan oluşabilecek yanlış ölçüm değerlerini engellemektedir.

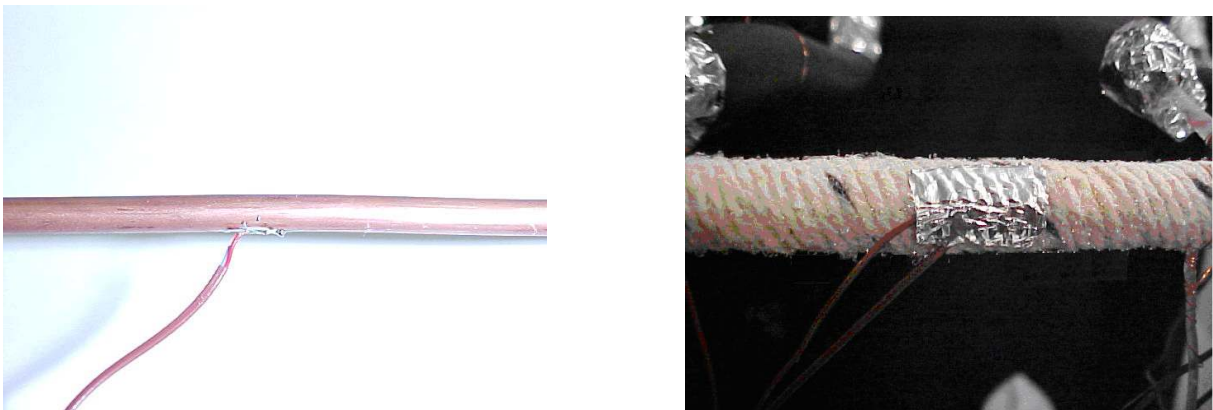
5.1.3 Yatay Test Borusu

Test boruları bakır malzemeden 1 m boylarında ve 4,8mm ve 9,45mm dış çaplarında olmak üzere 2 adet hazırlanmıştır. Boru dış yüzeyinde istenilen sıcaklık değerlerini üniform tutabilmek amacıyla boru içlerine silikon kaplı direnç telleri merkezlenerek yerleştirilmiştir. 4,8 mm dış çapındaki birinci boru için, tel çapı 0,35mm dış çapı 3,25mm ve direnç değeri 11,3 Ω olan silikon kaplı direnç; 9,45mm dış çapındaki ikinci boru için ise, tel çapı 0,75mm, dış çapı 5,85mm ve direnç değeri 3,4 Ω olan silikon kaplı direnç kullanılmıştır.

Ayrıca test borularının yüzeyine, eksenel yönde, termoelemanların kısmen gömülebileceği derinlikte 10 cm aralıklarla 11 adet çentik açılmıştır. Orta noktada ise çevresel sıcaklık dağılımını belirleyebilmek için, radyal yönde 90⁰ açıyla 3 adet çentik daha oluşturulmuştur. Numaralandırılan termoelemanlar çentiklere lehimlenerek yüzey sıcaklık ölçümü için hazır hale getirilmiştir. Test borusunun kaplamasız durumdaki deneyleri tamamlandıktan sonra, yüzeyine emici malzeme sarılmış ve lehimlenmiş olan termoelemanların tam üzerine gelecek şekilde farklı 14 adet termoeleman, malzeme yüzeyine alüminyum folyo bant ile yapıştırılmıştır. (Şekil 5.5 de görülmektedir)



Şekil 5.4 Boru yüzeylerine su emici malzeme sarım şekli ve sarılmış durumu



Şekil 5.5 Boruların kaplamalı ve kaplamasız durumlarında termoelemanların yüzeye bağlantısı

5.1.4 Ölçümler İçin Kullanılan Diğer Sistem ve Cihazlar

5.1.4.1 Veri Toplama Ünitesi

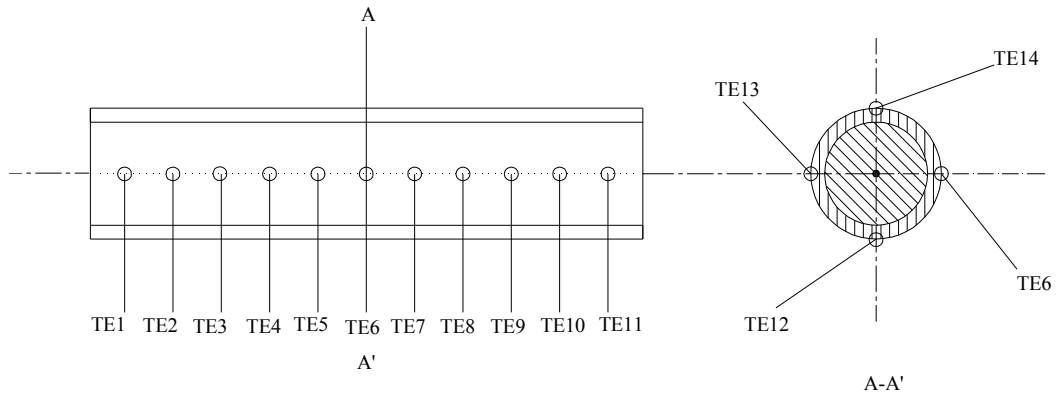
Deneysel çalışmalar 4x4,9x2,55m ölçülerindeki şartlandırılmış odada gerçekleştirilmiş olup oda içinde bulunan dört istasyondan birinin veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Veri toplama ünitesinde aynı anda 64 kanaldan sıcaklık, 10 kanaldan mV veya mA değerleri ile kontrol ve iki kanaldan voltaj değeri okunabilmektedir. Bu iki kanal basınç veya bağıl nem ölçümü için kullanılmaktadır. Deney tesisatına bağlı T tipi termoelemanlar ile sıcaklık ve Veisala marka nem ölçer ile de ortamın bağıl nemi veri toplama ünitesi kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca oda içindeki tüm istasyonların veri toplama ünitelerinin bağlı olduğu ve anlık olarak istenilen aralıkta ölçüm değerlerinin kaydedilebilmesine, izlenebilmesine, grafik üzerine yansıtılabilmesine ve deney sonrası analiz yapılabilmesine olanak sağlayan bir çalışma istasyonu (work station) ve verilerin bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan HP VEE tabanlı bir yazılım programı bulunmaktadır. Program Arçelik A.Ş çalışanları tarafından ihtiyaca yönelik olarak geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuştur. Bu program sayesinde, ölçülen değerler anlık olarak görülebildiği gibi aynı zamanda, ölçülen değerler veya istenilen ortalama değerler grafik olarak da izlenebilmektedir. Bahsedilen özellikler deney tesisatının rejime girme durumunun belirlenmesinde ve deney sonrası analiz yapılabilmesinde kolaylık sağlamaktadır.

5.1.4.2 Termoelemanlar

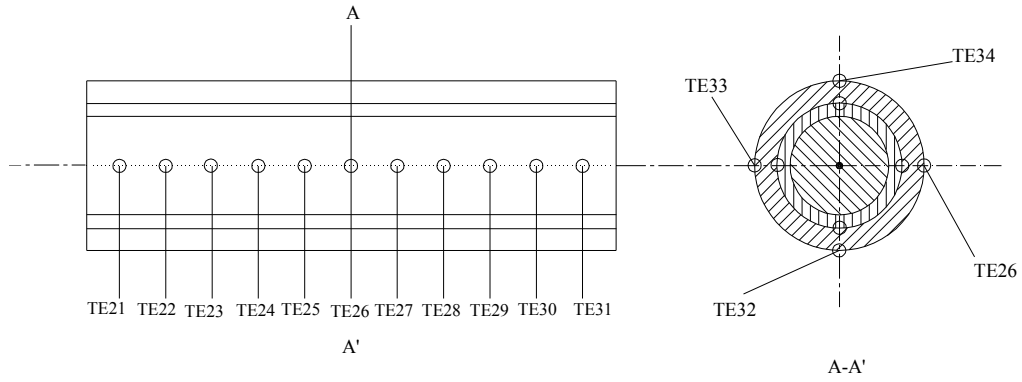
Sıcaklık ölçümünde, Arçelik A.Ş bünyesinde bulunan hassas referans termometre ile kalibre edilmiş olan T tipi termoelemanlar kullanılmıştır. Yatay bakır boruların yüzeyine açılan çentiklere lehimlenen 14 adet termoeleman ile yüzeydeki ortalama sıcaklık değeri ölçülürken, sarılan malzeme yüzeyine yapıştırılan termoelemanlar ile de dış yüzeydeki sıcaklık dağılımı belirlenmektedir. Borunun kaplamalı ve kaplamasız durumunda termoelemanların yerleşimi sırasıyla Şekil 5,6 ve 5,7’de ise görülmektedir. Her iki borunun kaplamasız durumda dış yüzey sıcaklıklarını ölçmek için 14’er adet termoeleman ve kaplamalı durumda yüzey sıcaklıklarını ölçebilmek kullanılan 14 adet termoeleman ile toplam 42 termoeleman ortalama yüzey sıcaklığının belirlenebilmesi için yerleştirilmiştir. Kaplama dış yüzey sıcaklıklarını ölçmek için her iki boruda da aynı termoelemanlar kullanılmıştır. Ayrıca, deneysel çalışma bölgesindeki sıcaklığı belirlemek için kullanılan 2 adet ve su sıcaklığını ölçmek ve kontrol etmek amacıyla kullanılan 2 adet termoeleman ile birlikte tüm tesisatta toplam 46 adet termoeleman bulunmaktadır. Tesisat için hazırlananların dışında şartlandırılmış oda ile kutu iç sıcaklıklarını karşılaştırmak amacıyla odaya ait (19–20) 2 adet termoeleman daha eklenmiştir.

Çizelge 5.1 Termoeleman Listesi

1. Boru (D=9.45mm)		2. Boru (D=4.8 mm)	
Ölçüm Noktası	Termoeleman No	Ölçüm Noktası	Termoeleman No
T1	1	T1	35
T2	2	T2	36
T3	3	T3	37
T4	4	T4	38
T5	5	T5	39
T6	6	T6	40
T7	7	T7	41
T8	8	T8	42
T9	9	T9	43
T10	10	T10	44
T11	11	T11	45
T6 ALT	12	T6 ALT	46
T6YAN	13	T6YAN	47
T6 UST	14	T6 UST	48
T SU 1	15	T SU 1	15
T SU 2	16	T SU 2	16
T ORTAM ALT	17	T ORTAMALT	17
T ORTAM UST	18	T ORTAMUST	18
T ODA 1	19	T ODA 1	19
T ODA2	20	T ODA2	20
(T1)	21	(T1)	21
(T2)	22	(T2)	22
(T3)	23	(T3)	23
(T4)	24	(T4)	24
(T5)	25	(T5)	25
(T6)	26	(T6)	26
(T7)	27	(T7)	27
(T8)	28	(T8)	28
(T9)	29	(T9)	29
(T10)	30	(T10)	30
(T11)	31	(T11)	31
(T6 ALT)	32	(T6 ALT)	32
(T6 YAN)	33	(T6 YAN)	33
(T6 UST)	34	(T6 UST)	34



Şekil 5.6 Kaplamasız durumda 1. boru için termoelemanların yerleşimi



Şekil 5.7 Kaplamalı durumda 1. boru için termoelemanların yerleşimi

5.1.5 Nem Algılayıcı

Deneysel çalışma bölgesindeki bağıl nemi ölçmek için 0-100% aralığında ölçüm yapabilen Vaisala marka bağıl nem sensörü kullanılmıştır. Nem algılayıcının probu, boru yüzeyindeki buharlaşmadan direkt etkilenecek bölgenin dışında kalacak şekilde uygun bir noktaya sabitlenmiştir. Nemölçerin belirlediği değer birinci istasyonun veri toplama ünitesi ve HP VEE programı yardımıyla anlık olarak gözlenmiş ve kaydedilmiştir.

Ölçüm belirsizliği oranı $>4(1/4)$ (95% Güvenilirlik aralığı, $k=2$)

5.1.6 Dijital Terazı

Test borusu yüzeyinden buharlaşan su miktarının belirlenmesi için ağırlık yöntemi uygulanmıştır. Metler marka Toledo PG5002-S tipinde maximum kapasitesi 5100 g olan dijital terazi kullanılmıştır. Terazı, Arçelik A.Ş bünyesinde kalibre edilen diğer cihazlar gibi ISO 9001 Kalite Güvence Standartları gereğince Ulusal Metroloji Enstitüsü(UME)'nden izlenebilirliği olan kalibratör ve ölçüm standartları kullanılarak kalibre edilmiştir.

5.1.7 Güç Kaynakları

Deney tesisatında istenilen elektriksel güç değerini verebilmek amacıyla kullanılan 2 adet güç kaynağı bulunmaktadır. Birincisi HP marka 10A-60V değerlerinde olup, test borusu yüzeyinde istenilen sıcaklığı sağlayabilmek için boru içine yerleştirilen üzeri silikon kaplı ısıtıcının gücünü ayarlamak için kullanıldı. İkinci güç kaynağı ise yine aynı marka ve kapasitede olup, su besleme borularının üzerine sarılmış olan su ısıtıcısının gücünü ayarlamaya yönelik kullanılmaktadır.



Şekil 5.8 D.C güç kaynakları ve hassas güç ölçer

5.1.8 Hassas Güç Ölçer

Her iki güç kaynağının vermiş oldukları gerilim ve akım değerleri üzerlerinde bulunan göstergelerden okunabilmektedir. Fakat verilen güç değerlerini hassas okuyabilmek için YOKOGAWA marka WT 2030 modelinde dijital bir güç ölçer kullanılmıştır. Özellikle test borusu içine yerleştirilen ısıtıcıya verilen gücün hassas olarak belirlenmesi gerektiğinden güç ölçer üzerindeki ilk üç gösterge bu ısıtıcıya ayrılmıştır.

Birinciden uygulanan gerilim, ikincisinden akım ve son göstergeden güç değerleri okunarak kaydedilmiştir. Dördüncü göstergeden ise su ısıtıcısına verilen güç değerleri okunmuştur.

5.2 Deneysel Süreç

Yapılan deneysel çalışmalar üç ana gruptan oluşmaktadır.

- Kaplamasız durumda yapılan deneyler
- Kaplamalı durumda yapılan deneyler
- Islak durumda yapılan buharlaşmalı deneyler

Test borusu yüzeyinin kuru olduğu sadece ısı geçişinin analiz edildiği ilk iki gruptaki deneylerde sıcaklık ve bağıl nem ölçümü yapılmıştır. Yüzeyin ıslatılarak eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği deneylerde ise bunlara ek olarak su miktarı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cihazlar kalibre edilmiş olup elde edilen kalibrasyon eğrileri kullanılarak da hesaplar yapılmıştır.

5.2.1 Termoelemanların Kalibrasyonu

Arçelik ARGE bünyesinde bulunan ve referans alınabilecek derecede ölçüm yapabilen hassas bir termometre ile tüm termoelemanların eşit şartlarda ölçüm yapmaları sağlanarak, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kalibrasyon için gerekli sabit şartların sağlanabilmesi amacıyla kalibrasyon su banyosu kullanılmıştır.



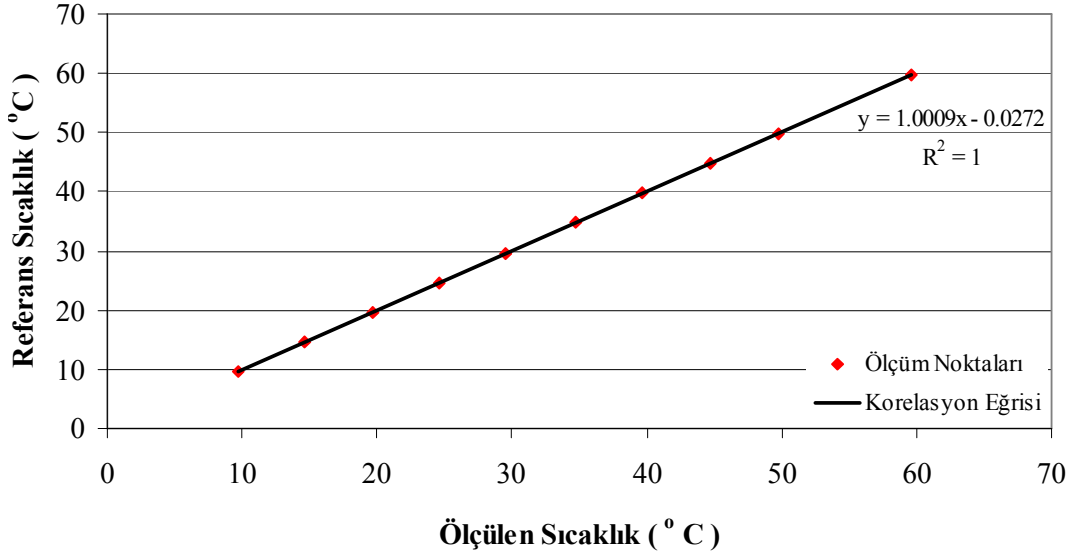
Şekil 5.9 Kalibrasyon su banyosu, referans termometre ve probunun yerleşimi

Termoelemanların ölçüm sonuçları, kanal ölçüm sapmaları bilinen bir veri toplayıcı ile gözlenerek, bir bilgisayar ve HP vee programı yardımıyla kaydedilmiştir. Deneylerde şartlandırılmış odanın veri toplama ünitesi kullanıldığından kalibrasyon sırasında kullanılan veri toplayıcısının ölçüm sapmaları termoelemanın ölçmüş olduğu değerden çıkarılarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.2 Kalibrasyonu için ölçülen sıcaklıklar (TE 1)

Su Sıcaklığı (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
Referans Termometre (°C)	9.630	14.620	19.670	24.600	29.530	34.697	39.694	44.725	49.765	59.659
TE 1(°C)	9.658	14.625	19.681	24.595	29.533	34.700	39.702	44.701	49.758	59.630

Referans termometre ile termoelemanların ölçtüğü değerler kullanılarak kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş ve çizilen eğriler yardımıyla hata fonksiyonları bulunmuştur. Elde edilen kalibrasyon eşitlikleri daha sonraki hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 5.10 Termoeleman (TE 1) için kalibrasyon eğrisi ve hata fonksiyonu

Termoeleman (TE 1) için elde edilen kalibrasyon eşitliği $y=1.0009x-0.0272$ 'dir. Diğer termoelemanlar için aynı işlemler tekrarlanarak kalibrasyon eşitlikleri oluşturulmuş ve deney esnasında ölçülen tüm değerler bu eşitlikler yardımıyla düzeltilerek kullanılmıştır.

