



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÜŞEY PERİYODİK SALINIMA SAHİP BİR LEVHADAN
TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Selma AKÇAY

**Danışman
Prof. Dr. Ünal AKDAĞ**

AKSARAY, 2020



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÜŞEY PERİYODİK SALINIMA SAHİP BİR LEVHADAN
TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Selma AKÇAY

**Danışman
Prof. Dr. Ünal AKDAĞ**

AKSARAY, 2020

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 152318601 numaralı Doktora öğrencisi, **Selma AKÇAY** tarafından hazırlanan “**DÜŞEY PERİYODİK SALINIMA SAHİP BİR LEVHADAN TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışmanı: Prof. Dr. Ünal AKDAĞ

Aksaray Üniversitesi

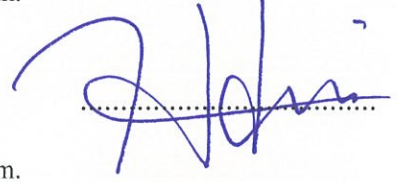
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Sebahattin ÜNALAN

Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Dr.Öğr.Üyesi Doğan DEMİRAL

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Bilge ALBAYRAKÇEPER

Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 07/01/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Doç. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü

DOĞRULUK BEYANI

Doktora tezi olarak sunduđum bu çalıřmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlâk ve geleneklere aykırı dűőecek bir yol ve yardıma bařvurmaksızın yazdıđımı, yararlandıđım eserlerin kaynakçada gűsterilenlerden oluřtuđunu, çalıřmamda kullandıđım verilerin orijinalliđini ve her tűrlű intihalden uzak olduđunu beyan ederim.

Enstitű tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durum saptanması durumunda ortaya çıkacak tűm ahlâki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.


Selma AKÇAY

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında desteğini esirgemeyen, sürekli motive ederek beni aktif tutan, bilgi ve tecrübelerini paylaşıırken sonsuz sabır ve hoşgörü gösteren, birlikte çalışmaktan onur duyduğum ve her yönüyle örnek aldığım başta danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ünal AKDAĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın çeşitli aşamalarında yardımını esirgemeyen Aksaray Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Doğan DEMİRAL'a ve Öğretim Görevlisi Hakan PALANCIOĞLU'na, Erciyes Üniversitesi Araştırma Görevlisi Orhan KEKLİKCİOĞLU'na, Kayseri Sağlık Müdürlüğü'nde görev yapan mesai arkadaşım Elektrik Teknikeri Ali KIYAK'a ve emeği geçen diğer hocalarıma, arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Son olarak yoğun çalışmalarım sırasında sabır gösteren ve her türlü desteği veren eşim Nihat AKÇAY'a ve bu günlere gelmemde büyük emek sahibi olan, her şeyde olduğu gibi bu zorlu süreçte de sürekli yanımda olup beni destekleyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Selma AKÇAY
AKSARAY, 2020

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Taşınım ile Isı Transferi	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1 Düz Yüzeylerde Taşınım ile Isı Transferi.....	5
2.2 Düşey Yüzeylerde Taşınım ile Isı Transferi	6
2.3 Hareketli Düşey Yüzeylerde Taşınım ile Isı Transferi	11
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	33
3.1 Giriş	33
3.2 Deney Düzenegi	35
3.3 Deneylerin Yapılışı	39
3.4 Levha Yüzey Sıcaklığının Belirlenmesi	43
3.5 Isı Geçiş Hesabı.....	48
3.6 Isı Transferini Etkileyen Fiziksel Parametreler ve Boyutsuz Sayılar.....	54
3.7 Belirsizlik Analizi	56
4. SAYISAL ÇALIŞMA.....	59
4.1 Giriş	59
4.2 Matematik Model	63
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	82
KAYNAKLAR.....	84
EKLER.....	94
EK A. Deneysel parametreler	95
EK B. Boyut Analizi	96
EK C. Belirsizlik Analizi	99
ÖZGEÇMİŞ.....	100

DOKTORA TEZİ

DÜŞEY PERİYODİK SALINIMA SAHİP BİR LEVHADAN TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

Selma AKÇAY

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ünal AKDAĞ

ÖZET

Bu çalışmada, düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının karışık taşınım ile ısı transferi üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel düzenek, şeffaf bir muhafaza, bu muhafaza içinde hareket eden deneysel model, deneysel modelin periyodik hareketini sağlayan volan-motor sistemi, veri toplama sistemi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar, hem hareketsiz düşey levha hem de periyodik hareketli düşey levha için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde parametrik çalışma için Rayleigh sayısı ($1.17 \times 10^7 \leq Ra \leq 3.6 \times 10^7$), salınım genliği ($0.4 \leq Ao \leq 1.4$) ve salınım frekansı ($65 \leq Wo \leq 146$) değiştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, anlık ve ortalama sıcaklıklar elde edilmiş, bu veriler kullanılarak ısı transferi performansı hesaplanmıştır. Ayrıca salınım parametrelerinin Richarson Sayısı (Ri) üzerindeki etkileri de analiz edilmiştir. Deneysel çalışmada belirsizliğe neden olan parametreler belirlenerek toplam belirsizlik analizi hesaplanmıştır. Sayısal çalışmalar için deneysel veriler esas alınarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı ANSYS Fluent programı ile sayısal hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalar sonucunda, levha yüzeyinde ortaya çıkan karışık taşınımla ısı transferi miktarı hesaplanmış ve sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlarla ve yaygın literatür ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca levha yüzeyindeki anlık hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sonuç olarak, periyodik salınımlı düşey levha için elde edilen ısı transferi, sabit düşey levha için elde edilen ısı transferinden daha yüksek bulunmuştur. Isı transferi performansının, salınım parametrelerinden ve Ra sayısından oldukça etkilendiği gözlemlenmiştir. En iyi ısı transfer performansı düşük Ra sayısında ($Ra=1.17 \times 10^7$), yüksek salınım genliği ($Ao=1.4$) ve yüksek salınım frekansında ($Wo=146$) yaklaşık % 43 olarak elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Salınımlı levha, Karışık taşınım, Isı transferi iyileştirme, Salınım genliği, Salınım frekansı.

Ocak, 2020; 100 sayfa

PhD. THESIS

INVESTIGATION OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER FROM A PLATE HAVING VERTICAL PERIODIC OSCILLATION

Selma AKÇAY

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Ünal AKDAĞ

ABSTRACT

In this study, effects on mixed convection heat transfer of periodic oscillations on a vertical flat plate were experimentally and numerically investigated. The experimental setup consists of a transparent enclosure, the experimental model moving within the enclosure, the flywheel-motor system for periodic motion of the experimental model, the data acquisition system and the computer. In the study, Rayleigh number ($1.17 \times 10^7 \leq Ra \leq 3.6 \times 10^7$), oscillation amplitude ($0.4 \leq Ao \leq 1.4$) and oscillation frequency ($65 \leq Wo \leq 146$) were changed. As a result of the experimental study, instant and average temperatures were obtained and heat transfer performance was calculated using these data. In addition, the effects of oscillation parameters on the Richardson Number (Ri) were analyzed. Total uncertainty analysis was calculated by determining the parameters causing uncertainty in the experimental study. For numerical studies, numerical simulations were performed by using ANSYS Fluent program based on Computational Fluid Dynamics (CFD) according to experimental data. As a result of the simulations, the mixed convection heat transfer on the plate surface was calculated and numerical results were compared with experimental results and widespread literature. In addition, instant velocity and temperature contours were obtained on the plate surface. As a result, the heat transfer obtained for the periodic oscillating vertical plate was higher than the heat transfer obtained for the fixed vertical plate. The heat transfer performance was significantly affected by the oscillation parameters and Ra numbers. The best heat transfer performance was obtained about 43 % at low Ra number ($Ra = 1.17 \times 10^7$), high amplitude ($Ao = 1.4$) and high oscillation frequency ($Wo = 146$).

Keywords: Oscillating plate, Mixed convection, Heat transfer enhancement, Oscillation amplitude, Oscillation frequency.