5.2.2 Isı Geçişinin İncelendiği Deneyler

Yapılan deneysel çalışmalar üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada çıplak boru için deneyler yapılmış ve boru yüzeyine kritik çapın altında kalacak çapta emici malzeme sarılarak, eşit dış ortam şartlarında deneyler tekrarlanmıştır.

Kuru durumdaki deneyler tamamlandıktan sonra, su besleme ünitesi kullanılarak, yüzeyin homojen ve yüzey sıcaklığındaki su ile ısıtılması sağlanmış ve kuru durumdaki dış ortam şartlarıyla aynı şartlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Her üç aşamada da sabit dış ortam sıcaklığında, yüzey sıcaklıkları, sabit dış ortam sıcaklığından başlayarak 10 °C artırılmış ve 60 °C 'ye ulaşana kadar deneyler tekrarlanmıştır. Örnek olarak 20 °C dış ortam şartlarında yüzey sıcaklığı 30-40-50-60 °C için olmak üzere 4 adet deney yapılmıştır. Dış ortam sıcaklığı ise 10-20-30-40-50 °C'ye ayarlanarak 5 farklı değerde sonuçlar alınmıştır. Deney şartları Çizelge 5.3'de görülmektedir

Çizelge 5.3 Isı geçişinin incelendiği deneylerdeki yüzey ve boru sıcaklıkları

T_{∞}	T_0				
10	20	30	40	50	60
20		30	40	50	60
30			40	50	60
40				50	60
50					60

İki boruda da kuru durum için çıplak halde 15, sarılı kuru durumda da 15 olmak üzere toplam 30 deney gerçekleştirilmiş ve sonuçta kuru durum için toplam 60 deney yapılmıştır.

İşlem sırası:

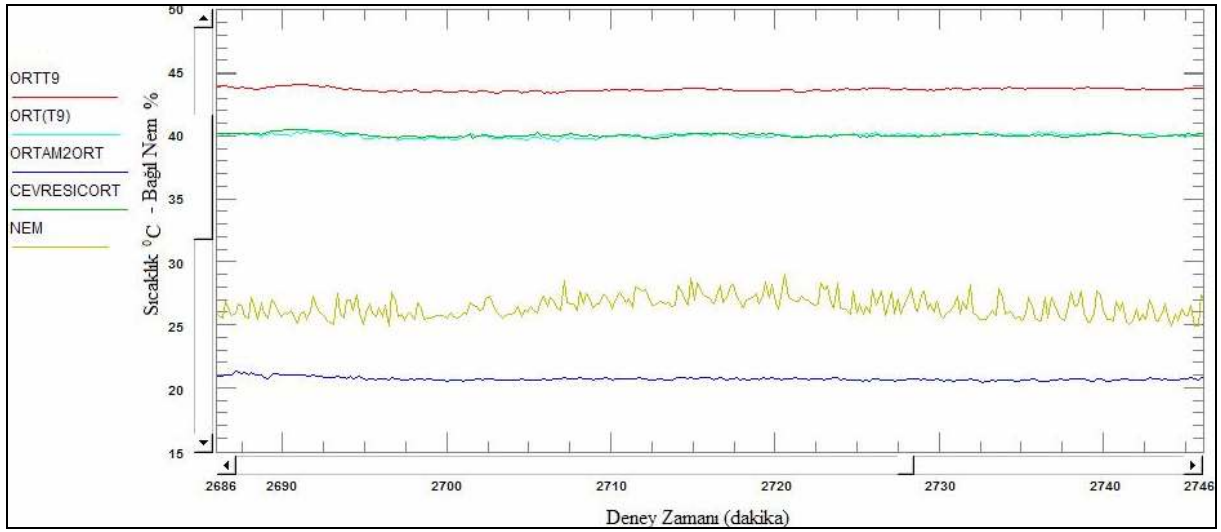
- İstenilen dış ortam sıcaklık ve bağıl nem değerlerini sağlayabilmek için deney düzeneği şartlandırılmış odaya yerleştirilir.
- Kaplamasız test borusunda yapılacak birinci aşama deneyler için, borunun iki uç noktasına DC güç kaynağının elektrik bağlantıları yapılır.
- Yüzeyden 14 noktadan sıcaklık ölçebilmek için daha önceden bağlantıları yapılmış termoelemanlar odanın veri toplama ünitesine bağlanır.
- Odanın sıcaklığı istenilen değere ayarlanır.
- Yüzey sıcaklığının istenilen değere gelebilmesini sağlamak için, güç beslemesi DC güç kaynağından hassas olarak artırılır veya azaltılır.
- HP VEE veri toplama programı sayesinde aynı x-y koordinatında, yüzeydeki termoelemanların ortalamasını ve ortam sıcaklığını grafik olarak görmek mümkündür. Gerekli olan güç verildikten sonra belirli bir süre beklenerek rejime girmesi sağlanır.

Örnek olarak 249. deneyde 2. deney borusu için $T_{\infty}=20^{\circ}\text{C}$, $T_0=40^{\circ}\text{C}$ deney şartlarında sistemin rejime girdiği grafik üzerinden anlaşılmaktadır. ORTT9 değeri kaplamasız yüzeye bağlı termoelemanların ortalama değerini, ORTAM2ORT ise test borusunun alt ve üst noktalarındaki ortam sıcaklığını belirlemek için kullanılan termoelemanların ortalama değerini göstermektedir. Bu deney kaplamalı durumda yapıldığından kaplama yüzey sıcaklığı da ölçülmüş ve ORT(T9) olarak tanımlanmıştır. Bu değerlerin amaçlanan sıcaklıklara $\pm 0,1-0,2^{\circ}\text{C}$ yaklaşması halinde sistemin rejime girdiği düşünülerek deney başlatılmıştır.

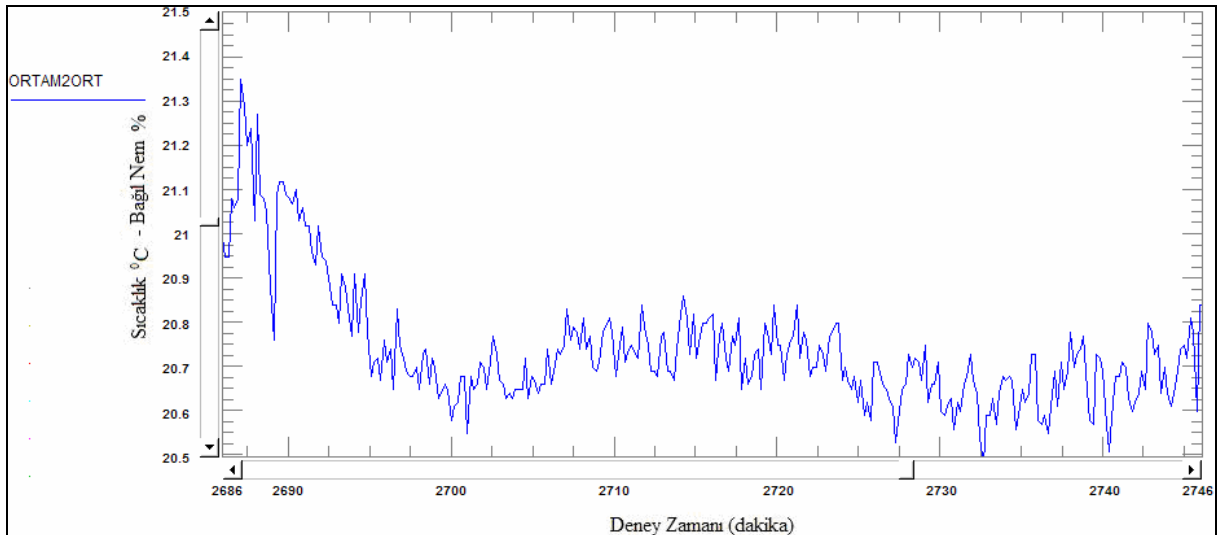
- Rejim şartlarında 10 dakika boyunca 5'er saniye arayla data toplanır ve hesaplamalarda bu değerlerin ortalaması kullanılır. Sistemde bir sorun oluşmadıkça, DC güç kaynağı ile

ayarlanan güç değeri 10 dakikalık deney süresince sabit kalır ve bu değer hassas güç ölçer sayesinde belirlenerek kaydedilir.

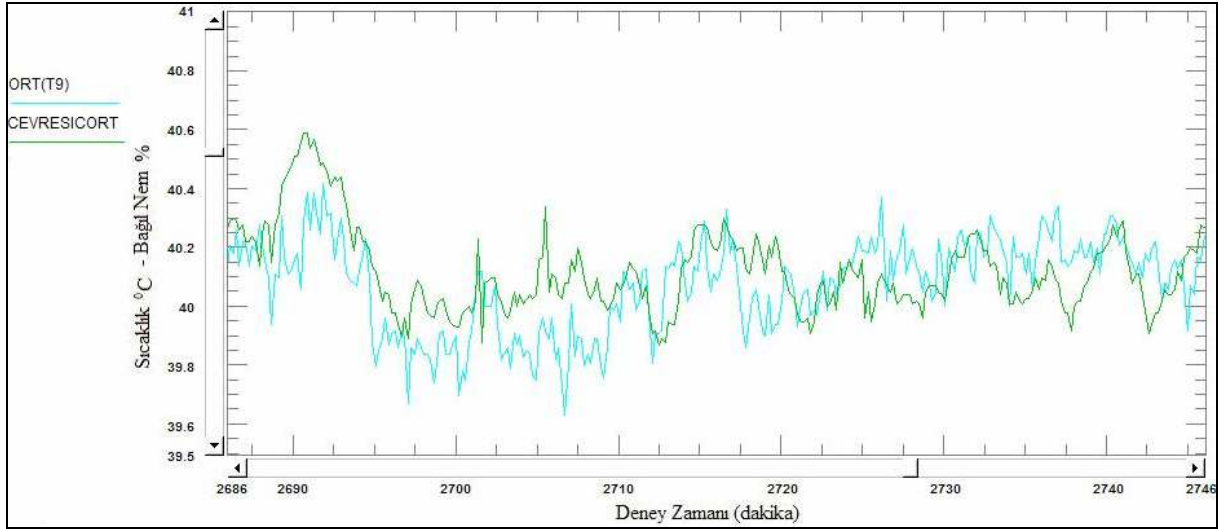
- Yüzey sıcaklığı 10°C artırılarak 60°C olana kadar deneyler tekrarlanır ve farklı dış ortam sıcaklıklarında da değerler alındıktan sonra ikinci grup kaplamalı deneylere geçilir.
- Kaplamasız test borusu etrafına fitil malzemesi sarılarak yüzeyi kaplanır ve malzeme dış yüzeyindeki sıcaklıkların belirlenebilmesi için, termoelemanlar yerleştirilir. Kaplamasız durumda yapılan tüm işlemler tekrarlanır.



Şekil 5.11 Deneyde (249) ölçülen sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.12 Deneyde (249) ölçülen dış ortam sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 5.13 Deneyde (249) ölçülen bakır boru ortalama dış yüzey sıcaklığının ve kaplama malzemesi dış yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi

5.2.3 Isı ve Kütle Geçişinin İncelendiği Buharlaşmalı Deneyler

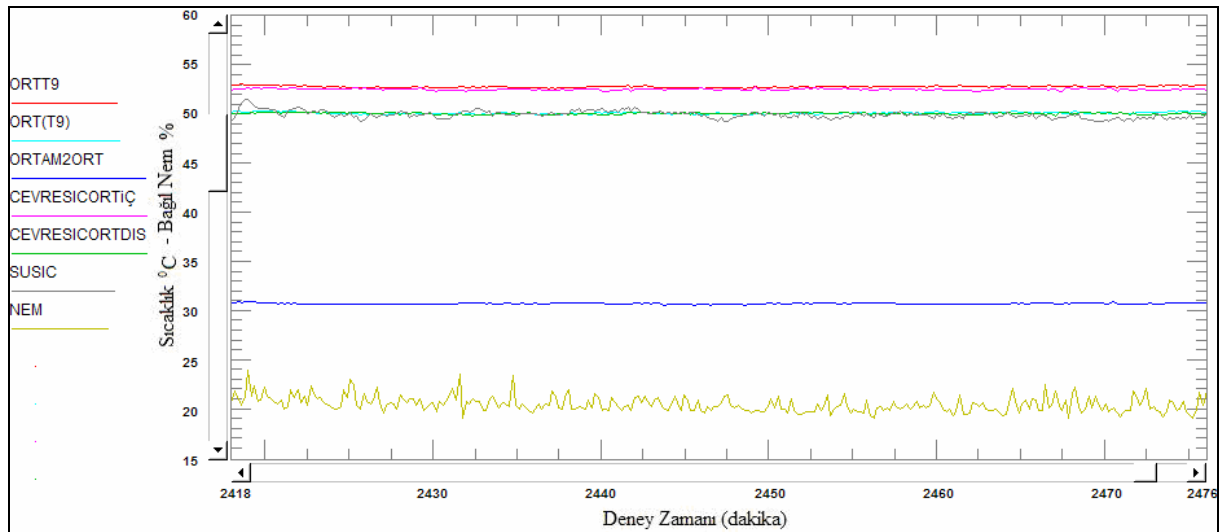
Kuru şartlardaki deneyler tamamlandıktan sonra, boru yüzeyine emici malzeme sarılarak, buharlaşmalı deneylere geçilmiştir. Yüzey sıcaklıkları daha önce olduğu gibi, sabit dış ortam sıcaklığından başlayarak 10°C artırılmış ve 60°C 'ye ulaşana kadar deneyler tekrarlanmıştır. Üçüncü grup deneyler buharlaşmalı olup sıcaklık ve derişiklik kaynaklı doğal taşınım akışlarıdır. Yüzey sıcaklığının, ortam sıcaklığından fazla olması durumunda, meydana gelen buharlaşma, oluşacak doğal taşınım akışının etkisi ile artar. Bu durumda aynı anda ısı ve kütle geçişi oluşur. Yüzey ile ortam arasındaki taşınımı oluşturan potansiyel farkını etkileyen parametreler, sıcaklık farkları ve su buharı kısmi basınçlarıdır. Bu sebeple kuru durumda yapılan deneylerden farklı olarak, sabit dış ortam sıcaklığı için uygun üç farklı bağıl nem değerinde deneyler tekrarlanmıştır. Deney şartları Çizelge 5.4'de görülmektedir.