January, 2020; 100 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Düşey bir levha üzerinde doğal taşınım akımlarının şematik görünümü.....	3
Şekil 2.1.	Düşey bir levha üzerinde karışık taşınım uygulamaları.....	7
Şekil 2.2.	Düşey bir levha üzerinde gerçekleşen karışık taşınım uygulamaları	8
Şekil 2.3.	Düşey bir levha üzerinde karışık taşınım uygulamaları.....	10
Şekil 2.4.	Düşey bir levha üzerinde karışık taşınım uygulaması, a- destekler akış, b- zıt akış	10
Şekil 2.5.	Sürekli hareketli bir levha üzerinde karışık taşınım uygulamaları.	15
Şekil 2.6.	Düşey hareketli bir levhada karışık taşınım uygulamaları.....	16
Şekil 2.7.	Düşey hareketli bir yüzeyde karışık taşınım uygulaması a- destek akış, b- zıt akış	17
Şekil 2.8.	Hareketli bir levhada karışık taşınım uygulamaları.....	18
Şekil 2.9.	Sürekli hareketli düşey bir levhada karışık taşınım uygulamaları	19
Şekil 2.10.	Hareketli bir levhada karışık taşınım uygulamaları.....	21
Şekil 2.11.	Hareketli bir levhada taşınım uygulamaları.....	22
Şekil 2.12.	Hareketli bir levhada karışık taşınım uygulamaları.....	23
Şekil 2.13.	Hareketli bir levhada karışık taşınım ve kütle transferi uygulamaları	24
Şekil 2.14.	Salınlı düşey bir levhadan doğal taşınım ile ısı transferi uygulamaları	26
Şekil 2.15.	Pulsatif akışta düşey bir levhadan ısı transferi uygulamaları	27
Şekil 2.16.	Salınlı düşey bir silindirdede doğal taşınımla ısı transferi uygulamaları	29
Şekil 3.1.	Deney düzeneği.	33
Şekil 3.2.	Deney düzeneğinin şematik görünümü.	35
Şekil 3.3.	Deneysel modelin şematik görünümü.	36
Şekil 3.4.	Ön ve arka levhalar üzerine yerleştirilen termoelemanlar (ölçüler mm'dir).	37
Şekil 3.5.	a- Kapton ısıtıcı, b-Deneysel modelin son hali.	38
Şekil 3.6.	Düşey levhanın muhafaza içerisindeki farklı konumları.	40
Şekil 3.7.	Sabit levhanın farklı H/L oranları için elde edilen yüzey sıcaklıkları.....	41
Şekil 3.8.	Sabit levha üzerinde farklı Ra sayıları için elde edilen yüzey sıcaklıkları.....	41
Şekil 3.9.	Farklı salınım genliği ve frekansı ile yüzey sıcaklıklarının değişimi, a- $A_0=0.4$, b- $A_0=0.75$, c- $A_0=1.1$, d- $A_0=1.4$	45
Şekil 3.10.	Farklı salınım genliği ve frekansı ile yüzey sıcaklıklarının değişimi, a- $A_0=0.4$, b- $A_0=0.75$, c- $A_0=1.1$, d- $A_0=1.4$	46
Şekil 3.11.	Farklı salınım genliği ve frekansı ile yüzey sıcaklıklarının değişimi, a- $A_0=0.4$, b- $A_0=0.75$, c- $A_0=1.1$, d- $A_0=1.4$	48
Şekil 3.12.	Farklı Ra sayılarında ($Ra \times 10^7$) levha yüzeyindeki ilk termoelemandan alınan sıcaklık verilerine göre anlık Nu sayısının değişimi.	51

Şekil 3.13.	Farklı ısı akıları için salınım genliği ve frekansının ısı transferi performansına etkisi.	52
Şekil 3.14.	Salınım genliği ve frekansının Ri sayısı üzerindeki etkisi.	53
Şekil 3.15.	Farklı Ra sayılarında ($Ra \times 10^7$) salınım frekansının Ri sayısına etkisi.	54
Şekil 4.1.	Sayısal modelin ağ yapısı ve sınır şartlar.	60
Şekil 4.2.	Çalışmada kullanılan dinamik mesh metodları, a-Smoothing method, b-Remeshing method.	62
Şekil 4.3.	Farklı çözüm modellerinin ısı transferi performansının karşılaştırılması.	65
Şekil 4.4.	Deneyssel ve sayısal olarak levha yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması.	66
Şekil 4.5.	Sayısal ve deneyssel sonuçların literatür çalışmaları ile karşılaştırılması.	66
Şekil 4.6.	Bir çevrim boyunca hareketli ağ yapısı ($Ra=1.17 \times 10^7$, $A_0=0.75$, $Wo=92$).	69
Şekil 4.7.	Bir çevrim boyunca salınım genliği ile levha yüzeyindeki anlık ve ortalama sıcaklıkların değişimi, a- $A_0=0.4$, b- $A_0=0.75$, c- $A_0=1.1$, d- $A_0=1.4$	69
Şekil 4.8.	Farklı salınım genlikleri için zamanla $Nu(x,t)$ sayısının değişimi.	70
Şekil 4.9.	Bir çevrim boyunca frekansla ısı transferi performansının değişimi.	71
Şekil 4.10.	Bir çevrim boyunca genlik ile ısı transferi performansının değişimi.	71
Şekil 4.11.	Salınım genliği ile deneyssel ve sayısal ısı transfer performansının karşılaştırılması.	72
Şekil 4.12.	Salınım frekansı ile deneyssel ve sayısal ısı transferi performansının karşılaştırması, a- $A_0=0.75$, b- $A_0=1.4$	73
Şekil 4.13.	Sayısal ısı transferi performansının deneyssel sonuçlara göre % değişimi.	74
Şekil 4.14.	Toplam deneyssel belirsizlik oranlarına göre sayısal ve deneyssel ısı transferi performansının karşılaştırılması.	74
Şekil 4.15.	Farklı faz açılarında a-Sıcaklık görüntüleri, b- Hız görüntüleri ($Ra=1.17 \times 10^7$, $A_0=1.4$, $Wo=92$).	75
Şekil 4.16.	Levha üzerinde oluşan akış vektörleri, a-hız, b- sıcaklık ($Ra=1.17 \times 10^7$, $A_0=1.4$, $Wo=92$, $\omega t=300^\circ$).	76
Şekil 4.17.	Farklı salınım genlikleri için, a-Sıcaklık görüntüleri, b- Hız görüntüleri ($Ra=1.17 \times 10^7$, $Wo=92$ ve $\omega t=180^\circ$).	78
Şekil 4.18.	Farklı ısı akıları için a-sıcaklık görüntüleri, b-hız görüntüleri ($A_0=0.75$, $Wo=146$ ve $\omega t=90^\circ$).	79
Şekil 4.19.	Farklı salınım frekansları için, a-Sıcaklık görüntüleri, b-Hız görüntüleri ($Ra=1.17 \times 10^7$, $A_0=0.75$ ve $\omega t=270^\circ$).	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Levha salınımına ait hız ile ilgili parametreler.	42
Çizelge 3.2.	Levha yüzeyinden ısıtım ile olan ısı transferi	49
Çizelge 4.1.	Grid bağımsızlığı testi.....	59
Çizelge 4.2.	Farklı çözüm metodlarının karşılaştırılması.	65



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

ALE	Arbitrary Lagrangian Eularian
A₀	Boyutsuz genlik [=x _m /L]
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMM	Compound Matrix Method
c_p	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg°C)
DES	Detached Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
DTM	Diferansiyel Dönüşüm Metodu
f	Frekans (1/s)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
Gr	Grashof sayısı [=gβ(T _w -T _∞)L ³ /ν ²]
h	Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
H	Modelin zeminden uzaklığı (m)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
h_m	Ortalama ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
h(x,t)	Anlık (yerel) ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
k_f	Akışkanın ısı iletim katsayısı (W/mK)
L	Karakteristik uzunluk (m)
LES	Large Eddy Simulation
MHD	Magneto-hidrodinamik
n	Motor dönme hızı (d/d)
N	Toplam veri sayısı
Nu	Nusselt Sayısı [=hL/k _f]
Nu_m	Ortalama Nusselt Sayısı [=h _m L/k _f]
Nu(x,t)	Anlık yerel Nusselt Sayısı [=h(x,t)L/k _f]
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators
Pr	Prandtl Sayısı [=μc _p /k]
q"	Isı akısı (W/m ²)
q"_{ışınım}	Işınım ile ısı transferi (W/m ²)
Ra	Rayleigh sayısı [=GrPr]
Re	Reynolds Sayısı [=uL/ν]
Re_ω	Kinetik Re sayısı [=Wo ²]
Ri	Richardson Sayısı [=Gr/Re ²]
RNG	ReNormalization Group
SST	Shear-Stress Transport
St	Strouhal Sayısı [=ωL/u]
T	Periyot (s)
t	Zaman (s)
T_∞	Ortalama akışkan sıcaklığı (°C)
T_f	Film sıcaklığı (K)
T_w	Levhanın ortalama yüzey sıcaklığı (°C)
T_{w,i}	Levhanın anlık yerel sıcaklığı (°C)
T_{w,x}	Termoelemanndan alınan ortalama yerel sıcaklık (°C)

u	x yönündeki hız (m/s)
URANS	Unsteady Reynolds Average Navier Stokes
u_w	Ortalama levha hızı (m/s)
v	y yönündeki hız (m/s)
w_{Nu}	Nu sayısının belirsizlik miktarı
Wo	Womersley sayısı [$=L(\omega/\nu)^{1/2}$]
x_m	Boyutlu genlik (m)
x_o	Ahşap uç genişliği (m)
τ	Çevrim zamanı
α	Isı yayılım katsayısı (m ² /s)
β	Isıl genleşme katsayısı (1/K)
ΔT	Sıcaklık farkı (°C)
Δt	Zaman aralığı (s)
ε	Yüzeyin yayıcılık oranı
η	Isı transfer performansı
μ	Dinamik viskozite (Pa/s)
ρ	Akışkan yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_∞	Serbest akışkan yoğunluğu (kg/m ³)
σ	Stefan Boltzmann sabiti (W/m ² K ⁴)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
φ	Bir çevrim zamanı (s)
ω	Açısal hız (rad/s)

1. GİRİŞ

Isı ve kütle transferinde, bir yüzey üzerinde gerçekleşen dış akışlar, önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Bu yüzeylerde, taşınım ile olan ısı geçişinin incelenmesi, birçok mühendislik problemi açısından önemlidir. Ancak, yapılan çalışmalarda taşınım ile ısı transferinde genellikle doğal taşınımın etkileri ihmal edilirken sadece zorlanmış taşınım ile ilgilenilmektedir. Özellikle düşük Reynolds sayılarında ve yüksek yüzey sıcaklıklarında, doğal taşınımı ihmal etmek büyük hatalara neden olmaktadır. Bu tür uygulamalarda, karışık taşınım olarak tariflenen hem kaldırma kuvvetlerinin hem de zorlanmış taşınım etkilerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Zorlanmış taşınımında, kaldırma kuvvetinin ısı transferi üzerindeki etkisi, bu kuvvetin yönü ile akışın yönüne bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir.

Durgun haldeki bir akışkanın, düşük hızda sürekli hareket eden sıcak bir yüzeye teması sonucu karışık taşınım ile ısı transferi meydana gelmektedir. Bu fiziksel durum, Blasius akışı olarak bilinen sabit düz bir levha üzerinde meydana gelen klasik sınır tabaka akışından daha farklıdır. Yüzey ile akışkan arasındaki sıcaklık farkının büyük olması ve hareketli yüzeyin hızının da nispeten düşük olması durumunda akış içinde sıcaklık farklarından kaynaklanan kaldırma kuvveti de önemli bir etkiye sahip olabilmektedir. Bu durum, yüzey üzerinde hız ve sıcaklık dağılımlarını önemli ölçüde etkileyerek yüzeyden ısı aktarım hızını değiştirebilmektedir. Isı aktarım hızı da yüzeyin şekli, eğimi, hareketli yüzeyin hızı, akışkan hızı, akışkan türü, akışkanın yoğunluğu, akışkan ve yüzey arasındaki sıcaklık farkı gibi pek çok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Karışık taşınım ile ısı transferi, kompakt ısı değiştiricileri, nükleer reaktörlerin soğutulması, elektronik cihazların soğutulması, güneş kollektörleri gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir (Chen vd., 1980; Bejan, 1994; Partha, 2005). Bu nedenle düz bir levha yüzeyinde, kaldırma kuvvetlerinin zorlanmış taşınım etkilerine yardımcı olması sonucu gerçekleşen karışık taşınım ısı transferi ve bu ısı transferinin hangi koşullarda iyileştiği araştırılan konular arasındadır.

1.1 Taşınım ile Isı Transferi

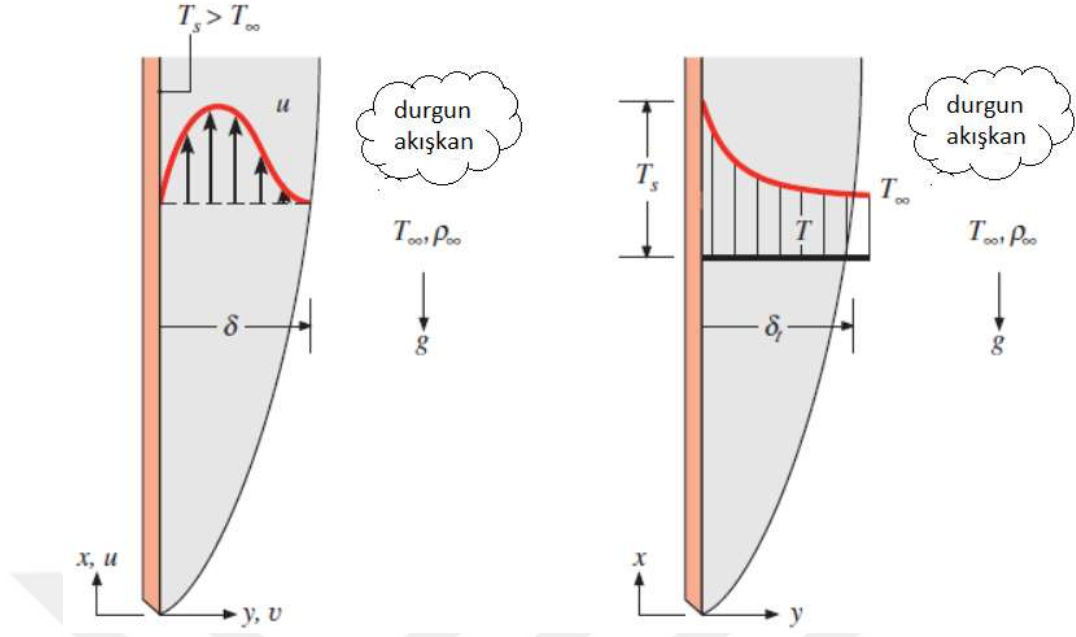
Isı transferi, sıcaklık farkından kaynaklanan enerji aktarımı olup yönü her zaman yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğrudur. Isı transferi, iletim (kondüksiyon),

ışınım (radyasyon) ve taşınım (konveksiyon) olmak üzere üç yolla gerçekleşir. Bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan, farklı sıcaklıklarda ise aralarında taşınım ile ısı transferi meydana gelir. Tek fazlı akışkanlar için taşınım ile ısı transferi, doğal, zorlanmış ve karışık taşınım olmak üzere üç yolla gerçekleşir.

Zorlanmış taşınım, akışkanın yüzey üzerindeki hareketi, fan, pompa veya rüzgâr gibi herhangi bir dış kuvvet ile sağlanır. Zorlanmış taşınım, akışkan hızının yüksek olması nedeniyle, ısı transfer katsayısı da doğal taşınım göre daha yüksektir. Zorlanmış taşınım, akış rejimini belirlemede Reynolds sayısından yararlanır.

Doğal taşınım, akışkanın hareketi, akışkan ister sıvı ister gaz olsun kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanır. Kaldırma kuvveti, akışkan içindeki yoğunluk farkı ve yoğunlukla orantılı bir gövde kuvvetinin varlığı nedeniyle meydana gelir. Yoğunluk farkı genelde sıcaklık farkından kaynaklanır. Gazların ve sıvıların yoğunluğu artan sıcaklıkla birlikte azalır. Sınır tabaka içinde akışkana iki tür kuvvet etkiyebilir. Bunlar hacimle orantılı olan gövde kuvvetleri ve alanla orantılı olan yüzey kuvvetleridir. Doğal taşınım akımlarına sebep olan kaldırma kuvvetleri, gövde kuvvetleridir. Yerçekimi, merkezkaç kuvveti, manyetik ve elektrik alanlar toplam gövde kuvvetine katkıda bulunabilmektedir. Zorlanmış taşınım, Re sayısının aldığı rolü, doğal taşınım, Grashof sayısı alır (Incropera ve DeWitt, 2006).