Çizelge 5.4 Isı ve kütle geçişinin incelendiği deneylerdeki sıcaklık ve bağıl nem değerleri

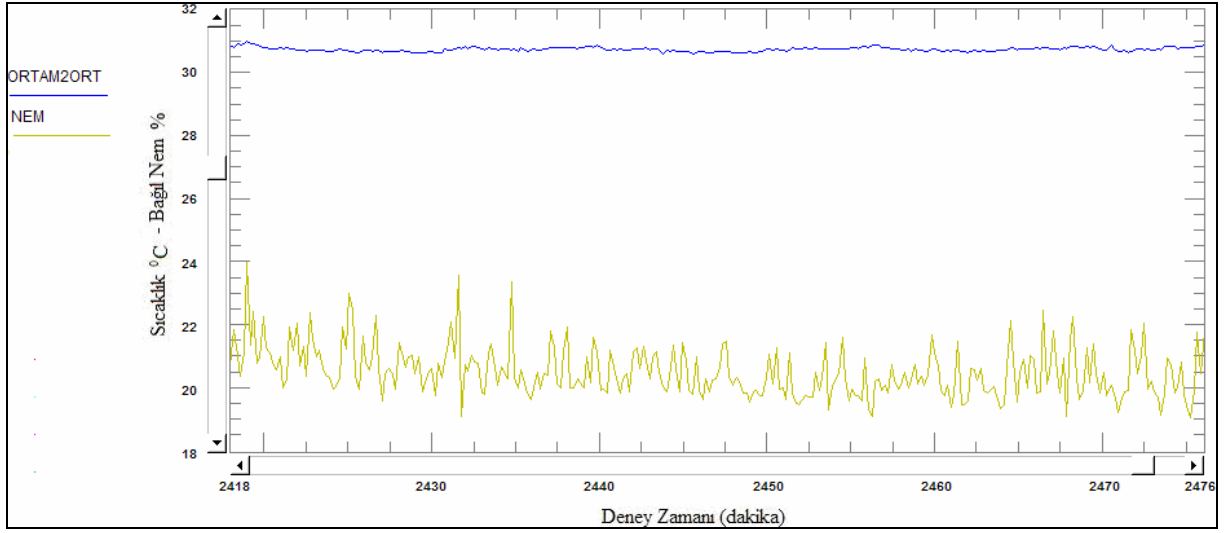
T_{∞}	T_0 (φ_1)						T_0 (φ_2)						T_0 (φ_3)					
10	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
20		20	30	40	50	60		20	30	40	50	60		20	30	40	50	60
30			30	40	50	60			30	40	50	60			30	40	50	60
40				40	50	60				40	50	60				40	50	60
50					50	60					50	60					50	60

İşlem sırası:

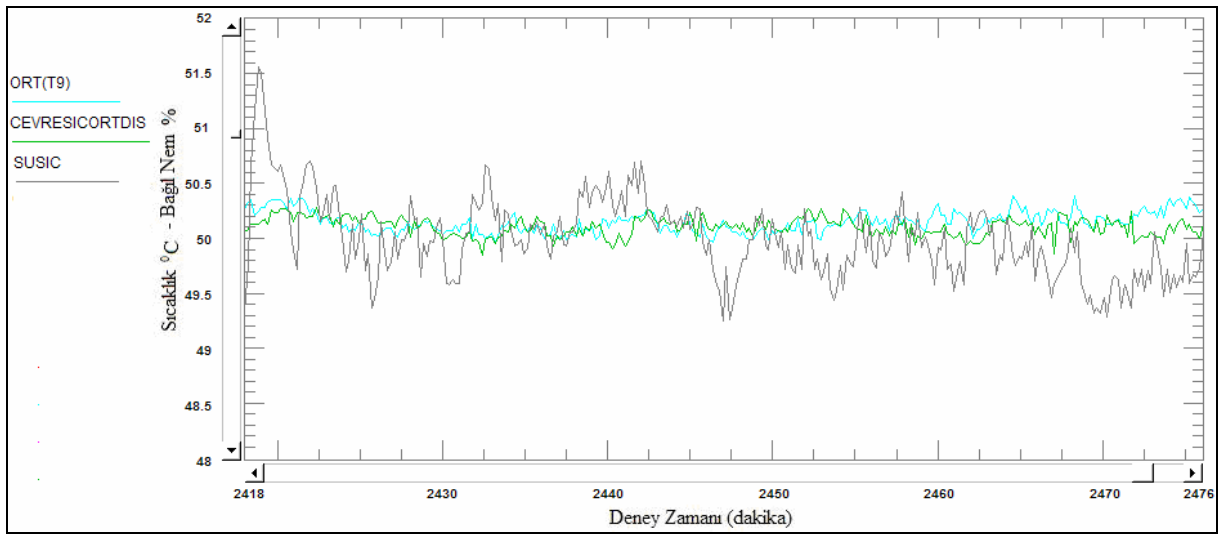
- İstenilen dış ortam sıcaklık ve bağıl nem değerlerini sağlamak için şartlandırılmış oda ayarlanır.
- Kaplamalı boru yüzeyini homojen ıslatmak amacıyla, su besleme boruları üzerindeki vanalar belirli bir değere kadar açılır. Buharlaşan su miktarının hassas olarak belirlenebilmesi için, homojen olarak ıslatılan boru yüzeyinden kaçak(damlama) olmaması sağlanmalıdır. Gerekli olan suyun sadece vanalar ile ayarlanması kolay olamadığından, boru yüzeyindeki fazla su yüzeye kılcal borular tutturularak alınır. Bu boruların diğer uçları toplama kaplarına bağlı olduğundan, fazla su biriktirilir.
- Kuru durumda olduğu gibi, birinci güç kaynağı ile istenilen yüzey sıcaklığı sağlanır. İkinci güç kaynağı, beslenen suyun sıcaklığını yüzey sıcaklığına getirebilmek için gerekli güç değerine yakın bir değere bir miktar yüksek olarak ayarlanır. Su besleme borularından birinin içine yerleştirilen termoelemanından sinyal alan PID kontrollü termostat bağlantısı, güç kaynağı ile yüzey sıcaklığına eşit sıcaklıkta su beslemesi sağlar.
- Sabit dış ortam ve bağıl nem şartlarında, sistemin ısı ve kütle geçişinde sürekli rejimi sağlaması gerekir. Bu süre içinde kılcal su toplama borularıyla toplananın dışında, boru yüzeyinden damlama olmamasına dikkat edilmelidir. İstenilen yüzey ve su besleme sıcaklığı sağlandığında, sistemde damlama da yoksa deney verileri alınmaya başlanır. Örnek olarak 275. deneyde 1. deney borusu için $T_{\infty} = 30^{\circ}\text{C}$, $T_0 = 50^{\circ}\text{C}$, $\phi = \%20$ deney şartlarında sistemin rejime girdiği grafik üzerinden anlaşılmaktadır. Bu deney buharlaşmalı olduğu için diğerlerinden farklı olarak besleme suyu sıcaklığı da ölçülmüş olup SUSIC olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 5.14 Deneyde (275) ölçülen sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.15 Deneyde (275) ölçülen dış ortam sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.16 Deneyde (275) ölçülen ıslak yüzey ortalama sıcaklık, orta noktadaki çevresel ortalama sıcaklık ve besleme suyu sıcaklık değerlerinin zamana göre değişimi

- Su dolu şırıngalar ve boş su toplama kapları, tartılarak kaydedilir. Sürekli rejim şartlarında, su deposuna şırıngalardaki su boşaltılır ve kılcal borular su toplama kaplarının içine yerleştirilir.
- Aynı anda yapılan bu işlemlerle birlikte deney başlatılmış olur ve rejim şartlarında 30 dakika boyunca 5'er saniye arayla veri toplanır ve hesaplamalarda bu değerlerin ortalaması kullanılır. DC güç kaynağı ile ayarlanan güç değeri deney süresince sabit kalır ve bu değerler hassas güç ölçer sayesinde belirlenerek kaydedilir.
- Deney sonunda depoda kalan su, şırıngalardan biri ile toplanarak, diğer boş şırıngalar ve deney süresince içi su dolan su toplama kapları ile birlikte tartılır.
- Deney başında kaydedilen tartı değeri ile son tartı değeri arasındaki fark buharlaşan su miktarını verir.
- Yüzey sıcaklığı 10°C artırılarak 60°C olana kadar deneyler tekrarlanır
- Sabit dış ortam sıcaklığında üç farklı bağıl nem değeri için deneyler tekrarlandıktan sonra farklı bir dış ortam sıcaklığına geçilerek aynı işlem sırası izlenir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Serbest taşınım şartlarında iki farklı çapta ve yatay borularda yapılan deneyler üç ana gruptan oluşmaktadır.

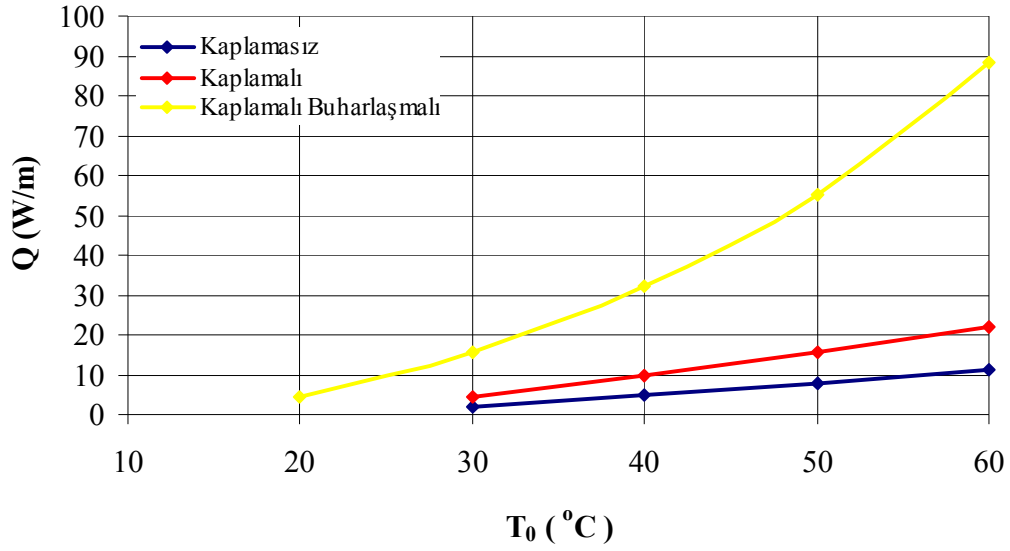
- Kaplamasız kuru durumda yapılan deneyler
- Kaplamalı kuru durumda yapılan deneyler
- Islak durumda yapılan buharlaşmalı deneyler

Test borusu yüzeyinin kuru olduğu sadece ısı geçişinin analiz edildiği ilk iki gruptaki deneylerde sıcaklık, bağıl nem ve ısıl güç ölçümleri yapılmıştır. Yüzeyin ıslatılarak eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin analiz edildiği deneylerde ise bunlara ek olarak buharlaşan su miktarı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda yatay boru için sadece ısı geçişinin ve eşzamanlı ısı kütle geçişinin olduğu durumlar için yarı analitik çözümler yapılmış ve ilgili korelasyonlar oluşturulmuştur. Bu bölümde deneysel veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar irdelenerek sonuçlar verilmiştir.

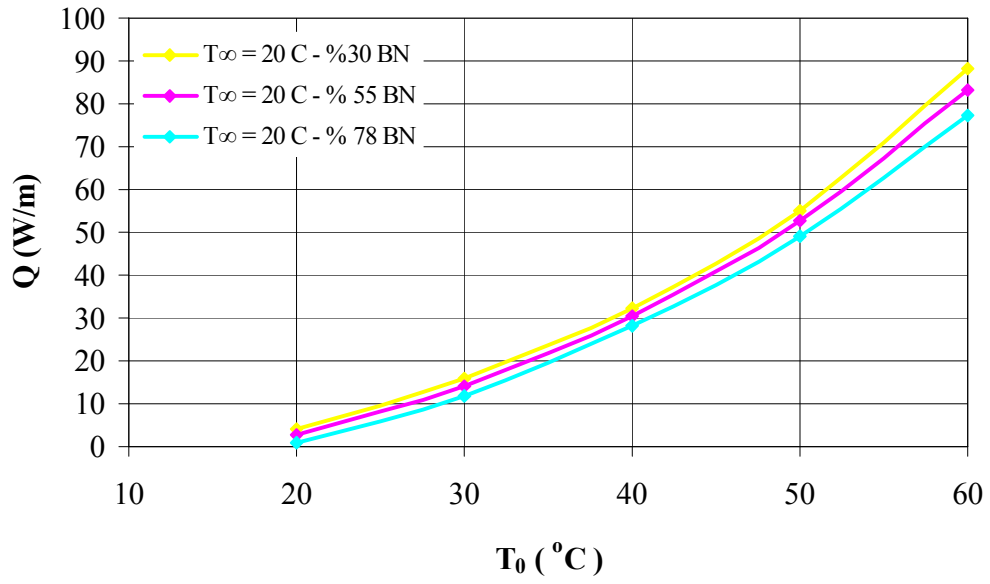
6.1 Birim Boyda Isı Geçişindeki Değişim İle İlgili Deneysel Bulgular

Öncelikle 5. bölümde açıklanan deney şartlarında her iki çaptaki boru için kaplamasız durumda verilen elektriksel güç ölçülerek ısı geçişi miktarı hassas olarak belirlenmiştir. Daha sonra sabit dış ortam sıcaklıklarında kritik çapın altında sarım yapılarak önceki durumda oluşturulan yüzey sıcaklığının sağlanabilmesi için yine sisteme verilen elektriksel güç ölçülerek ısı geçişindeki artış gözlenmiştir. Üçüncü aşamada yüzeye kaplanan emici malzeme ıslatılarak aynı işlem tekrarlanmıştır.

Örnek olarak $T_{\infty} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dış ortam şartlarında, $D=4,8\text{mm}$ çapındaki 2. deney borusunun yüzeyinin kaplanması ve sonra da ıslatılması durumunda, birim boyda ısı geçişinde oluşan artış Şekil 6.1 de görülmektedir. Ayrıca aynı boru için farklı bağıl nem şartlarında deneyler tekrarlanmış ve yine birim boyda ısı geçişindeki değişim Şekil 6.2 de verilmiştir.

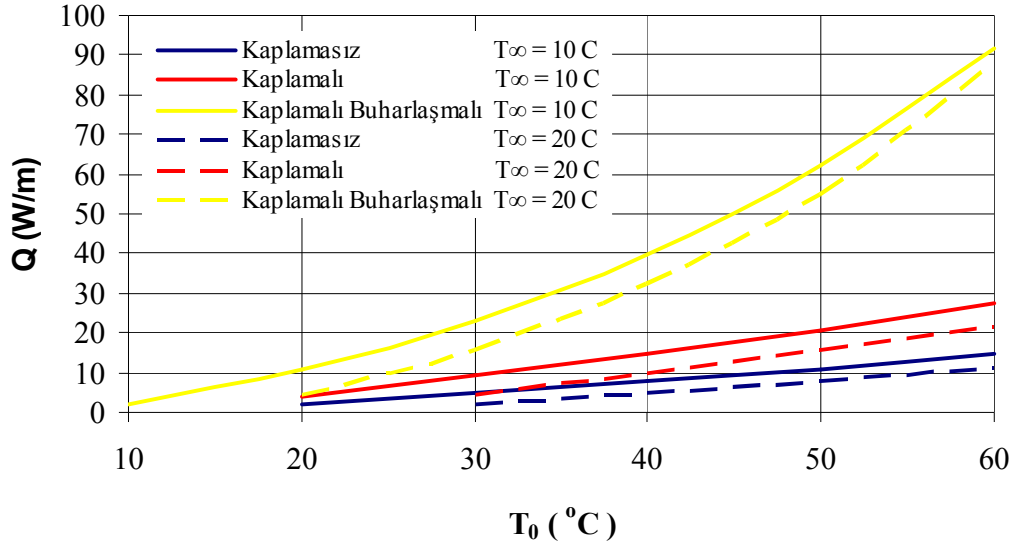


Şekil 6.1 $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de belirtilen T_0 aralığında $D = 4,8\text{mm}$ çapındaki borunun, farklı durumları için deneysel belirlenen ısı geçiş miktarları.

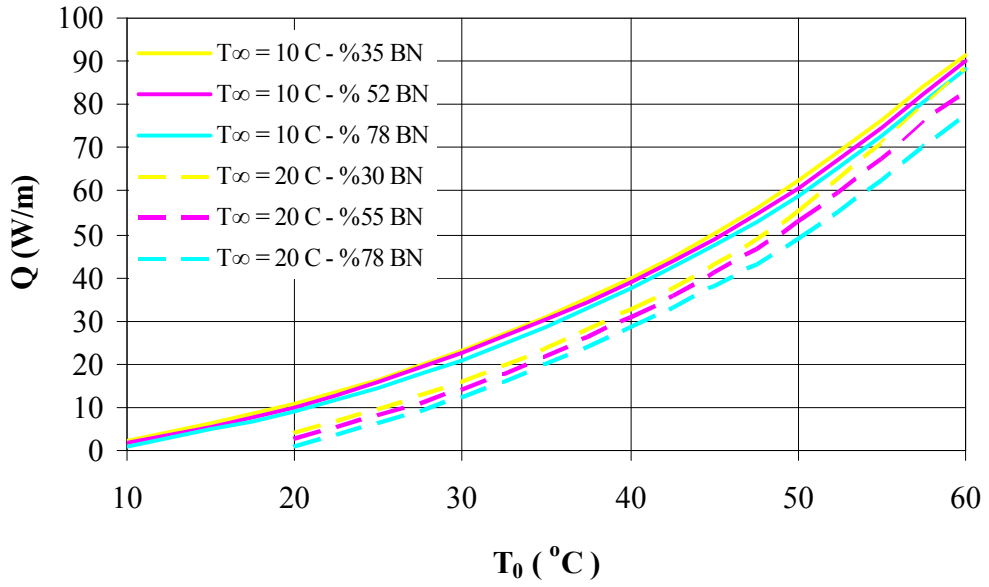


Şekil 6.2 $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de, belirtilen T_0 aralığında $D = 4,8\text{mm}$ çapındaki borunun, üç farklı bağıl nem şartında deneysel belirlenen ısı geçiş miktarları.

Farklı dış ortam sıcaklığında, birim boyda ısı geçişinde oluşan değişimin belirlenebilmesi amacıyla deneyler tekrarlanmış ve $T_{\infty} = 10^{\circ}\text{C}$ için elde edilen değerler Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 de grafik olarak verilmiştir.

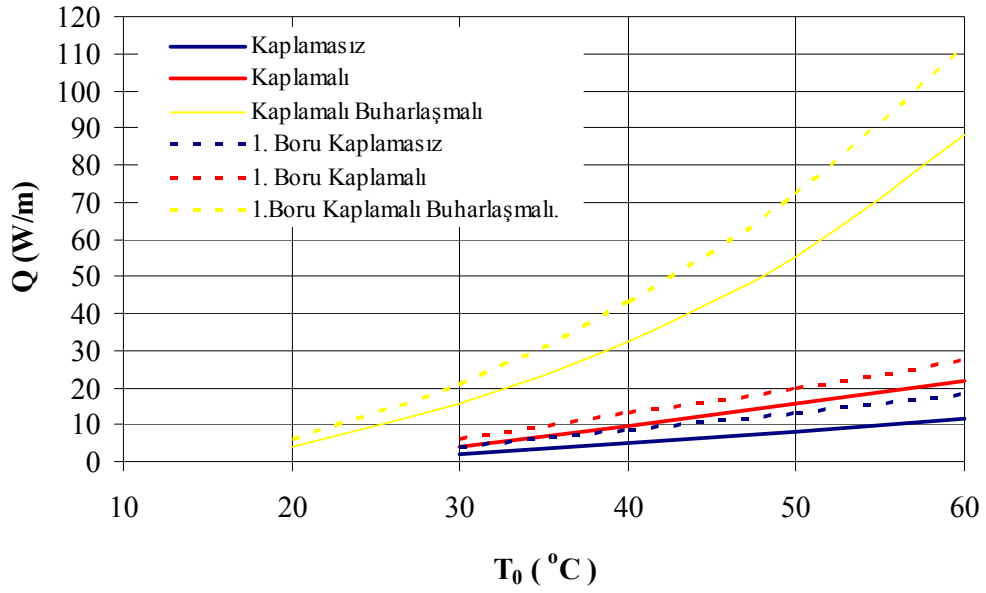


Şekil 6.3. $T_{\infty} = 10^{\circ}\text{C}$ ve $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de belirtilen T_0 aralığında $D = 4.8\text{mm}$ çapındaki borunun, farklı durumları için belirlenen ısı geçiş miktarları.



Şekil 6.4 $T_{\infty} = 10^{\circ}\text{C}$ ve $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de, belirtilen T_0 aralığında $D = 4,8\text{mm}$ çapındaki borunun, farklı bağıl nem şartında deneysel belirlenen ısı geçiş miktarları.

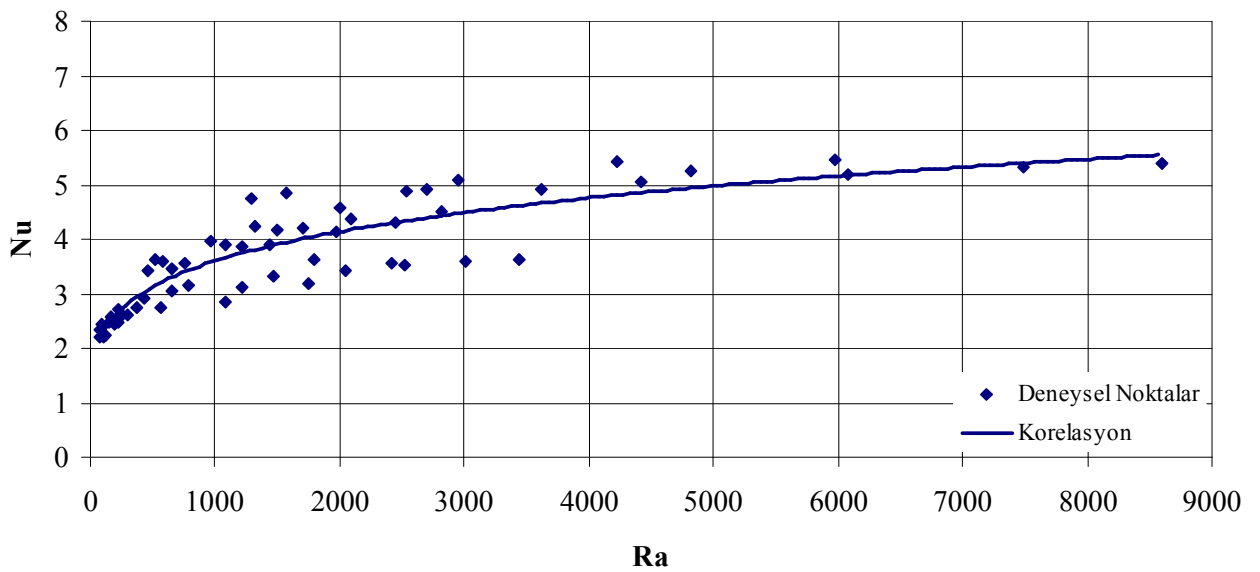
Serbest taşınım şartlarında, boru çapının değişimi ile yatay borunun birim boyunda oluşan ısı geçiş miktarındaki değişimin belirlenebilmesi amacıyla, deneyler $D=9.45\text{ mm}$ çapında boru için tekrarlanmış ve örnek olarak $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ için elde edilen sonuçlar Şekil 6.5'de gösterilmiştir.



Şekil 6.5. $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ 'de belirtilen T_0 aralığında, $D = 4,8\text{mm}$ ve $D = 9,45\text{mm}$ çapındaki borunun, farklı durumları için deneysel belirlenen ısı geçiş miktarları.

6.2 Isı Geçişinin İncelendiği Deneysel Sonuçlar

Sadece ısı geçişini konu alan 1. ve 2. grup deneylerden elde edilen ölçümler kullanılarak Gr, Ra ve Nu değerleri hesaplanmış ve deneysel sonuç verileri oluşturulmuştur. Hesaplanan Nu-Ra değerleri ile CurveExpert1.3 programında $y = a.x^b$ fonksiyonu tanımlanarak $7,462.10^1 < Ra < 8,593.10^3$ aralığı için $Nu_D = 0,898.Ra^{0,201}$ korelasyonu oluşturulmuştur. Deneysel sonuç verileri ve oluşturulan korelasyon şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan sadece ısı geçişi olduğunda deneysel bulgular ve oluşturulan korelasyon eğrisi

Deneysel ölçüm değerleri ile hesaplanan Ra sonuçları kullanılarak, literatürde genel kabul görmüş ampirik korelasyonlarla Nu sayıları hesaplanmış ve oluşturulan yeni korelasyonla karşılaştırılmıştır. İkinci bölümde ayrıntılı olarak açıklanan önceki çalışmalardan, Morgen, Churchill, Kutateladze ve Fand'ın oluşturduğu korelasyonlarla yapılan karşılaştırma sonuçları Şekil 6.7'de verilmiştir.

- Morgen

$$Nu = 0,85.Ra^{0,188} \quad 10^2 < Ra < 10^4 \quad (6.1)$$

- Churchill

$$Nu^{1/2} = 0,6 + 0,387 \left[Ra / \left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16} \right]^{6/9} \right]^{1/6} \quad (6.2)$$

- Kutateladze

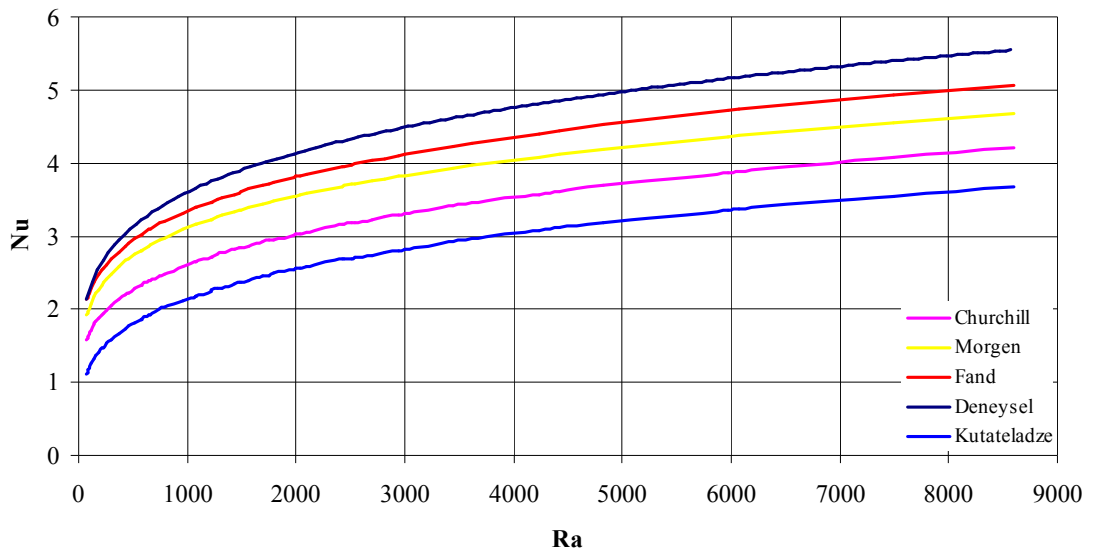
$$Nu = K.(Pr).Ra^{0,25} \quad 5.10^2 \leq Ra^{0,25} \leq 2.10^7 \quad K.(Pr) = 0.54; \quad 0,5 \leq Pr \leq 200 \quad (6.3)$$

$$K.(Pr) = 0.65; \quad Pr > 200$$

- Fand

$$Nu = \left[(0.4.Pr^{0.0433}.Ra^{0.25}) + (0.503.Pr^{0.0334}.Ra^{0.0816}) + (0.95.Ge^{0.122} / Pr^{0.06}.Ra^{0.0511}) \right] \quad (6.4)$$

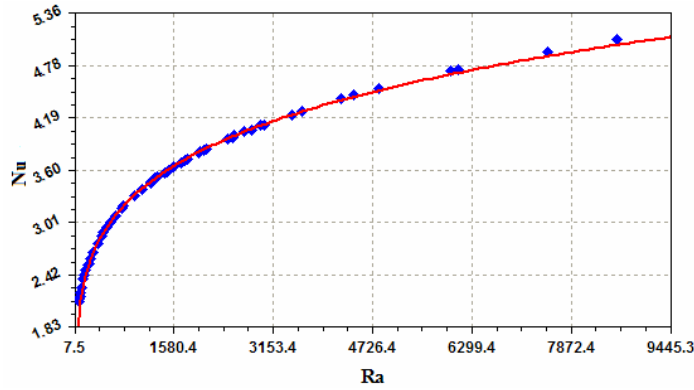
$$(10^{-8} < Ra < 10^8)$$



Şekil 6.7 Oluşturulan yeni korelasyon ile önceki çalışmaların korelasyonları

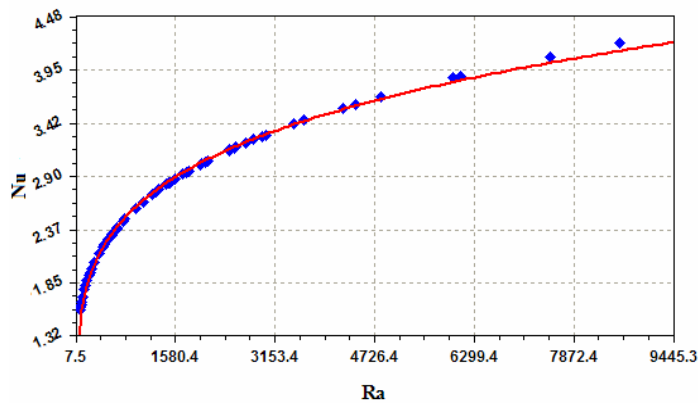
Bu çalışmada oluşturulan yeni korelasyon $Nu = f(Ra)$ olarak tanımlanmıştır. Fakat Churchill ve Fand'ın eşitliklerine dikkat edilirse Nu sadece Ra sayısının fonksiyonu değildir. $Nu = f(Ra)$ formunda oluşturulan korelasyonlardaki katsayıların değişimini görmek amacıyla, elde edilen sonuçlar kullanılarak Churchill, Fand ve Kutateladze'nin eşitlikleri $Nu = f(Ra)$ olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Kabul edilen Ra değerleri kullanılarak Fand'ın eşitliği ile Nu hesaplanmış ve $Nu = f(Ra)$ korelasyonu oluşturulmuştur. Eşit Ra değerleri için işlemler Churchill ve Kutateladze'nin eşitlikleri için de tekrarlanmıştır. Farklı formda oluşturulan korelasyonlarda noktaların çoğunlukla korelasyonu sağladığını ve eğrisine çok yakın olduklarını gösterebilmek amacıyla da korelasyon grafikleri sırasıyla Şekil 6.8, 6.9 ve 6.10 da verilmiştir.

- Fand $Nu=0,931.Ra^{0,185}$



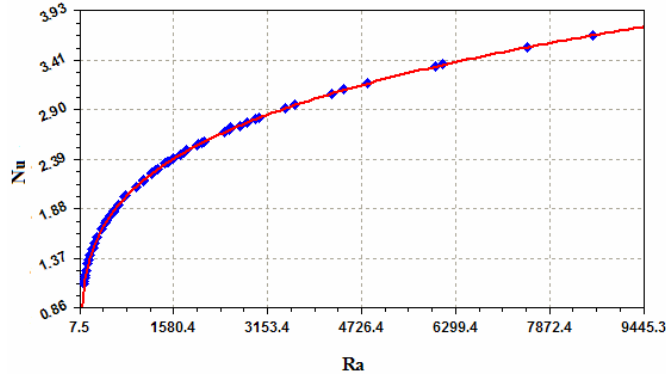
Şekil. 6.8 Fand'ın korelasyonuna göre oluşturulan yeni $Nu=f(Ra)$ korelasyonu

- Churchill $Nu=0,614.Ra^{0,21}$



Şekil 6.9 Churchill'in korelasyonuna göre oluşturulan yeni $Nu=f(Ra)$ korelasyonu

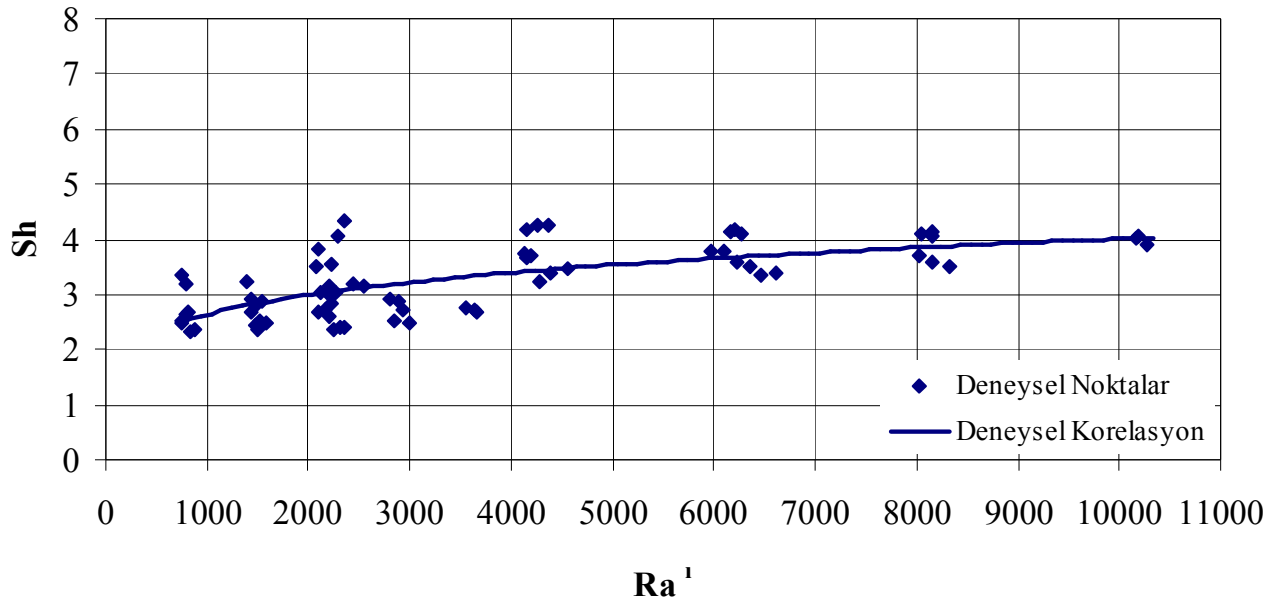
- Kutateladze $Nu=0,38.Ra^{0,25}$



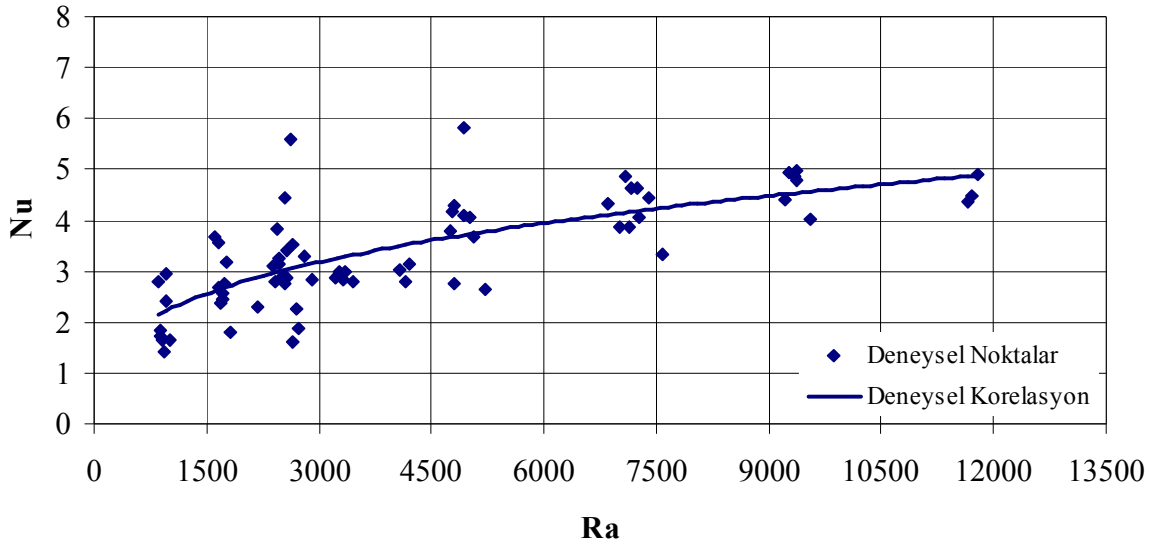
Şekil 6.10 Kutateladze korelasyonuna göre oluşturulan yeni $Nu=f(Ra)$ korelasyonu