Şekil 1.1’de durgun bir ortamda, sabit düşey düz bir levha üzerinde, doğal taşınım sonucu oluşan hız ve ısı sınır tabakalar gösterilmiştir. Hız sınır tabakada, kaymama şartı nedeniyle levha üzerinde hız sıfırdır, daha sonra maksimuma ulaşır ve doğal taşınım akımlarının bittiği yerde yine sıfır olmaktadır. Düşey levha üzerindeki sınır tabaka başlangıçta laminardır, akışkan türüne, levha uzunluğuna, levha ve ortam arasındaki sıcaklık farkı gibi parametrelere bağlı olarak türbülans çalkantıları oluşur, sonra türbülanslı sınır tabakaya geçiş başlar. Levha T_s sıcaklığındadır ($T_s > T_\infty$), bu sıcaklık değeri ortam sıcaklığına ulaşana kadar ($T_s = T_\infty$) azalmaya devam eder. Böylelikle ısı sınır tabaka şekillenmiş olur. Levha üzerinde oluşan hız ve ısı sınır tabakaların kalınlığı oldukça küçük olduğundan ölçmek çok zordur. Deneysel ölçme zorluklarına rağmen hidrojen köpüğü, sıcak tel anemometresi, kuvars fiber anemometre, Zehnder Mach interferometre ya da lazer anemometre gibi yöntemler kullanılarak ölçümler yapılabilmektedir. Lazer anemometre, akışı daha az tedirgin etmesi nedeniyle daha çok tercih edilen ölçme yöntemidir.



Şekil 1.1. Düşey bir levha üzerinde doğal taşınım akımlarının şematik görünümü (Kuvvet ve Sarper, 2018).

Yerçekimi alanındaki bir akışkan içinde sıcaklık gradyanının varlığı, kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetleri yenmesi halinde doğal taşınım akımlarına neden olmaktadır. Dolayısı ile bu durumlarda, zorlanmış taşınım daima doğal taşınım eşlik etmektedir. Doğal ve zorlanmış taşınım ısı transfer katsayısı, akışkan hızının kuvvetli bir fonksiyonudur. Yüksek hızlarda doğal taşınım genelde ihmal edilirken düşük hızlarda ihmal edilmesi hatalara neden olabilmektedir. Doğal taşınımın zorlanmış taşınımına göre önemini belirlemek için Richardson sayısından ($Ri = Gr/Re^2$) yararlanılmaktadır. Ri sayısının büyük değerlerinde kaldırma kuvvetleri daha büyük olduğu için doğal taşınım akımları daha baskındır, Ri sayısının küçük değerlerinde ise atalet kuvvetlerinin daha büyük olması nedeniyle zorlanmış taşınım akımları daha baskındır, $0.1 \leq Ri \leq 10$ ise karışık taşınım sözkonusudur ve hem doğal taşınım hem de zorlanmış taşınım etkilerinin birlikte incelenmesini gerektirmektedir (Çengel ve Ghajar, 2015).

Isı transferinin bir göstergesi olan Nusselt sayısı, zorlanmış taşınımında Re ve Pr sayılarının, doğal taşınımında Gr ve Pr sayılarının, karışık taşınımında ise her üçünün de bir fonksiyonudur. Doğal taşınım, kaldırma kuvvetleri ve zorlanmış taşınım hareketlerinin birbirine göre yönlerine bağlı olarak zorlanmış taşınım ile ısı transferini destekleyebilir ya da bozabilir (Çengel ve Ghajar, 2015).

Doğal taşınım ile ısı transferi, enerji verimliliğinin önem kazanmasıyla pek çok bilimsel ve teknolojik alanlarda uygulanan bir yöntemdir. Ancak günümüzde ısıtma ve soğutma uygulamalarında yalnız doğal taşınımın kullanılması, ısı transferinde yetersiz kalmakta ve doğal taşınım ile birlikte ısı transferini artıran alternatif yöntemler üzerinde durulmaktadır. Bu yöntemlerden biri salınımlı akışlardır ve daha yüksek ısı ve kütle transferine neden olduğu için pek çok mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, durgun bir akışkan içerisinde, sabit bir Ra sayısında, periyodik salınımlı, düşey düz bir yüzey üzerinde gerçekleşen karışık taşınım ile ısı transferi incelenmiştir. Bu araştırma, laboratuvar ortamında oluşturulan deney sistemi üzerinde yapılan ölçümler ve bu girdiler esas alınarak oluşturulan sayısal model vasıtasıyla hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, olayı etkileyen fiziksel parametrelere bağlı olarak boyutsuz sayılarla ifade edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Düz Yüzeylerde Taşınım İle Isı Transferi

Pek çok mühendislik uygulamalarında karşılaşılan, düz yüzeyler üzerinde gerçekleşen dış akışlar, ısı transferi uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu uygulamalarda akış hızlarının yüksek olması nedeniyle daha çok zorlanmış taşınım etkileri incelenmiştir (Lin ve Haung, 1994; Aziz, 2009; Çetin, 2013; Akçay, 2015). Akdag vd., (2013) sentetik jet uyarıcı kullanılarak sabit ısı akısına sahip düz bir yüzey üzerindeki zorlanmış taşınım ile ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir.

Karışık taşınımın incelendiği araştırmalar ise uzun süre önce başlamış ancak 1970 yılının sonundan itibaren hız kazanmıştır ve bu araştırmalarda, laminar zorlanmış taşınımında doğal taşınım etkilerinin ısı transferini önemli derecede iyileştirdiği belirtilmiştir (Lloyd ve Sparrow, 1970; Incropera, 1988). Elektronik endüstrisindeki hızlı büyüme ile elektronik cihazların daha minyatür hale gelmesi sonucu hacim başına üretilen ısı miktarı artmış ve bu durum daha güvenilir ve verimli soğutma sistemine olan ihtiyacı artırmıştır. Elektronik cihazlar tarafından üretilen ısı, ısı atıcısı tarafından uzaklaştırılması gerekmektedir. Aksi durumda cihazların bileşimindeki lehim bağlantıları, yüksek ısı gerilmelere maruz kalarak devre kartlarının işlevine engel olacaktır. Bu nedenle, elektronik cihazların tasarım ve çalışmasında en önemli faktör, ısı kontrolünün sağlanmasıdır. Elektronik cihazların soğutulmasında doğal ve zorlanmış taşınım uygulamalarından yararlanılır. Kaldırma kuvvetleri akış üzerinde önemli etkiye sahiptir ve özellikle düşük hızlarda her iki taşınım uygulamasının birlikte gerçekleşmesi karışık taşınım olarak adlandırılmaktadır. Karışık taşınımı ifade eden en önemli boyutsuz sayı, Richardson sayısıdır ve zorlanmış taşınım üzerinde kaldırma kuvvetlerinin etkilerini ifade etmektedir (Taji vd., 2014).

Karışık taşınım, fanlar tarafından soğutulan elektronik cihazlar, acil durum kapanması sırasında soğutulan nükleer reaktörler, düşük hız ortamına yerleştirilen ısı eşanjörü gibi pek çok teknik ve endüstriyel uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Literatürde, karışık taşınım ile ısı transferini konu alan pek çok araştırma mevcuttur

(Chen ve Armaly, 1987; Chen, 1998; Saeid, 2005; Shing ve Roy, 2008; Swant ve Rao, 2010; Kitamura ve Mitsuishi, 2010; Sun vd., 2012; Abdelmassih vd., 2016).

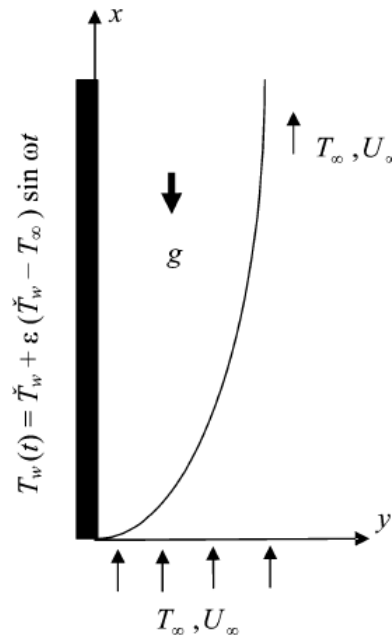
2.2 Düşey Yüzeylerde Taşınım İle Isı Transferi

Isıtılmış yüzeyler üzerindeki ısı transferi incelemelerinde, akış yatay olduğu durumda kaldırma kuvvetleri genelde ihmal edilmektedir, ancak düşey veya eğimli yüzeylerde kaldırma kuvvetleri, akış alanı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olmaktadır. Dolayısıyla, kaldırma kuvvetlerinin dikey veya eğimli yüzeyler üzerindeki etkisini ihmal etmek mümkün değildir. Sabit sıcaklık veya ısı akısına sahip düşey yönde düz levha üzerinde gerçekleşen taşınım olayları, endüstrideki ısı transfer cihazlarının çoğunda yaygın olarak görülmesi nedeniyle bu levhalar üzerindeki kütle ve ısı transferi olguları da önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Doğal taşınım zorlanmış taşınımın eşlik etmesi halinde karışık taşınım durumu ortaya çıkmaktadır. Zorlanmış kuvvetlerin yönüne bağlı olarak kaldırma kuvvetleri ısı transfer oranını iyileştirebilir ya da kötüleştirebilir. Dolayısı ile doğal taşınım veya zorlanmış taşınımı iyileştiren pasif veya aktif tüm ısı transferi uygulamaları, karışık taşınımı dolayısı ile ısı transferini de iyileştirebilmektedir. Yüzey alanını artırmak için kanatçıkların kullanılması, akış içerisine çeşitli türbülatorlerin eklenmesi, elektrik veya manyetik alan uygulamaları, temel akışkana nano boyutlu partiküllerin ilave edilmesi, süper kritik şartlarda temel akışkanın kullanılması, iş yapan akışkanın titreşimi veya sürekli hareketli levhaların kullanılması doğal ve zorlanmış taşınım ile ısı transferini iyileştiren uygulamalar arasındadır (Churchill ve Chu, 1975; Chida ve Katto, 1976; Ingham, 1986; Cortell, 2007; Zhang, 2008; Olanrewaju ve Makinde, 2011; Bachok vd., 2010; Doğan ve Sivrioğlu, 2012; Subhashini ve Sumathi, 2014; Seth vd., 2016).

Düşey yönde düz bir levha üzerinde karışık taşınım teorisi, farklı sınır şartlar kullanılarak pek çok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Literatürde düşey düz bir levha üzerinde kaldırma kuvvetlerinin zorlanmış taşınım etkilerini inceleyen ilk çalışma Sparrow vd., (1959) tarafından ele alınmıştır. Daha sonra pek çok araştırmacı sabit yüzey sıcaklığı (Merkin, 1969) ve sabit ısı akısı (Wilks, 1974; Andreozzi vd., 2008; Ishak vd., 2009) şartlarında düşey levha üzerindeki yardımcı ve karşıt akışlar için karışık taşınım ile ısı transferini incelemişlerdir. Düşey levha

üzerinden karışık taşınımında, akışkan olarak havanın kullanıldığı ilk deneysel çalışma farklı Richardson sayıları için Gryzagoridis, (1975) tarafından incelenmiştir.

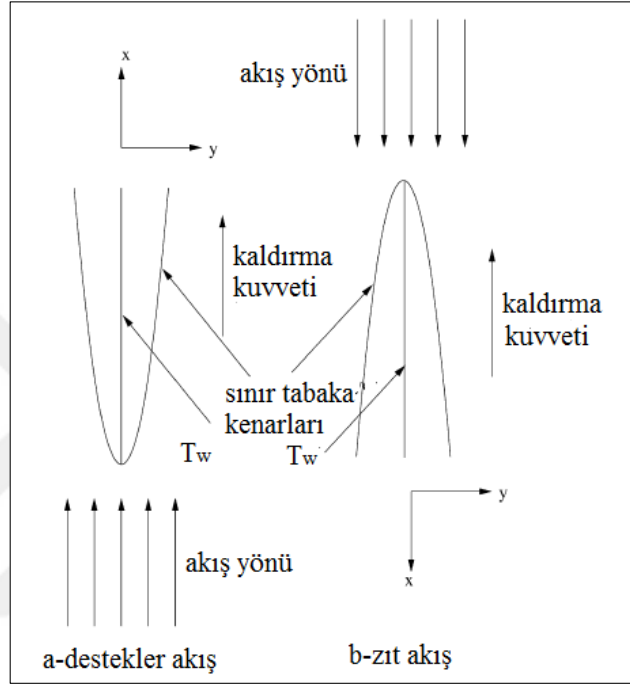
Saeid (2005) düşey bir levhadan zamana bağlı karışık taşınım üzerinde, yüzey sıcaklıklarının periyodik salınımlarının etkisini kapalı (implicit) sonlu fark metodu ile incelemiştir (Şekil 2.1). Düşey levhada, sıcaklığın farklı genlik ve frekanslarında yardımcı ve zıt yöndeki akışın her ikisi için ısı transferini ve sürtünme katsayısını laminar akış rejiminde, $Pr=0.72$ ve $Pr=7.0$ değerleri için araştırmıştır. Sayısal sonuçlar ile sabit Pr ve Ri sayıları için yüzey sıcaklık salınımlarının genliğinin veya frekansının artması ile çevrim ortalama Nu sayısının azaldığını bildirmiştir. Sürtünme katsayısının çevrim ortalama değerinin ise çalışılan tüm durumlar için sabit bulunduğunu ve salınımin olmadığı yüzey sıcaklığı için elde edilen değere eşit olduğunu bildirmiştir.



Şekil 2.1. Düşey bir levha üzerinde karışık taşınım uygulamaları (Saeid, 2005).

Aydın ve Kaya, (2007) sayısal çalışmalarında, düşey düz bir levha üzerinde hem kaldırmayı destekleyen hem de zıt yönlü durum için sürekli laminar akışta, karışık taşınım ile ısı transferinde viskoz dağılımın etkilerini incelemişlerdir. Kısmi diferansiyel denklemleri sonlu fark metodu kullanılarak çözmüşler, hız ve sıcaklık alanları üzerinde Richardson, Eckert ve Prandtl sayılarının etkilerini araştırarak bu parametrelere bağlı Nusselt sayısı için bir korelasyon önermişlerdir.

Venkatasubbaiah ve Sengupta, (2009) levha yüzey sıcaklığının serbest akış sıcaklığından daha yüksek olduğu düşey düz bir levha üzerinde gerçekleşen karışık taşınımın stabilitesini, Compound Matrix Method (CMM) ve Direct Numerical Simulation (DNS) yöntemi kullanarak incelemişlerdir (Şekil 2.2). Farklı Re ve Ri sayılarında $Pr=0.7$ değerinde, kaldırma kuvvetlerini destekleyen ve zıt yöndeki akış için çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.



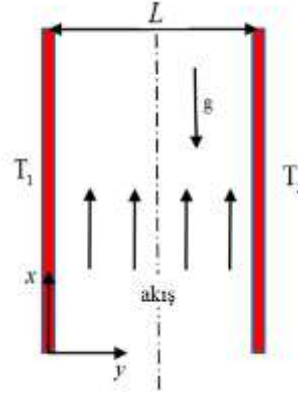
Şekil 2.2. Düşey bir levha üzerinde gerçekleşen karışık taşınım uygulamaları (Venkatasubbaiah ve Sengupta, 2009).

Rana ve Bhargava, (2011) düşey bir levha üzerinde sürekli, sıkıştırılamaz nanoakışkanlar için karışık taşınım laminar sınır tabaka akışını, ısı kaynağı ve ısı atıcı sıcaklığına bağlı olarak sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Çalışmalarında, su tabanlı Ag, Cu, CuO, Al_2O_3 ve TiO_2 nanoakışkanlar için küresel ve silindirik şekle sahip nanopartiküller ile % 4'e kadar değişen hacim oranlarındaki bu parametrelerin kaldırma parametresine etkilerini analiz etmişlerdir. Saf su için Ri sayısının artması ile momentum sınır tabakanın arttığını ve ısı sınır tabakanın azaldığını aynı zamanda yerel yüzey sürtünmesini ve yerel Nu sayısını artırdığını bildirmişlerdir. Saf su ile karşılaştırıldığında, su tabanlı nanoakışkanların kullanılması ile ısı transferinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Düşey bir levha için en yüksek soğutma performansının Ag nanopartiküller ile en düşük soğutma performansının ise TiO_2 nanopartiküller ile elde edildiğini, küresel şekilli

nanopartiküller ile karşılaştırıldığında silindirik şekilli nanopartiküllerin kullanılması ile daha yüksek ısı transferi iyileşmesi sağlandığını bildirmişlerdir.