6.3 Eş Zamanlı Isı ve Kütle Geçişinin İncelendiği Deneysel Sonuçlar

Eş zamanlı ısı ve kütle geçişini konu alan üçüncü kısım deneylerden elde edilen bulgular kullanılarak Gr , Ra , Nu , Ra' ve Sh değerleri hesaplanmış ve deneysel sonuç verileri oluşturulmuştur. Hesaplanan $Sh-Ra'$ ve $Nu-Ra$ değerleri ile CurveExpert1.3 programında yine $y = a.x^b$ fonksiyonu tanımlanarak, yatay borudan serbest eşzamanlı ısı ve kütle taşınım şartlarında kütle geçişi için $7,405.10^2 < Ra' < 1,0269.10^4$ aralığında $Sh_D = 0,751.Ra'^{0,181}$ ve ısı geçişi için $8,543.10^2 < Ra < 1,1794.10^4$ aralığında $Nu_D = 0,258.Ra^{0,313}$ korelasyonları oluşturuldu. Deneysel sonuç verileri ve oluşturulan korelasyonlar sırasıyla Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.11 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için deneysel değerler ve kütle geçişi için oluşturulan korelasyon eğrisi



Şekil 6.12 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu hal için deneysel değerler ve ısı geçişi için oluşturulan korelasyon eğrisi

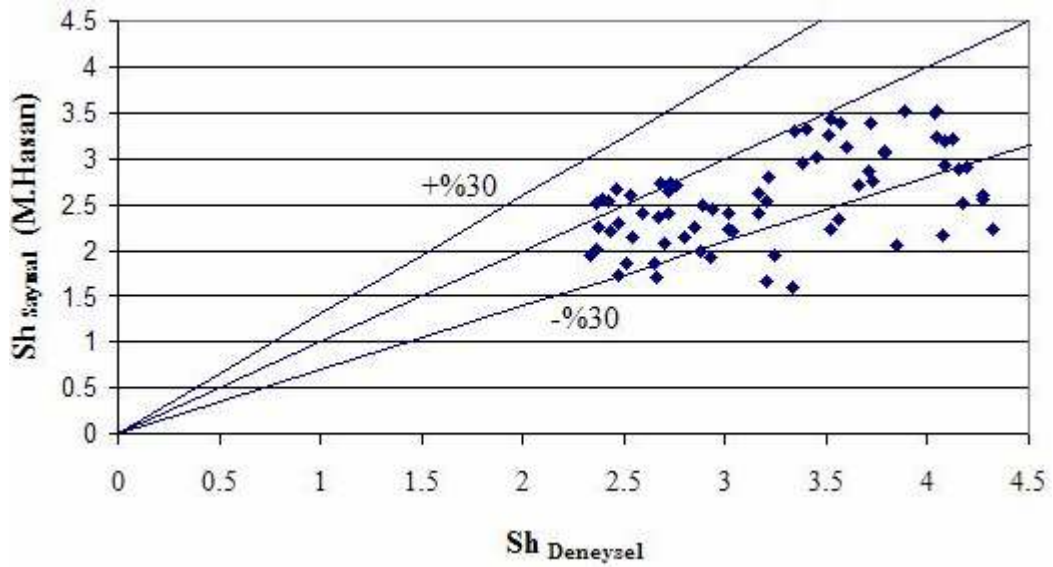
Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişi ile ilgili analitik veya deneysel olarak yapılmış sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda elektrokimyasal yöntem kullanılarak kütle geçişi iyon geçişi ile sağlanmıştır. Fakat bu çalışmada kütle geçişi difüzyonla molekül bazında olmaktadır. Bu nedenle sonuçlar elektrokimyasal yöntemle elde edilen önceki korelasyonlarla karşılaştırılmamıştır.

Elektrokimyasal yöntemle yapılan deneysel çalışmalarla karşılaştırma yapılmamasının diğer bir sebebi de sonuçta verilen korelasyonların geçerlilik aralıklarıdır. Örnek olarak H.Saraç (1991) tarafından yapılan çalışmada elde edilen korelasyon için verilen geçerlilik aralığı $7 \times 10^7 < Gr_m Sc < 4 \times 10^9$ dur. Buna karşılık tez çalışmasında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar $1,95 \times 10^3 < Gr_m Sc < 2,7 \times 10^4$ aralığındadır. Açıklanan iki sebepten dolayı, serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişi ile ilgili elektrokimyasal yöntemle yapılmış deneysel çalışmalarla karşılaştırma yapmanın doğru olmayacağı kararına varılmıştır.

Yapılan detaylı kaynak araştırması sonucunda, serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişi ile ilgili teorik olarak yapılmış iki adet çalışma bulunmuştur. Bu çalışmalarda yerel benzerlik (local similarity) ve yerel benzerlik dışı (local nonsimilarity) yöntemler kullanılarak problem çözülmüştür. Kaynak araştırması bölümünde de özetlenen Hasan ve Mujumdar (1985) tarafından yapılan çalışmada yerel Sherwood sayısı $Sh_{D,w} = f(Gr_{DC,w})$ ve yerel Nusselt sayısı $Nu_{D,w} = f(Gr_{D,w})$ olarak verilmiştir.

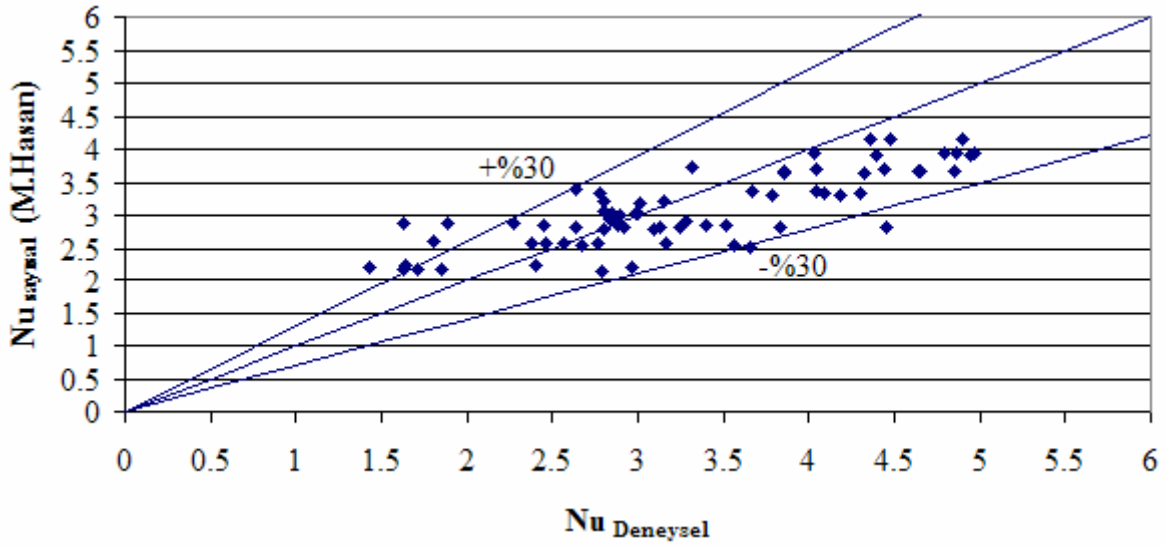
Tez çalışmasında verilen korelasyon için gerekli olan hesaplamalar, toplam yoğunluk farkına göre tanımlanan Gr sayısına bağlı yapılmış olmasına rağmen, M.Hasan 'ın çözümleri ile karşılaştırma yapılabilmesi için korelasyonlar $Sh_D = f(Gr_{DC})$ ve $Nu_D = f(Gr_D)$ formunda tekrar oluşturulmuştur. Deneysel ölçüm sonuçları ile hesaplanan Gr_{DC} , Gr_D değerleri kullanılarak M Hasan'ın önerdiği korelasyonlar ile Sh ve Nu sayıları hesaplanmış ve bu tez çalışması deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Sh sayıları için yapılan karşılaştırma Şekil 6.13 de verilmektedir. Aynı sınır şartlarında deneysel Sh sonuçları ile Hasan tarafından sayısal yöntemle hesaplanıp önerilen Sh sayıları arasında mutlak olarak ortalama %19.94 fark bulunmaktadır. Deneysel Sh sayılarının çoğu $\pm \%30$ sapma aralığında kalmaktadır



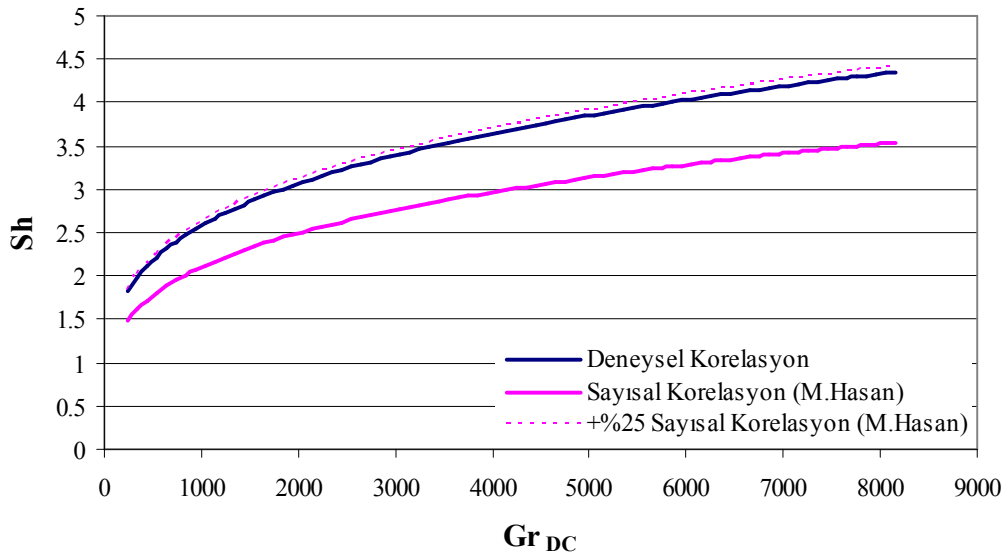
Şekil 6.13 Deneysel Sh sonuçları ile Hasan ve Mujumdar (1985) tarafından sayısal korelasyonla hesaplanan Sh sayılarının karşılaştırması

Kütle geçişi karşılaştırması için yapılan işlemler, benzer olarak açıklanan işlem sırasıyla ısı geçişi için Nu sayıları hesaplanarak tekrarlanmıştır. Aynı sınır şartlarında deneysel sonuçlar ile Hasan tarafından sayısal yöntemle hesaplanıp önerilen Nu sayıları arasında mutlak olarak ortalama % 17,64 fark vardır. Yapılan deneylerin çoğunun $\pm \%30$ sapma aralığında kaldığı Şekil 6.14'de görülmektedir.

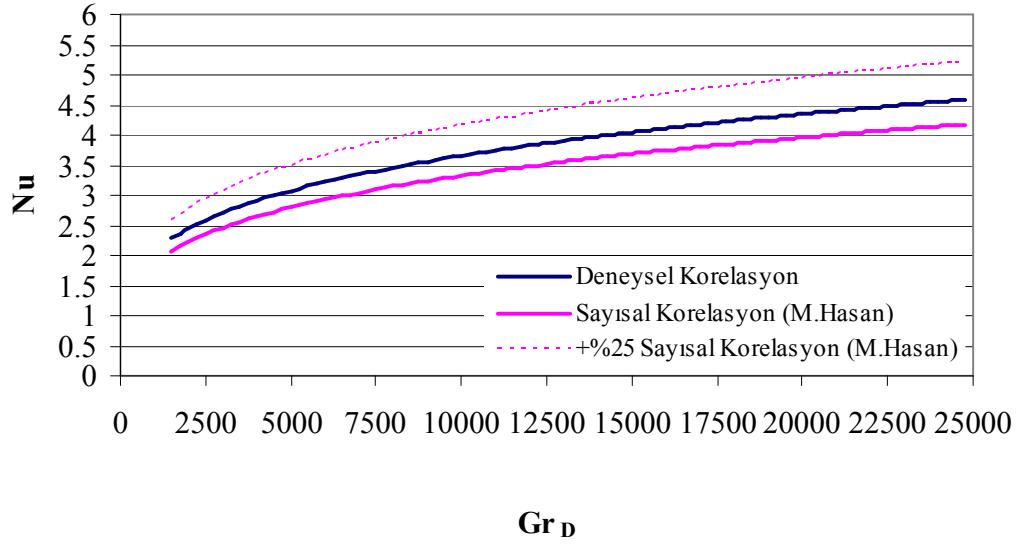


Şekil 6.14 Deneysel Nu sonuçları ile Hasan ve Mujumdar (1985) tarafından sayısal korelasyonla hesaplanan Nu sayılarının karşılaştırması

Deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak Gr_{DC} , Sh_D ve Gr_D , Nu_D sayıları hesaplanmış ve $Sh_D = 0,458(Gr_{DC})^{0.25}$, $Nu_D = 0,3655(Gr_D)^{0.25}$ korelasyonları oluşturulmuştur. Eşit deney şartlarında hesaplanan Gr_{DC} , Gr_D değerleri kullanılarak, M.Hasan ve A.S.Mujumdar'ın önerdiği yerel eşitlikler ile Sh ve Nu sayıları hesaplanmış ve dairesel yüzey için ortalama $Sh_D = 0,3729(Gr_{DC})^{0.25}$, $Nu_D = 0,3326(Gr_D)^{0.25}$ korelasyonları oluşturulmuştur. Elde edilen deneysel ve sayısal korelasyonlar karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 6.15 ve 6.16'de verilmiştir.



Şekil 6.15 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu halde kütle geçişi için $Sh_D = f(Gr_{DC})$ deneysel korelasyonu ile Hasan ve Mujumdar (1985)'in önerdiği korelasyon



Şekil 6.16 Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin olduğu halde ısı geçişi için $Nu_D = f(Gr_D)$ deneysel korelasyonu ile Hasan ve Mujumdar (1985)'in önerdiği korelasyon

7. DENEYSEL HATALAR ve HATA ANALİZİ YÖNTEMLERİ

Deneysel çalışmanın doğruluğunu, deneyler sırasında farklı nedenlerden ortaya çıkabilecek hatalardır etkileyecektir. Deneysel çalışmada yapılan bu hatalar iki şekilde ortaya çıkabilir. Bunlardan birincisi, deneyi yapan araştırmacıdan kaynaklı hatlar, diğeri ise ölçme cihazlarından ve deney setinin yapısından kaynaklanan hatalardır. Deneylerin tecrübeli ve dikkatli bir araştırmacı tarafından yapılması ile birinci tür hataların giderilmesi mümkün olabilir. Fakat ikinci tür hataların belirlenmesi ve giderilmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bunun nedeni, hataların doğrudan deneyde kullanılan araç ve gereçlerin yapısından kaynaklanmasıdır. Bu hatalı genliklerin genellikle belli olmaması nedeniyle literatürde hata diye adlandırılmaktadır. Yukarıda genel olarak ikinci tür hatalar diye ifade edilen, deneysel çalışma sonuçlarının belirsizliğini etkileyen hata tiplerini üç ana grupta toplamak mümkündür. Birinci olarak; deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatından kaynaklanan hatalar, ikinci olarak; sebebi genellikle kesin olarak bilinmeyen, aynı büyüklüğün tekrar okunması sırasında ortaya çıkan sabit hatalar, üçüncü olarak; deney ve gereçlerinde rasgele elektronik salınımlardan kaynaklanan rasgele hatalardır. Çoğu zaman sabit hatalar ile rast gele hataları birbirinden ayırt etmek zordur. Sabit hatalar, deney sırasında okunan her değer için aynıdır, uygun bir kalibrasyon ve düzeltme ile ortadan kaldırılabilir. Ölçü aletlerinin imalatının da doğru yapıldığı kabul edilirse, hata analizi; sabit ve rast gele hataları belirleyerek bunların deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır.