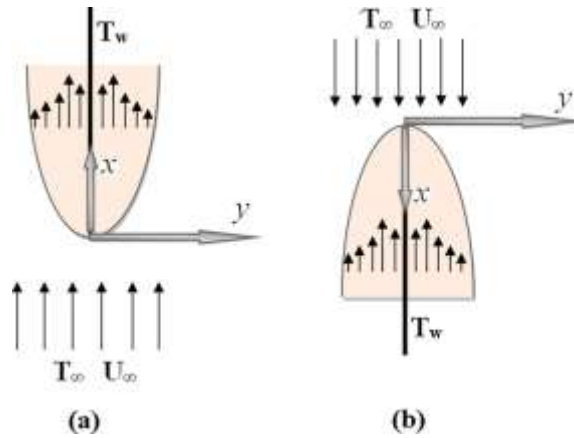
Taji vd., (2014), ısıtılmış yatay dikdörtgen kanatçık dizileri üzerinden ısı dağılım oranını iyileştirmek amacıyla karışık taşınım ile ısı transferini, Ra sayısının, Re sayısının ve Ri sayısının geniş bir aralığında, farklı kanatçık mesafeleri ve farklı ısı akıları için deneysel olarak incelemişlerdir. Karışık taşınımın kaldırma destekler yöndeki sonuçları, farklı Ri sayıları ve ısı girişleri için doğal taşınım sonuçları ile karşılaştırılmış ve çok düşük enerji girişinde (0.3-0.65 W) ortalama ısı transfer katsayısının % 69.46 oranında iyileştiğini bildirmişlerdir. Ayrıca çalışmaların sonucunda Re sayısı, Gr sayısı ve geometrik parametrelere bağlı olarak ortalama Nu sayısı ile ilgili deneysel bir bağlantı geliştirmişlerdir.

Chen vd., (2014) iki düz levha arasındaki düşey bir kanalda Al_2O_3 -su nanoakışkanın karışık taşınım akışının entropi üretimi ve ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir (Şekil 2.3). Çalışmalarda Brinkman sayısı, karışık taşınım boyutsuz parametresi ve nanopartikül hacim oranının hız dağılımı, sıcaklık dağılımı, Nu sayısı ve entropi üretimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kanal içindeki hız ve sıcaklık alanlarını, Diferansiyel Dönüşüm Metodu (DTM) kullanarak hesaplamışlar ve bu metod ile sıcak ve soğuk duvarlar üzerinde Nusselt sayısı için elde edilen sonuçların literatürde verilen analitik sonuçlar ile iyi bir uyum içinde olduğunu ifade etmişlerdir. Al_2O_3 nanoakışkanın, ısıl genleşme katsayısının saf sudan daha az olduğunu, bu nedenle nanoakışkanlar üzerine etki eden kaldırma kuvvetini azalttığını belirterek, bu durumdan dolayı saf suya göre boyutsuz hızın daha düşük ve daha üniform olduğunu ortaya koymuşlardır. Daha düşük Brinkman sayısında, sıcak duvar üzerinde nanoakışkanlar için hesaplanan yerel Nusselt sayısının, saf suya göre daha yüksek olduğunu ve partikül hacim oranında artma ile arttığını ifade etmişlerdir. Ancak Brinkman sayısının daha yüksek değerlerinde soğuk duvar üzerinde nanoakışkanlar için hesaplanan Nu sayısının saf suya göre daha düşük olduğunu, nanoakışkanların ortalama entropi üretiminin saf sudan daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 2.3. Düşey bir levha üzerinde karışık taşınım uygulamaları (Chen vd., 2014).

Khonakdar ve Raveshi, (2016) süper kritik akışkan kullanarak sabit yüzey sıcaklığına sahip düşey düz bir levha üzerinde, aynı ve zıt yönlü akış için karışık taşınım ile ısı transferini laminar rejimde sayısal olarak incelemişlerdir (Şekil 2.4). Süper kritik akışkanlarda ısıl genleşme katsayısının tahmini için Peng–Robinson, modifiye Soave, Beattie–Bridgman and Virial eşitlikleri olmak üzere dört farklı eşitlik kullanmışlar, ısıl genleşme katsayısı ve Nu sayısı için elde ettikleri sonuçları diğer deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Karışık taşınım için korunum denklemlerini sonlu fark metodu kullanarak çözmüşler ve Ri sayısına bağlı olarak Nu sayısının değişimini grafik olarak sunmuşlardır. Bu grafiklerden, su ve CO₂ için süper kritik akışkanların genel davranışının benzer olduğunu gözlemlemişlerdir. Üniform zorlanmış akış hızının artması ile Ri sayısı azaldığında, destekler yönündeki karışık taşınım için ısıl sınır tabakanın kalınlığının düştüğünü, ısı transferi katsayısının ve Nu sayısının arttığını bildirmişlerdir.



Şekil 2.4. Düşey bir levha üzerinde karışık taşınım uygulaması, a- destekler akış, b- zıt akış (Khonakdar ve Raveshi, 2016).

Nithyadevi vd., (2017) Cu-su nanoakışkan ile dolu, gözenekli dikdörtgen bir muhafaza içinde, karışık taşınım ısı transferine eğim açısının etkilerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, muhafazanın dikey duvarlarının sinüzoidal olarak ısıtıldığı, yatay duvarların adyabatik olarak kabul edildiği ve ısıtılmış orta yatay duvarın ise hareketli duvardan oluştuğu bildirilmiştir. Lineer olmayan temel diferansiyel denklemleri kontrol hacim metodu ile ayrıklaştırmışlar, farklı, Darcy sayısı, eğim açısı, nanopartikül hacim oranı ve ortamın porozitesi için analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonunda, muhafazanın eğim özelliklerinin, gözenekli ortam içinde bakır nanopartiküllerin varlığının ve muhafazanın ortasına hareketli duvar yerleştirilmesinin ısı transferi oranını arttırdığını göstermişlerdir.

Yamala ve Rao, (2017) çok sayıda özdeş olmayan, gömme montajlı, ayrı ısı kaynakları ile donatılmış, düşey bir elektronik karttan, yüzey radyasyonu ile birleşik karışık taşınımı sayısal olarak incelemişlerdir. Akış ve ısı transferi denklemleri ve ilgili sınır koşulları, Gauss-Seidel iteratif çözüm tekniğiyle birleştirmişler, daha sonra sonlu fark yöntemi kullanarak çözmüşlerdir. Bu çalışma için özel bir bilgisayar kodu yazıldığını belirterek birleşik karışık taşınımın, sıcaklık dağılımı üzerinde Modifiye Richardson sayısı, yüzey geçirgenliği ve ısı iletkenliğinin etkilerini araştırmışlar, maksimum ve ortalama boyutsuz plaka sıcaklıklarının hesaplanması için iki korelasyon geliştirmişlerdir.

2.3 Hareketli Düşey Yüzeylerde Taşınımın ısı Transferi

Düşey yönde, belirli ısı akısı/sıcaklığında, hareketli bir levhanın yüzeyinde kaldırma kuvvetlerinin zorlanmış taşınım etkilerine yardımcı olması ile birlikte gerçekleşen karışık ısı transferinin hangi koşullarda iyileştiği araştırılan konular arasındadır.

Sürekli hareketli yüzeyler diğer bir ifade ile durgun akışkanlar içerisinde hareket eden yüzeyler, üretim proseslerinde pek çok uygulama alanında karşımıza çıkmaktadır. Bu prosesler sıcak haddeleme, tel çekme, metallerin ekstrüzyonu, plastiklerin ve diğer polimerik materyallerin ekstrüzyonu, sürekli döküm, cam elyaf üretimi, kâğıtlar ve tekstillerin bağlanması, tavlama ve temperlenmesi, soğutulması ve/veya kurutulması, Kimyasal Buhar Biriktirme, kompozit malzemelerin imalatı ve kâğıt üretimi gibi sıralanabilir. Isıtılmış hareketli bir yüzeyden ısı ve kütle transferi, bir kalıba çekilen haddeleme tabakası, kâğıt ve tekstil

malzemelerinin soğutulması ve/veya kurutulması, polimerik levhalar, levha cam ve kristal malzemeler gibi imalat prosesleri gibi uygulamalarda malzeme kalıptan veya makaradan çıktığında sıcaklığı çevre sıcaklığından daha yüksektir. Bu sıcaklık, sıcak ekstrüzyonda olduğu gibi harici ısıtma nedeniyle de olabilmektedir. Ayrıca malzemenin plastik deformasyonu ve malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme de sıcaklık artışına neden olabilmektedir. Ortamdaki akışkanın sürüklenmesinden dolayı hareketli yüzeyler üzerinde oluşan sınır tabaka probleminin çözümü, sabit düz bir yüzey üzerinde oluşan klasik sınır tabaka akışından (Blasius akışı) farklıdır (Ericson vd., 1966; Tadmor ve Klein, 1970; Karwe ve Jaluria, 1991; Kang ve Jaluria, 1994; Jaluria, 2003; Fisher, 1976; Jaluria, 2003; Sparrow ve Abraham, 2005; Patil vd., 2012).

Sabit hızlı, sürekli hareketli, düz bir yüzey üzerinde, sürekli sınır tabaka akışının davranışı, ilk kez analitik ve yaklaşık yöntemlerle Sakiadis, (1961a,b) tarafından analiz edilmiştir. Sürekli düz bir yüzey üzerinde hareketli bir akışkanda, sınır tabakanın davranışı ise Blasius (1908) tarafından incelenmiştir. Paralel serbest akımda, hareketli bir yüzey üzerinde sınır tabaka akışının davranışı, pek çok teknolojik ve mühendislik uygulamalarında önemli bir araştırma konusudur. Sürekli yüzeylerin kullanıldığı pratik uygulamalara diğer örnekler olarak soğutma banyosundaki sonsuz metalik bir plakanın soğuması, plastik tabakaların aerodinamik ekstrüzyonu, yoğunlaşma işlemlerinde bir sıvı film boyunca sınır tabaka ve bir boya veya sürekli bir şekilde haddelenmiş polimer levha veya uzun bir ipliğin bir besleme silindiri ve bir sarma rulosu arasındaki hareketi sayılabilir. Sürekli hareketli yüzeyler üzerinde oluşan sınır tabaka içindeki kaldırma etkileri yatay (Chen ve Strobel, 1980; Calmidi ve Mahajan, 1998), düşey (Tsou vd., 1967; Ramachandran vd., 1987; Lin ve Hoh, 1997; Ali ve Al-Yousef, 1998; Fang, 2003; Pantokratoras, 2004; Patil vd., 2009; Subhashini ve Sumathi, 2014; Raju vd., 2016) ve eğik yüzeyler (Strobel ve Chen, 1980; Moutsoglou ve Chen, 1980; Chamkha, 2001; Takhar, 2001; Ali ve Al-Yousef, 2002; Souza vd., 2003) için pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Sürekli hareketli bir yüzey üzerinde sınır tabakadaki akış ve sıcaklık alanlarının analitik ve deneysel incelemesi, Tsou vd., (1967) tarafından yapılmış ve sürekli hareketli yüzey üzerinde, analitik olarak açıklanan bir sınır tabakanın fiziksel olarak gerçekleştirilebilir bir akış olduğu gösterilmiştir.

Chen ve Strobel, (1980) durgun bir akışkan içinde, yatay sürekli hareketli bir düz levhanın, laminar sınır tabakada, ısı ve kütle geçişi üzerinde kaldırma kuvvetlerinin birleşik etkisini analitik olarak incelemişlerdir. Pr sayısı 0.7, Schmidt sayısı 0.6- 2, ısı kaldırma parametresi ($Gr_x/Re_x^{5/2}$) 0-1.0 aralığında, göreceli kaldırma parametresi $N=Gr_{x,c}/Gr_x$, -0.5 ile 2.0 aralığındaki değerler için çözümleri uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda, duvar kayma gerilmesi ile yüzeydeki ısı ve kütle transferi hızının ısı kaldırma kuvvetinin artması ile arttığını gözlemlemişlerdir. Bu artış miktarının kütle difüzyonundan gelen kaldırma kuvveti, ısı kaldırma kuvvetine yardımcı olduğunda daha da arttığını ancak ısı kaldırma kuvvetine zıt yönde olduğunda ise azaldığını belirtmişlerdir. En yüksek kayma gerilmesi ve yüzey ısı transfer oranı, çalışılan en düşük Schmidt sayısında elde edilirken, en yüksek yüzey kütle transfer oranı en yüksek Schmidt sayısında elde edildiğini bildirmişlerdir. Çalışmalarını sabit bir levha için elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlar, sürekli hareket eden bir levhanın, sabit levhadan daha büyük ısı ve kütle transfer oranları sağladığını göstermişlerdir.

Lin ve Shih, (1981) belirli ısı akısı ve belirli yüzey sıcaklığı durumunda “coordinate perturbation metod” kullanarak dikey hareketli bir silindir ve düz levhadan laminar akışta, ısı transferi üzerinde kaldırma etkilerini incelemişler ve kaldırma kuvveti parametresinin artması ile ısı transfer oranının arttığını bildirmişlerdir.

Ingham (1986) sabit bir hızda, sürekli hareketli dikey bir levha üzerinde oluşan doğal taşınım, sınır tabaka akışını tariflemek için adi diferansiyel eşitliklerinin çözümünü gerçekleştirmiş ve sayısal sonuçlar ile kaldırma parametresinin sınırlı aralığındaki değerleri için çözümün var olduğunu göstermiştir.

Yatay, eğimli ve dikey yönde sürekli hareketli levhalarda, sabit duvar sıcaklığı ve sabit ısı akısı sınır şartlarında, kaldırmaya yardımcı ve kaldırmaya zıt yöndeki durumlar için karışık taşınım ile ilgili yaygın korelasyonları içeren bir derleme çalışması Chen ve Armaly, (1987) tarafından sunulmuştur.

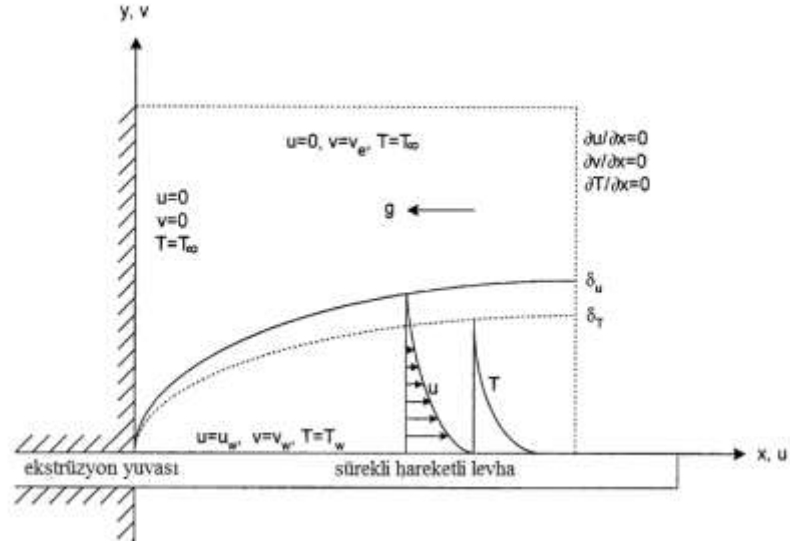
Prasad ve Ramanathan, (1972) ısıtılmış dikey bir levhada, doğal taşınım ısı transferi üzerinde boyuna harmonik salınımların etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, farklı salınım genliği, salınım frekansı ve levha sıcaklığı için sınır tabakada sıcaklık profillerini Mach-Zehnder interferometer ile ölçmüşlerdir. Isı

transferinin salınım parametrelerine bağı olarak arttığını ve en yüksek ısı transferinin % 33 olarak elde edildiğini bildirmişlerdir. Sonuçlarının literatürde yapılan çalışmalar ile iyi bir uyum içinde olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kumari vd., (1996) bir ortam akışkanı içinde, sürekli hareketli dikey bir tabaka üzerinde, zamana bağı doğal taşınım ile ısı transferini sabit yüzey sıcaklığı ve sabit ısı akışı için sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar ile hareketli tabakanın soğutma hızının, kaldırma parametresi ve tabaka hızının artması ile iyileştiğini ayrıca Pr sayısının artması ile Nu sayısının da arttığını göstermişlerdir. Ayrıca en iyi soğutma performansının soğutucu ortamın gazdan ziyade sıvı olduğu zaman elde edildiğini bildirmişlerdir.