Ayrıca ölçülecek büyüklük ve ölçü araçlarının seçiminden önce hata analizinin yapılması ve buna uygun büyüklük ve ölçüm aracının seçilmesi, sonuçların içinde yer alabilecek belirsizliğin minimuma indirilmesine yardımcı olacaktır. Diğer taraftan, ölçülen büyüklüklerden hangisinin toplam hata üzerinde en etkin rol oynadığının tespit edilmesi, bu ölçümlerin daha hassas yapılması için önlem almayı gerektireceğinden, sonuçların belirsizliğinin azaltılmasına ayrıca katkıda bulunacaktır.

Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan parametrelere ait hata oranlarının belirlenebilmesi için birkaç yöntem önerilmiştir. Deneysel bulguların hata analizi için geliştirilen ve ilk olarak Kline ve McClintock tarafından ortaya atılan belirsizlik analizi (uncertainty analysis) yöntemi en çok tercih edilen yöntem olarak gözükmektedir. Bu deneysel çalışmadaki hata analizinde, diğerlerine göre daha hassas bir yöntem olan belirsizlik analizi yöntemi kullanılmıştır.

7.1 Belirsizlik Analizi Yöntemi

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

$$P = P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (7.1)$$

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

$$w_p = \pm \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial P}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.2)$$

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.

7.2 Belirsizliklerin Tespiti

Burada yapılan deneysel çalışma öncelikle serbest taşınım şartlarında ısı geçişinin incelendiği deneyler yapılmış daha sonra eş zamanlı ısı ve kütle geçişi için deneyler tekrarlanmıştır. İki grup deneyde hataya neden olan bağımsız değişkenler farklı olduğundan belirsizlik analizi çalışmaları da iki kısımda incelenmiştir.

7.2.1 Isı geçişinin incelendiği deneyler için belirsizliklerin tespiti

Deneylerde hataya neden olan bağımsız değişkenler genel olarak, ısıtıcı gücü Q_{Top} , yerel boru yüzeyi sıcaklıkları $T_1, T_2, T_3, \dots, T_{11}$, boru alt ve üst noktasındaki ortam sıcaklıkları T_{17} ve T_{18} şeklinde seçilirse boru yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı h ve Nu sayıları için oluşturulabilecek belirsizlikler şu şekilde ifade edilebilir.

$$Nu = \frac{h.D}{k} \quad (7.3)$$

$$w_{Nu} = \pm \left[\left(\frac{\partial Nu}{\partial h} w_h \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.4)$$

$$Q_T = h.A.(T_0 - T_\infty) \quad (7.5)$$

Uzunluk ölçümünde oluşabilecek hatalar ihmal edilerek;

$$w_h = \pm \left[\left(\frac{\partial h}{\partial Q_T} w_{Q_T} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_0} w_{T_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_\infty} w_{T_\infty} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.6)$$

Fakat ısı taşınım katsayısı h 'a ait belirsizliğin bulunabilmesi için Q_T , T_0 , ve T_∞ ' un belirsizliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Yatay boru yüzeyinden ortama ısı geçişi ışıınım ve taşınım yoluyla olmaktadır ve ısıtıcıya verilen toplam güç ile sağlanmaktadır. Işıınımla olan ısı geçişi tamamen teorik olarak hesaplandığından belirsizlik analizi yapılmamıştır.

$$Q_{Top} = Q_T + Q_I \quad (7.7)$$

$$w_{Q_T} = \pm \left[\left(\frac{\partial Q_T}{\partial Q_{Top}} w_{Q_{Top}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.8)$$

$$w_{Q_T} = \pm \left[(w_{Q_{Top}})^2 \right]^{1/2} \quad (7.9)$$

T_0 ortalama yüzey sıcaklığı yerel sıcaklık değerlerinin ortalaması olup aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$T_0 = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + + T_{11}}{11} \quad (7.10)$$

$$w_{T_0} = \pm \left[\left(\frac{\partial T_0}{\partial T_1} w_{T_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_0}{\partial T_2} w_{T_2} \right)^2 + + \left(\frac{\partial T_0}{\partial T_{11}} w_{T_{11}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.11)$$

veya;

$$w_{T_0} = \pm \left[\left(\frac{1}{11} w_{T_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{11} w_{T_2} \right)^2 + + \left(\frac{1}{11} w_{T_{11}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.12)$$

Ortam sıcaklığı T_∞ , kapalı kutunun uygun iki bölgesine yerleştirilen termoelemanların ölçtüğü sıcaklıkların ortalamasıdır.

$$T_{\infty} = \frac{T_{17} + T_{18}}{2} \quad (7.13)$$

$$w_{T_{\infty}} = \pm \left[\left(\frac{\partial T_{\infty}}{\partial T_{17}} w_{T_{17}} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{\infty}}{\partial T_{18}} w_{T_{18}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.14)$$

veya;

$$w_{T_{\infty}} = \pm \left[\left(\frac{1}{2} w_{T_{17}} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} w_{T_{18}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.15)$$

$$w_h = \pm \left[\left(\frac{1}{A(T_0 - T_{\infty})} w_{Q_T} \right)^2 + \left(\frac{-Q_T}{A(T_0 - T_{\infty})^2} w_{T_0} \right)^2 + \left(\frac{Q_T}{A(T_0 - T_{\infty})^2} w_{T_{\infty}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.16)$$

$$w_{Nu} = \pm \left[\left(\frac{D}{k} w_h \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.17)$$

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan ve deneylerde ölçülen bağımsız parametrelere ilişkin belirsizlikler, yapılan kalibrasyonlar neticesinde aşağıda yer alan Çizelge 7.1'deki gibi elde edilmiştir. Örnek olarak, dış çapı $\phi=4.8\text{mm}$ olan ikinci test borusunun kaplamasız durumu için yapılan 152 numaralı deneyde; yerel yüzey sıcaklıkları, ortam sıcaklıkları ve ısıtıcı gücü çizelgede ikinci sırada gösterildiği gibi ölçülmüştür.

Çizelge 7.1 Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu sonucunda elde edilen belirsizlikler ve deneylerde ölçülen bağımsız değişkenlerin ısı geçişinin incelendiği örnek bir deneydeki değerleri

	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₇	T ₁₈	Q
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	W
±w	0.0169	0.0536	0.0626	0.098	0.0601	0.0523	0.0409	0.0626	0.0687	0.0762	0.0253	0.0715	0.0695	0.1
	38.744	39.276	39.889	40.798	39.863	40.996	41.853	40.657	40.004	40.673	39.761	20.842	20.844	4.911

Buna göre; yukarıdaki deneysel veriler kullanılarak deneylerde söz konusu olan bağımlı parametrelerin, bu örnek deney için belirsizlikleri ile beraber nominal değerleri Çizelge 7.2'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Çizelge 7.2 Isı geçişinin incelendiği deneyde hesaplanan parametrelerin nominal değerleri ve belirsizlikleri

	h (W/m ² K)	Nu (-)
±w	0.3451	0.0623
%w	2.56	2.56

7.2.2 Eşzamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği deneyler için belirsizliklerin tespiti

Eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği deneylerde hataya neden olan bağımsız değişkenler genel olarak, ısıtıcı gücü Q_{Top} , ortam bağıl nemi ϕ , bölgesel boru yüzeyi sıcaklıkları T_{21} , T_{22} , T_{23} , ..., T_{31} , boru alt ve üst noktasındaki artan sıcaklıkları T_{17} ve T_{18} şeklinde seçilirse boru yüzeyindeki ısı taşınım, kütle taşınım katsayıları h , h_m ve Nu , Sh sayıları için oluşabilecek belirsizlikler şu şekilde ifade edilebilir.

$$Nu = \frac{h.D}{k} \quad (7.18)$$

$$w_{Nu} = \pm \left[\left(\frac{\partial Nu}{\partial h} w_h \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.19)$$

$$Q_T = h.A(T_0 - T_\infty) \quad (7.20)$$

Uzunluk ölçümlerinde oluşabilecek hatalar ihmal edilerek;

$$w_h = \pm \left[\left(\frac{\partial h}{\partial Q_T} w_{Q_T} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_0} w_{T_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_\infty} w_{T_\infty} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.21)$$

Isı taşınım katsayısı h 'a ait belirsizliğin belirlenebilmesi için Q_T , T_0 , ve T_∞ ' un belirsizliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. T_∞ için ilk kısımda denklemler oluşturulduğundan burada onlar kullanılacaktır. Yatay boru yüzeyinden ortama ısı geçişi ışınlım ve taşınım yoluyla olmaktadır ve ısıtıcıya verilen toplam güç ile sağlanmaktadır. Yine, ışınlımla olan ısı geçişi tamamen teorik olarak hesaplandığından belirsizlik analizi yapılmamıştır. Eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği deneylerde buharlaşma ile de ısı geçişi olduğundan enerji dengesine bu değer de eklenerek Q_T ve Q_B 'nin belirsizliği hesaplanmıştır.

$$Q_{Top} = Q_T + Q_B + Q_I \quad (7.22)$$

$$w_{Q_T} = \pm \left[\left(\frac{\partial Q_T}{\partial Q_{Top}} w_{Q_{Top}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_T}{\partial Q_B} w_{Q_B} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.23)$$

$$w_{Q_T} = \pm \left[(w_{Q_{Top}})^2 + (w_{Q_B})^2 \right]^{1/2} \quad (7.24)$$

$$Q_B = \dot{m}_b \cdot h_{fg} \quad (7.25)$$

$$\dot{m}_b = \frac{m_b}{\Delta t} \quad (7.26)$$

olduğundan,

$$Q_B = \frac{m_b}{\Delta t} h_{fg} \quad (7.27)$$

$$w_{Q_B} = \pm \left[\left(\frac{\partial Q_B}{\partial m_b} \cdot w_{m_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.28)$$

$$w_{Q_B} = \pm \left[\left(\frac{h_{fg}}{\Delta t} \cdot w_{m_b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.29)$$

$$w_h = \pm \left[\left(\frac{1}{A(T_0 - T_\infty)} w_{Q_T} \right)^2 + \left(\frac{-Q_T}{A(T_0 - T_\infty)^2} w_{T_0} \right)^2 + \left(\frac{Q_T}{A(T_0 - T_\infty)^2} w_{T_\infty} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.30)$$

$$w_{Nu} = \pm \left[\left(\frac{D}{k} w_h \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.31)$$

Sh ve h_m 'e ait belirsizlik değerlerinin belirlenmesi:

$$Sh = \frac{h_m D}{D_{AB}} \quad (7.32)$$

$$w_{Sh} = \pm \left[\left(\frac{\partial Sh}{\partial h_m} w_{h_m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.33)$$

$$h_m = \frac{Q_B}{h_{fg} \cdot \Delta \rho_c \cdot A} \quad (7.34)$$

$$w_{h_m} = \pm \left[\left(\frac{\partial h_m}{\partial Q_B} \cdot w_{Q_B} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \Delta \rho_c} \cdot w_{\Delta \rho_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.35)$$

$$\Delta \rho_c = \rho_{v_{\infty}} - \rho_{v_0} \quad (7.36)$$

$$w_{\Delta \rho_c} = \pm \left[\left(\frac{\partial \Delta \rho_c}{\partial \rho_{v_{\infty}}} \cdot w_{\rho_{v_{\infty}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \rho_c}{\partial \rho_{v_0}} \cdot w_{\rho_{v_0}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.37)$$

$$\rho_{v_{\infty}} = \frac{P_{v_{\infty}}}{\frac{8,314}{18} \cdot (T_{\infty} + 273)} \quad (7.38)$$

$$w_{\rho_{v_{\infty}}} = \pm \left[\left(\frac{\partial \rho_{v_{\infty}}}{\partial P_{v_{\infty}}} \cdot w_{P_{v_{\infty}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{v_{\infty}}}{\partial T_{\infty}} \cdot w_{T_{\infty}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.39)$$

$$P_{v_{\infty}} = \varphi_{\infty} \cdot P_{v_{\infty},d} \quad (7.40)$$

$$w_{P_{v_{\infty}}} = \pm \left[\left(\frac{\partial P_{v_{\infty}}}{\partial \varphi} \cdot w_{\varphi_{\infty}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.41)$$

$$w_{P_{v_{\infty}}} = \pm \left[(P_{v_{\infty},d} w_{\varphi_{\infty}})^2 \right]^{1/2} \quad (7.42)$$

$$w_{\rho_{v_{\infty}}} = \pm \left[\left(\frac{18}{8,314(T_{\infty} + 273)} w_{P_{v_{\infty}}} \right)^2 + \left(\frac{-18 \cdot P_{v_{\infty}}}{8,314(T_{\infty} + 273)^2} \cdot w_{T_{\infty}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.43)$$

$$\rho_{v_0} = \frac{P_{v_0}}{\frac{8,314}{18} \cdot (T_0 + 273)} \quad (7.44)$$

$$P_{v_0} = \varphi_0 \cdot P_{v_0,d} \quad (7.45)$$

Yüzeydeki bağıl nem ölçüm yapılmadan $\varphi = 1$ kabul edilerek hesaplamalar yapıldığından $P_{v_0} = P_{v_0,d}$ olur. Doyma basıncı değeri de tablodan okunduğundan ρ_{v_0} 'a ait sapma değeri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$w_{\rho_{v_0}} = \pm \left[\left(\frac{\partial \rho_{v_0}}{\partial T_0} \cdot w_{T_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.46)$$

$$w_{\rho_{v_0}} = \pm \left[\left(\frac{-18 \cdot P_{v_0}}{8,314(T_0 + 273)^2} \cdot w_{T_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.47)$$

$$w_{\Delta \rho_c} = \pm \left[(w_{\rho_{v_0}})^2 + (-w_{\rho_{v_0}})^2 \right]^{1/2} \quad (7.48)$$

$$w_{h_m} = \pm \left[\left(\frac{1}{h_{fg} \Delta \rho_c A} w_{Q_B} \right)^2 + \left(\frac{-Q_B}{h_{fg} \cdot A \cdot \Delta \rho_c^2} w_{\Delta \rho_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.49)$$

$$w_{Sh} = \pm \left[\left(\frac{D}{D_{AB}} w_{h_m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.50)$$

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan ve deneylerde ölçülen bağımsız parametrelere ilişkin belirsizlikler, yapılan kalibrasyonlar neticesinde aşağıda yer alan Çizelge 7.1'deki gibi elde edilmiştir. Örnek olarak, yine ikinci test borusunun kaplamalı durumu için yapılan 211 numaralı deneyde; yerel yüzey sıcaklıkları, ortam sıcaklıkları ve ısıtıcı gücü çizelgede gösterildiği gibi ölçülmüştür.

Çizelge 7.3 Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu sonucunda elde edilen belirsizlikler ve deneylerde ölçülen bağımsız değişkenlerin, eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği örnek bir deneydeki değerleri

	T ₂₁ (°C)	T ₂₂ (°C)	T ₂₃ (°C)	T ₂₄ (°C)	T ₂₅ (°C)	T ₂₆ (°C)	T ₂₇ (°C)	T ₂₈ (°C)	T ₂₉ (°C)	T ₃₀ (°C)	T ₃₁ (°C)	T ₁₇ (°C)	T ₁₈ (°C)	Q W	φ (-)	m _b (gr)
±w	0.039	0.071	0.038	0.058	0.054	0.054	0.021	0.05	0.01	0.013	0.045	0.072	0.07	0.1	0.273	0.01
	41.91	39.09	39.64	39.62	39.57	40.86	39.7	39.72	40.63	39.48	41.95	10.87	10.77	39.69	34.22	19.93

Buna göre; yukarıdaki deneysel veriler kullanılarak deneylerde söz konusu olan bağımlı parametrelerin, bu örnek deney için belirsizlikleri ile beraber nominal değerleri Çizelge 7.3'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Çizelge 7.4 Eş zamanlı ısı ve kütle geçişinin incelendiği deneyde hesaplanan parametrelerin nominal değerleri ve belirsizlikleri

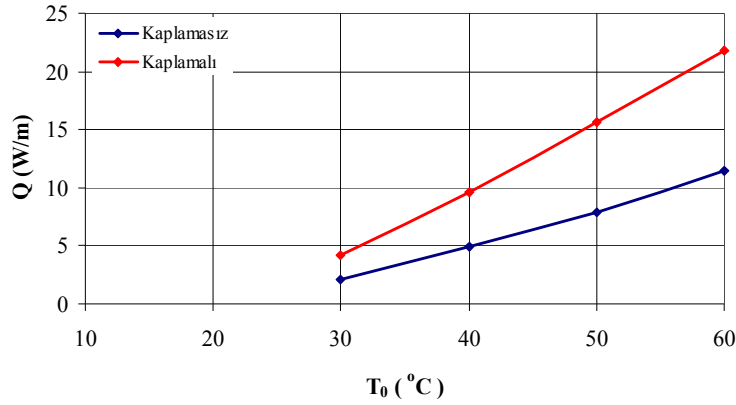
	h (W/m ² K)	Nu (-)	h_m (m/s)	Sh (-)
$\pm w$	0.1199	0.0412	0.000411	0.1457
%w	1.214	1.214	5.119	5.119

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında; sabit yüzey sıcaklığındaki yatay borudan serbest taşınım şartlarında, ısı geçişi problemi sayısal ve deneysel olarak, eş zamanlı ısı ve kütle geçişi problemi ise deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma Arçelik ARGE laboratuvarında bulunan sıcaklık ve bağıl nem değerleri hassas olarak ayarlanabilen test odasında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak, belirlenen hesap yöntemi ile her deney için Ra , Nu , Ra' , Sh sayıları hesaplanmıştır. Bu değerler yardımıyla sabit yüzey sıcaklığındaki yatay borudan serbest taşınım şartlarında ısı geçişi ile eş zamanlı ısı ve kütle geçişi problemleri için yeni korelasyonlar önerilmiştir. Deneysel sonuçlar sayısal sonuçlarla ve önceki araştırmacıların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve daha sonra yapılabilecek çalışmalarla ilgili öneriler aşağıda verilmiştir.

8.1 Sonuçlar

- Serbest taşınım şartlarında; ve sadece ısı geçişinin olduğu halde, kritik çap değerinin altındaki çapa sahip yatay boruların yüzeylerine kritik çapa kadar kaplama yapıldığında, ısı geçişinin artışı deneysel olarak belirlendi.

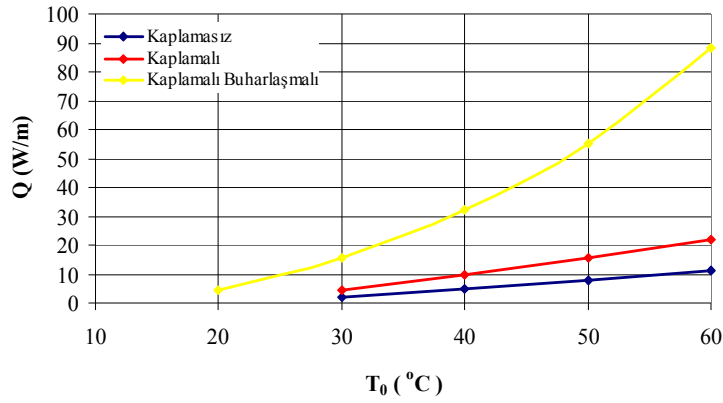


Şekil 7.1 $D = 4,8$ mm çapındaki borunun, kaplamalı ve kaplamasız durumları için yüzey sıcaklığına (T_0) bağlı olarak ölçülen ısılar. ($T_\infty = 20$ °C)

Sabit dış ortam sıcaklığında kaplamasız borudaki ısı geçişi değerine, yüzeyin kritik çapa kadar kaplanması durumunda, daha düşük yüzey sıcaklığında ulaşıldığı belirlendi.

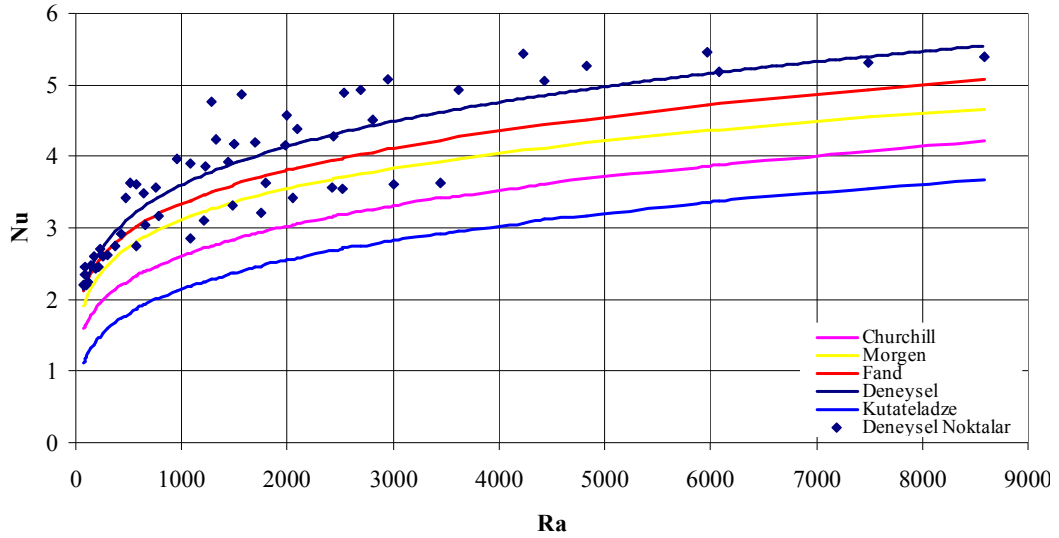
- Serbest taşınım şartlarında yatay boru yüzeyi buharlaşmalı hale getirilerek eş zamanlı ısı ve kütle geçişi sağlandığında borudan olan ısı geçişinin daha da arttığı, aynı ısı geçişinin daha da düşük yüzey sıcaklıklarında sağlanabildiği görüldü.

- Sabit soğutma yükünde çalışan soğutma sistemlerinde kritik çapın altındaki kondenser borularının yüzeyine kritik çapa kadar kaplama yapıldığında, düşük yüzey sıcaklığı sağlanabileceği, kompresör gücünün azalacağı, performansın artırılabilceği ve kaplamanın su emici özellikte bir malzeme ile yapılması halinde, yüzeyden buharlaşma ile eş zamanlı ısı ve kütle geçişi olacağından daha düşük kondenser yüzey sıcaklıkları ile soğutucu performansının daha da artırılabilceği belirlendi.



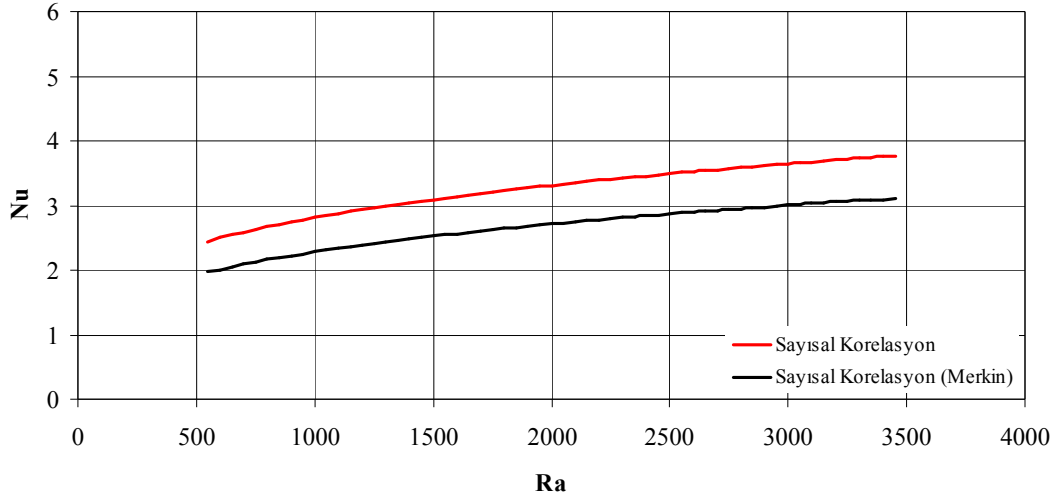
Şekil 7.2 D = 4,8 mm çapındaki borunun , kaplamalı, kaplamasız ve kaplamalı buharlaşmalı durumları için yüzey sıcaklığına (T_0) bağlı olarak ölçülen ısılar. ($T_\infty = 20^\circ\text{C}$)

- 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 yatay boru 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 ısı genleşme katsayısına bağlı hesaplanan Gr sayıları karşılaştırıldı ve değerlerin eşit çıktığı görüldü. Bu sonuç yapılan yaklaşım ve hesaplamaların doğruluğunu gösterdi.
- Tanımlanan yeni Grashof sayısı kullanılarak serbest taşınım şartlarında yatay boru için sadece ısı geçişi ve eş zamanlı ısı kütle geçişi için geçerli korelasyonların oluşturulabilmesi amacıyla Ra , Ra' , Nu , Sh değerleri hesaplandı.
- Sadece ısı geçişinin bulunduğu deneysel veriler kullanılarak $7,462 \cdot 10^1 < Ra < 8,593 \cdot 10^3$ aralığında $Pr=0.7$ hava için $Nu_D=0,898 \cdot Ra^{0,201}$ korelasyonu oluşturuldu. Yeni korelasyon, belirtilen Ra aralığında daha önceden, serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi üzerine çalışmış araştırmacıların oluşturduğu korelasyonlar ile karşılaştırıldı ve sonuçların uygun olduğu belirlendi. (Şekil 7.3)



Şekil 7.3 Deneysel noktalar, oluşturulan yeni korelasyon ve önceki çalışmaların korelasyonları

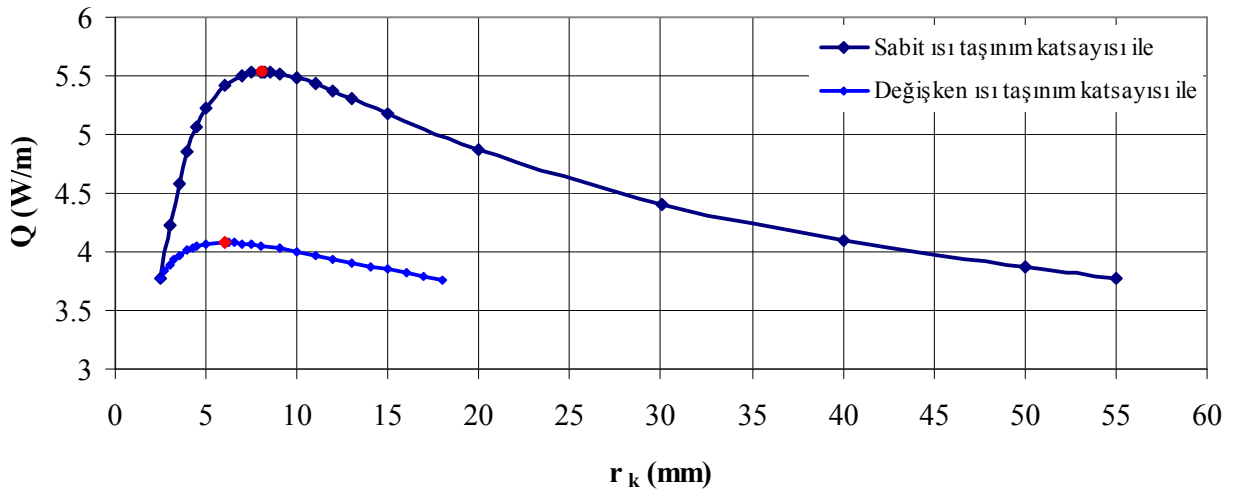
- Sabit yüzey sıcaklığındaki yatay borudan serbest taşınım şartlarında ısı geçişi problemi Fluent 6.0 CFD programı kullanılarak sayısal çözüldü ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırdı. Sayısal çözümde kullanılan model, algoritma ve yöntemlerle gerçeğe(deneylere) yakın sonuçlar (ortalama % 5,94 – 6,15 sapma ile) elde edildi. Sapmaların düşük Ra değerlerinde daha fazla olduğu belirlendi.
- Serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişi üzerine çalışmış araştırmacılar tarafından deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen genel kabul görmüş korelasyonlar, aynı sınır şartlarında bilgisayardan elde edilen sayısal çözümlerin sonuçları ile karşılaştırıldı ve eğri karakterlerinin benzer ve birbirlerine yakın olduğu görüldü. Ayrıca elde edilen sayısal çözüm sonuçları, serbest taşınım şartlarında yatay borudan ısı geçişini sonlu farklar yöntemini kullanarak sayısal incelemiş olan Merkin'in tanımladığı korelasyon sonuçları ile de karşılaştırıldı. Eşit sınır şartlarında sayısal çözümlerle hesaplanan Nu sayıları ile, Merkin'in bulduğu Nu sayıları arasında mutlak olarak ortalama % 18,65 fark hesaplandı. Fluent programı ile elde edilen sayısal çözüm sonuçları kullanılarak oluşturulan korelasyon eğrisi ile, Merkin'in önerdiği korelasyona bağlı yapılan hesapların sonuç eğrisinin yakın olduğu belirlendi.(Şekil 7.4)



Şekil 7.4 Oluşturulan sayısal korelasyon ve Merkin'in sonlu farklar yöntemini kullanarak önerdiği korelasyon

- Eşzamanlı ısı ve kütle geçişinin bulunduğu deneysel veriler kullanılarak kütle geçişi için $7,405.10^2 < Ra^1 < 1,0269.10^4$ aralığında $Sh_D = 0,751.Ra^{0,181}$ ve ısı geçişi için $8,543.10^2 < Ra < 1,1794.10^4$ aralığında $Nu_D = 0,258.Ra^{0,313}$ korelasyonları oluşturuldu. Deneysel sonuçlar serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı ve kütle geçişini yerel benzerlik (local similarity) ve yerel benzerlik dışı (local nonsimilarity) yöntemlerini kullanarak çözmüş M.Hasan ve A.S.Mujumdar'ın sonuçları ile karşılaştırıldı. Tez çalışmasında verilen korelasyon için gerekli olan hesaplamalar, toplam yoğunluk farkına göre tanımlanan Gr sayısına göre yapılmış olmasına rağmen, M.Hasan 'ın çözümleri ile karşılaştırma yapılabilmesi için korelasyonlar Gr_D ve Gr_{DC} ayrıca hesaplanarak, $Sh_D = f(Gr_{DC})$ ve $Nu_D = f(Gr_D)$ formunda tekrar oluşturuldu. M.Hasan'ın çalışmasında yerel korelasyonlar N katsayısına bağlı önerilediğinden, deneysel veriler kullanılarak bu çalışmada da her deney için N katsayısı hesaplandı. Farklı deney şartlarında katasayının -0,18 ÷ -0,41 arasında değiştiği belirlendi. Deneysel ölçüm değerleri ile hesaplanan Gr_{DC} , Gr_D değerleri kullanılarak M Hasan'ın önerdiği ampirik ifadelerle Sh ve Nu sayıları hesaplandı ve aynı sınır şartlarında deneysel Sh sonuçları ile M.Hasan tarafından sayısal yöntemle hesaplanıp önerilen Sh sayıları arasında mutlak olarak ortalama %19,94 fark olduğu ve çoğunun $\pm \%30$ sapma aralığında kaldığı görüldü. Kütle geçişi karşılaştırması için yapılan işlemler, ısı geçişi için Nu sayıları hesaplanarak tekrarlandı. Aynı sınır şartlarında deneysel sonuçlar ile M.Hasan tarafından sayısal yöntemle hesaplanıp önerilen Nu sayıları arasında mutlak olarak ortalama % 17,64 fark olduğu ve çoğunun $\pm \%30$ sapma aralığında kaldığı görüldü.

- Serbest taşınım da kritik kaplama (ısı yalıtım) kalınlığı ile ilgili çalışma kapsamında, boru yüzeyine kaplanan malzemenin kalınlığına bağlı olarak dış yüzey sıcaklığı ve buna bağlı olarak da yüzeydeki ısı taşınım katsayısının değiştiği saptanmıştır.
- Isı taşınım katsayısının değişimi dikkate alınarak gerçekleşen kritik kaplama yarıçapı, sabit kabul edilerek hesaplanan kritik yarıçaptan farklı olmaktadır. Gerçek taşınım katsayılarının dikkate alınması sonucu, kritik çapın küçük çap değerlerine doğru kaydığı belirlenmiştir (8,1mm-6mm). Kritik kaplama yarıçapında sağlanan en yüksek ısı geçişi değerinin de azaldığı belirlenmiştir (5,53–4,07 W/m). Ayrıca en küçük kaplama yarıçapındaki ısı geçişinin olduğu maksimum kaplama yarıçapının da küçük çap değerlerine doğru kaydığı görülmüştür. (55mm-18mm). Serbest taşınım şartlarında ısı taşınım katsayısının sabit kabul edilmesi durumunda kritik çapın doğru hesaplanmadığını göstermiştir. Kritik çap, ısı taşınım katsayısının değişimi dikkate alınarak belirlenmelidir (Şekil 7.5)



Şekil 7.5 Isı taşınım katsayısının sabit olduğu veya değişiminin dikkate alındığı durumlar için, ısı geçişinin kaplama yarıçapına göre değişimi

8.2 Öneriler

- Üst üste dizili yatay boru demetinden oluşan açık kondenserler ile çalışan soğutma sistemlerinde, kritik çapın altındaki boruların yüzeyi su emici bir malzeme ile kaplanarak buharlaşmalı hale getirilebilir. Bu durumda sistemin performansında oluşacak değişim incelenebilir.
- Kondenser boruları kaplama malzemesinin su emicilik özelliğinin yanında ısı kapasitesi yüksek bir malzeme olması durumunda süresiz rejim şartlarında çalışacak soğutma

sisteminin performansı daha da yükselecektir. Belirtilen özelliklere sahip kaplama malzemesi ile soğutma sisteminin performansındaki değişim teorik ve deneysel olarak belirlenebilir.

- Kritik çaptan küçük boruların yüzeyi ısı iletim katsayısı ve ısı depolama özelliği yüksek malzeme ile kaplanarak, süreksiz rejimde(kesikli çalışan) soğutuculardaki performans artışı teorik ve deneysel olarak incelenebilir.
- Isı taşınım katsayısının değişimi dikkate alınarak yapılan kritik kaplama yarıçapı çalışması, 'k' ısı iletim katsayısı daha yüksek bir malzeme ile tekrarlanabilir. Buradaki çalışmada $k=0,1 \text{ W/mK}$ alınmıştır.
- Serbest taşınım şartlarında yatay borudan eş zamanlı ısı kütle geçişi için, sayısal çalışma yapılabilir.
- Derişikliğe bağlı kaldırma kuvvetinin sıcaklık farkından oluşan kaldırma kuvvetine oranı olarak tarif edilen N sayısının sıfırdan küçük olması durumunda iki ekinin zıt yönde olacağı ve toplam kaldırma kuvvetinin sınır tabaka boyunca pozitif kalıp kalmayacağı bilinmemektedir. Bu durumlar için, N sayısının kritik bir negatif değeri olduğu ve bu değerde, kaldırma kuvvetinin sıfırlanarak ısı ve kütle taşınımının akışlarının olamayacağı açıklanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada bu iki etki birbirlerine zıt yönde olmalarına rağmen toplam kaldırma kuvveti sınır tabaka boyunca pozitif kalmaktadır. İleriki aşamada N sayısını daha da azaltacak uygun şartlarda yapılacak deneylerle bu oranın kritik değeri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Adams, J.A. ve McFadden, P.W., (1966) "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Free Convection with Opposing Body Forces", American Institute of Chemical Engineering Journal, 12: 642-647
- Allen, T.E. ve Young, R., (1999), "The Application of Three Different Evaporative Cooling Strategies to a Quick Service Restaurant", American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 105: 1152-1170
- Brucker, J., (1985), "The Effects of Property Evaluation Methods on the Correlation of Heat Transfer Data", International Communication in Heat and Mass Transfer, 11: 85-96
- Chen, T.S. ve Yuh, C.F., (1980), "Combined Heat and Mass Transfer in Natural Convection Along a Vertical Cylinder", International Journal of Heat Mass Transfer, 23: 451-461
- Ching-Yang Cheng, (2006), "Free Convection Heat and Mass Transfer from a Horizontal Cylinder of Elliptic Cross Section in Micropolar Fluids", International Communications in Heat and Mass Transfer, 33: 311-318
- Churchill, S.W. ve Usagi, R., (1972) "A General Expression for the Correlation of Rates of Transfer and Other Phenomena", American Institute of Chemical Engineering Journal, 18: 1121-1128
- 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
- Churchill, S.W. ve Chu, H.H.S., (1975), "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection From a Horizontal Cylinder", International Journal of Heat Mass Transfer, 18: 1049-1053
- Churchill, S.W. ve Ozoe, H., (1973), "A Correlation for Laminar Free Convection From a Vertical Plate", Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 95: 540-545
- De-Leeuw-Den-Bouter, J.A., De-Munnik, B. ve Heertjes, P.M., (1968) "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Laminar Free Convection From a Vertical Plate", Chemical Engineering Science, 23: 1185-1190
- Farouk, B. ve Güçeri, S.İ., (1981), "Natural Convection From a Horizontal Cylinder-Laminar Regime", Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 103: 522-527
- Fand, R.M., Morris, E.W. ve Lum, M., (1977), "Natural Convection Heat Transfer From Horizontal Cylinders to Air, Water and Silicone Oils for Rayleigh Numbers Between 3×10^2 And 2×10^7 ", International Journal of Heat Mass Transfer, 20: 1173-1184
- Fand, R.M. ve Brucker, J., (1983), "A Correlation for Heat Transfer By Natural Convection From Horizontal Cylinders That Accounts for Viscous Dissipation", International Journal of Heat Mass Transfer, 26: 709-726
- Fand, R.M. ve Kaye, J., (1961), "The Influence of Surface on Free Convection From a Horizontal Cylinder", Journal of Heat Transfer, 83: 133-148
- Fouad, M.G. ve Ibl, N., (1960), "Natural Convection Mass Transfer at Vertical Electrodes Under Turbulent Flow Conditions", Electrochimica Acta, 3: 233-243

- Fenech, E.J. ve Tobias, C.W., (1960), "Mass Transfer by Free Convection at Horizontal Electrodes", *Electrochimica Acta*, 2: 311-325
- Gebhart, B. ve Pera, L., (1970), "Mixed Convection From Long Horizontal Cylinders", *Journal of Fluid Mechanics*, 45: 49-64
- Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, L.R., ve Sammakia, B., (1988), "Bouyancy-Induced Flows and Transport- Reference Edition", Springer-Verlag, Berlin.
- Gebhart, B., (1971), "Heat Transfer", McGraw-Hill, New York.
- Gebhart, B., (1993), "Heat Conduction and Mass Diffusion", McGraw-Hill, New York.
- Gebhart, B. ve Pera, L., (1971), "The Nature of Vertical Natural Convection Flows Resulting from the Combined Buoyancy Effects of Thermal and Mass Diffusion", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 14: 2025-2050
- Gill, W.N., Del-Casal, E. ve Zeh, D.W., (1965), "Binary Diffusion and Heat Transfer in Laminar Free Convection Boundary Layers on a Vertical Plate", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 8: 1135-1151
- Goswami, D.Y., Mathur, G.D. ve Kulkarni, S.M., (1993), "Experimental Investigation of Performance of a Residential Air Conditioning System With an Evaporatively Cooled Condenser", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 115: 206-211
- Hasan, M. ve Mujumdar, A.S., (1983), "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Free Convection from a Horizontal Cylinder", *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 23: 1602-1608
- Hasan, M. ve Mujumdar, A.S., (1985), "Combined Heat and Mass Transfer in Free Convection About a Sphere", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 63: 412-421
- Hasan, M. ve Mujumdar, A.S., (1984), "Coupled Heat and Mass Transfer in Natural Convection Under Flax Condition Along a Vertical Cone", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 11: 157-172
- Hasan, M. ve Mujumdar, A.S., (1985), "Simultaneous Mass and Heat Transfer Under Mixed Convection Along a Vertical", *International Journal of Energy Research*, 9: 129-140
- Huang, C.C., Yan, W.M. ve Jang, J.H., (2005), "Laminar Mixed Convection Heat and Mass Transfer in Vertical Rectangular Ducts With Film Evaporation and Condensation", *International Journal of Heat Mass Transfer* 48: 1772-1784
- Hasan, M. ve Mujumdar, A.S., (1987), "Laminar Boundary-Layer Analysis of Simultaneous Mass and Heat Transfer in Natural Convection Around a Horizontal Cylinder", *International Journal of Energy Research*, 11: 359-371
- Incropera, F.P. ve Yaghoubi, M.A., (1980), "Buoyancy Driven Flows Originating From Heated Cylinders Submerged in a Finite Water", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 23: 269-278
- Incropera, P.F., DeWitt, P.D., (2001), "Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri", Literatür Yayınevi, İstanbul.
- Kılıç, M., Yiğit, A., (2000), "Isı Transferi", Vipaş, Bursa.

- Kitamura, K., Kami-Iwa, F. ve Misumi, T., Smith, S., (1999), "Heat Transfer and Fluid Flow of Natural Convection Around Large Horizontal", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 42: 4093-4106
- Koh, J.C.Y., (1964), "Laminar Free Convection From a Horizontal Cylinder with Prescribed Surface Heat Flux", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 7: 811-823
- Kutateladze, S.S., (1963), "Fundamentals of Heat Transfer", Academic Pres.
- Kuehn, T.H. ve Goldstein, R.J., (1980), "Numerical Solution to the Navier-Stokes Equations for Laminar Natural Convection About a Horizontal Isothermal Circular Cylinder", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 23: 971-979
- Kuehn, T.H. ve Goldstein, R.J., (1976), "Correlating Equations for Natural Convection Heat Transfer Between Horizontal Circular Cylinders", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 19: 1127-1134
- Lin, F.N. ve Chao, B.T., (1978), "Predictive Capabilities of Series Solutions for Laminar Free Convection Boundary Layer Heat Transfer", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 100: 160-163
- Lin, F.N. ve Chao, B.T., (1974), "Laminar Free Convection Over Two-Dimensional and Axisymmetric Bodies of Arbitrary Contour", *Journal of Heat Transfer*, 94: 435-442
- Liu, W., Shen, S. ve Riffat, S.B., (2002), "Heat Transfer and Phase Change of Liquid in an Inclined Enclosure Packed With Unsaturated Porous Media", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 45: 5209-5219
- Martynenko, O.G. ve Khramtsov P.P., (2005), "Free Convective Heat Transfer", Springer-Verlag, Berlin.
- Merkin, J.H., (1977), "Free Convection Boundary Layers on Cylinders of Elliptic Cross Section", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 99: 453-457
- Muntasser, M.A. ve Mulligan, J.C., (1978), "A Local Nonsimilarity Analysis of Free Convection From a Horizontal Cylindrical Surface", *Journal of Heat Transfer*, 100: 165-167
- Misumi, T., Suzuki, K. ve Kitamura, K., (2003), "Fluid Flow and Heat Transfer of Natural Convection Around Large Horizontal Cylinders: Experiments With Air", *Heat Transfer-Asian Research*, 32: 293-304
- Marchiano, S.L. ve Arvia, A.J., (1968), "Diffusional Flow Under Non-Isothermal Laminar Free Convection at a Thermal Convective Electrode", *Electrochimica Acta*, 13: 1657-1669
- Morgan, V.T., (1975), "The Overall Convective Heat Transfer from Smooth Circular Cylinders", *Advances in Heat Transfer*, 11: 199-211
- Pera, L. ve Gebhart, B., (1972), "Experimental Observations of Wake Formation Over Cylindrical Surfaces in Natural Convection", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 15: 175-177
- Peterson, D., Glasser, D., Williams, D. ve Ramsden, R., (1988), "Predicting the Performance of an Evaporative Condenser", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 110: 748-753
- Rolle, K.C., (2000), "Heat and Mass Transfer", Prentice Hall, New Jersey.

- Raithby, G.D. ve Hollands, K.G.T., (1976), "Laminar and Turbulent Free Convection From Elliptic Cylinders, With a Vertical Plate and Horizontal Circular Cylinder as Special Cases " *Journal of Heat Transfer (of The ASME Transactions)*, 98: 72-80
- Saville, D.A. ve Churchill, S.W., (1970) "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Free Convection Boundary Layers", *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 16: 268-273
- Saville, D.A. ve Churchill, S.W., (1967), "Laminar Free Convection in Boundary Layers Near Horizontal Cylinders and Vertical Axisymmetric Bodies", *Journal of Fluid Mechanics*, 29: 391-399
- Sadeghipour, M.S. ve Asheghi, M., (1994), "Free Convection Heat Transfer From Arrays of Vertically Separated Horizontal Cylinders at Low Rayleigh Numbers", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 37: 103-109
- Sparrow, E.M., Minkowycz, W.J. ve Eckert, E.R.G., (1964), "Transpiration-Induced Buoyancy and Thermal Diffusion-Diffusion Thermo in a Helium-Air Free Convection Boundary Layer", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 86: 508-514
- Sparrow, E.M., Kratz, G.K. ve Schuerger, M.J., (1983), "Evaporation of Water a Horizontal Surface By Natural Convection", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 105: 469-475
- Schulak, E.R., (1998), "Experimental and Analytical Evaluation of a Ground-Coupled Refrigerator-Freezer", *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 13: 1118-1125
- Saraç, H., Patrick, M.A. ve Wragg, A.A., (1993), "Physical Properties of the Ternary Electrolyte Potassium Ferri-Ferrocyanide in Aqueous Sodium Hydroxide Solution in the Range 10-90 °C", *Journal of Applied Electrochemistry*, 23: 51-55
- Saraç, H., Wragg, A.A. ve Patrick, M.A., (1991), "Combined Heat and Mass Transfer by Natural Convection at Horizontal Cylinder Electrodes", *International Communication in Heat Mass Transfer*, 18: 853-863
- Saraç, H., Wragg, A.A. ve Patrick, M.A., (1993), "Natural Convection Mass Transfer at Horizontal Cylinder Electrode With an opposed Thermal Buoyancy Effect", *Electrochimica Acta*, 38: 2589-2598
- Schütz, G., (1963), "Natural Convection Mass-Transfer Measurements on Spheres and Horizontal Cylinders by an Electrochemical Method", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 6: 873-879
- Saraç, H. ve Korkut, Ö., (1999), "External and Internal Natural Convection Mass Transfer at Cylindrical Tubular Electrodes", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 32: 130-133
- Sedahmed, G.H. ve Nirdosh, I., (1990), "Free Convection Mass Transfer at Horizontal Cylinders With Active Ends", *International Communication in Heat Mass Transfer*, 17: 355-266
- Sparrow, E.M., Kratz G.K. ve Schuerger E.M., (1983), "Evaporation of Water From a Horizontal Surface by Natural Convection", *Journal of Heat Transfer (of The ASME Transactions)*, 105: 469-475

- Sripada, R.K.L. ve Angirasa, D., (2001), "Simultaneous Heat and Mass Transfer by Natural Convection Above Upward Facing Horizontal Surfaces" *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 36: 1019-1029
- Sparrow, E.M., Minkowycz, W.J. ve Eckert E.R.G., (1964), "Transpiration-Induced Buoyancy and Thermal Diffusion – Diffusion Thermo in a Helium-Air Free Convection Boundary Layer" *Journal of Heat Transfer*(of The ASME Transactions), C86: 508-514
- Tewfik, O.E. ve Yang, J.W., (1963), "The Thermodynamic Coupling Between Heat and Mass Transfer in Free Convection With Helium Injection", *International Journal of Heat Mass Transfer* 6: 915-923
- Tewfik, O.E. ve Yang, J., (1963), "The Thermodynamic Coupling Between Heat and Mass Transfer in Free Convection With Helium Injection" *International Journal Heat and Mass Transfer*, 6: 915-923
- Welty, R.J., Wicks C.E., Wilson R.E. ve Rorrer G. (2000), "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, New York.
- Wilcox, W.R., (1961) "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Free Convection", *Chemical Engineering Science*, 13: 113-119
- Warrington, R.O., Smith, S., Powe, R.E. ve Mussulman, R.L., (1988), "Boundary Effects on Natural Convection Heat Transfer For Cylinders and Cubes", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 31: 1322-1325
- Wragg, A.A. ve Nasıruddin, A.K., (1973), "Ionic Mass Transfer By Free Convection With Simultaneous Heat Transfer", *Electrochimica Acta*, 18: 619-627
- Weber, M.E., Astrauskas, P. ve Petsalis, S., (1984), "Natural Convection Mass Transfer to Nonspherical Objects at High Rayleigh Number", *The Canadian of Journal of Chemical Engineering*, 62: 68-72
- Yih, K.A., (1999), "Coupled Heat and Mass Transfer By Natural Convection Adjacent to a Permeable Horizontal Cylinder in a Saturated Porous Medium", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 26: 431-440
- Zaki, M., Nirdosh, I. ve Sedahmed, G.H., (2003), "Natural Convection Mass Transfer Behaviour of Vertical and Horizontal Cylinders Embedded in an Inert Fixed Bed of Raschig Rings", *Chemical Engineering and Processing*, 42: 977-984

INTERNET KAYNAKLARI

- [1]www.fbe.yildiz.edu.tr
- [2]www.sciencedirect.com
- [3]www.engineeringvillage.com
- [4]www.interscience.com
- [5]www.ceced.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 28.05.1974

Doğum yeri Batman

Lise 1985–1992 İstek Özel Semiha Şakir Lisesi

Lisans 1992–1996 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği BölümüYüksek Lisans 1996–1999 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses ProgramıYüksek Lisans 1998–2000 Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü
İşletme Anabilim Dalı, Uluslararası İşletmecilik
ProgramıDoktora 1999–2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı**Çalıştığı kurumlar**1996–1997 Wilo Pompa Sanayi ve Ticaret A.Ş.
1997-Devam ediyor YTÜ Makine Fakültesi Araştırma Görevlisi