Cheng vd., (1997) salınımlı bir silindir üzerinde zorlanmış taşınım ısı transferini deneysel olarak incelemişler ve boyutsuz salınım frekansı, boyutsuz salınım genliği ve Reynolds sayısı gibi parametrelerin etkilerini analiz etmişlerdir. Sonuçta, silindirin salınımının ısı transfer katsayısını önemli ölçüde arttırdığını ve çalışmada göz önünde bulundurulmuş parametre aralıklarında ısı transferinde en fazla % 34 artış olduğunu göstermişlerdir. Ancak salınımın, ısı transferi üzerindeki etkisini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan mevcut bir yaklaşık yöntemin bu çalışmada uygulanabilir olmadığını da bildirmişlerdir.

Al-Sanea (2003) sürekli hareketli düşey bir levhanın ekstrüzyon yuvasına yakın ve yuvanın daha aşağısındaki akış ve ısı transferi karakteristiklerine Prandtl sayısının ve kaldırma kuvvetlerinin etkilerini sürekli, laminar akış şartlarında sayısal olarak incelemiştir. Hız ve sıcaklık değişimlerini sonlu hacimler metodu ile elde etmiş ve Şekil 2.5'te verilen fiziksel şemaya ait çalışmada zorlanmış taşınım, karışık taşınım ve doğal taşınım rejimleri için grafikler elde etmiştir. Elde ettiği sonuçları daha önce yapılan deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmış ve aralarında tam bir uyum olduğunu göstermiştir.

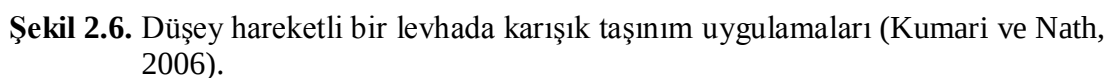


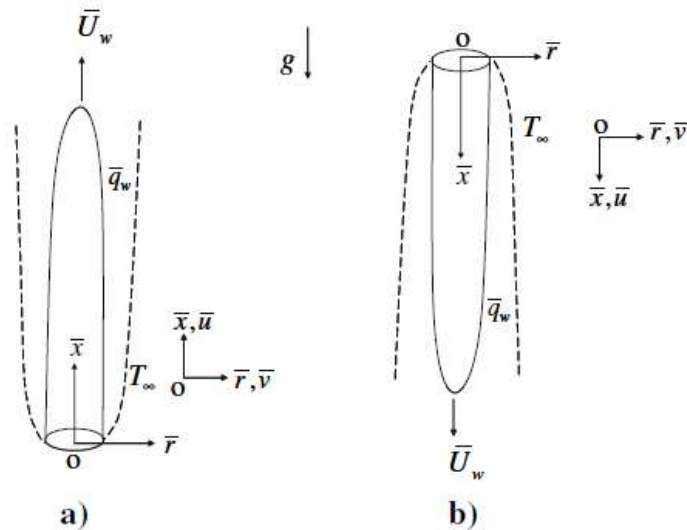
Şekil 2.5. Sürekli hareketli bir levha üzerinde karışık taşınım uygulamaları (Al-Sanea, 2003).

Al-Sanea (2004) bir diğer sayısal çalışmada ise sürekli hareketli düşey bir levha boyunca, laminar karışık taşınım ısı transferi üzerinde Prandtl sayısı ve kaldırma kuvveti parametrelerine ilave olarak emme/enjeksiyon parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Karışık taşınım bölgesinde kaldırma etkilerinin artması ile ısı transfer hızının arttığını, haddeleme yuvasından uzaktaki akış bölgesinde ve üniform emme durumu için sınır tabaka kalınlığının sabit olduğunu ve ısı transfer hızının, taşınım türünden bağımsız olarak sabit bir asimptotik emme değerine ulaştığını bildirmiştir.

Chamkha vd., (2004) ısıtılmış dikey bir levha üzerinde, karışık taşınım akışı için manyetik alan ve kaldırma kuvvetleri üzerinde yerel ısıtma/soğutma ve emme/enjeksiyon durumunu sayısal olarak incelemişlerdir. Problemin matematik formülasyonunda, levhanın yerel ısıtma veya soğutma durumunda, sonlu bir süreksizlik meydana geldiğini ve bu durumun problemin karmaşıklığını artırdığını bildirmişlerdir. Bu karmaşıklığı önlemek için levhanın sonlu bölümlerinde, duvar sıcaklığının üniform olmayan dağılımlarını almışlardır. Lineer olmayan birleşik parabolik kısmi diferansiyel eşitlikleri implicit sonlu fark şeması kullanarak çözmüşlerdir. Lokal ısıtma veya soğutmanın, ısı transferi üzerinde önemli etkisi bulunurken, yüzey sürtünmesi üzerinde daha az etkisi bulunduğunu, kaldırma, manyetik ve emme parametrelerinin ısı transferi ve yüzey sürtünmesini artırdığını ve belli bir değerden sonra pozitif kaldırma kuvvetinin hız profillerinde aşırı yükselmeye neden olduğunu belirtmişlerdir.

Kumari ve Nath, (2006) ortam sıvısı içinde, sabit bir hızla hareket eden, düşey yönde, ısıtılmış sonlu kalınlığa sahip bir levha üzerinde non-Newtoniyen power-law akışkanın karışık taşınım ve iletimle birleşik ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir (Şekil 2.6). Non-Newtoniyen parametreler, kaldırma kuvveti, Pr sayısı ve Peclet sayısına bağlı olarak yüzeydeki ısı transferini araştırmışlardır. Sonuçta, levha boyunca artan mesafelerde ısı transferinin azaldığını, kaldırma parametreleri ile yüzey sürtünme katsayısının arttığını bildirmişlerdir. Isı transferinin kaldırma kuvveti, Pr sayısı ve Pe sayısı ile arttığını belirtmişlerdir.

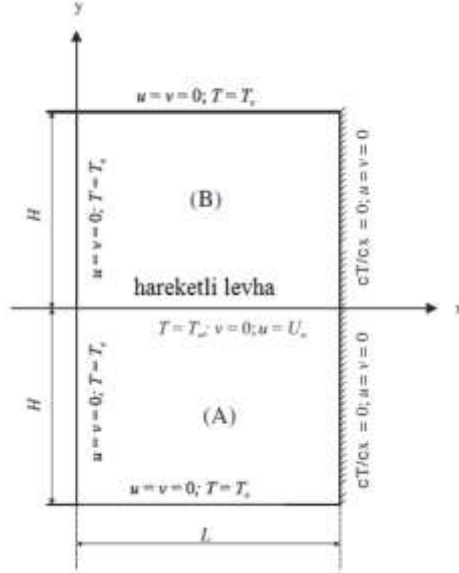




Şekil 2.7. Düşey hareketli bir yüzeyde karışık taşınım uygulaması a- destek akış, b- zıt akış (Ahmad vd., 2008).

Waheed (2009) dikdörtgen muhafaza içinde kaldırma kuvveti ve mekanik olarak tahrik edilen kapağın birlikte etkisi ile indüklenen karışık taşınım ile akış ve ısı transferini sonlu fark metodu ile incelemiştir (Şekil 2.8). Muhafazanın sağ düşey duvarının ısı olarak yalıtılmış, diğer duvarların ise ortam sıcaklığında tutulduğunu kabul etmiştir. Isıtılmış üst duvar tarafından indüklenen akış bölgesi ve ısıtılmış alt duvar tarafından indüklenen akış bölgesi olmak üzere iki akış geometrisi incelemiştir. Dikdörtgen muhafazanın ortasında, ısıtılmış hareketli yatay duvar tarafından indüklenen karışık taşınım ile ısı transferini araştırmış ve $Re=500$ sabit değerinde Richardson sayısı, Prandtl sayısı ve geometrik parametrelerin etkisini çalışmıştır. Çalışma sonucunda, Ri sayısının artması ile kapalı muhafaza içindeki

akışkan akışı ve enerji dağılımlarının ve ısıtılmış duvar üzerindeki ısı akısının iyileştiğini gözlemlemiştir. Pr sayısındaki artış ısıtılmış duvar üzerindeki ısı akısını iyileştirirken, en-boy oranındaki artışın tersine etki gösterdiğini bildirmiştir.



Şekil 2.8. Hareketli bir levhada karışık taşınım uygulamaları (Waheed, 2009).

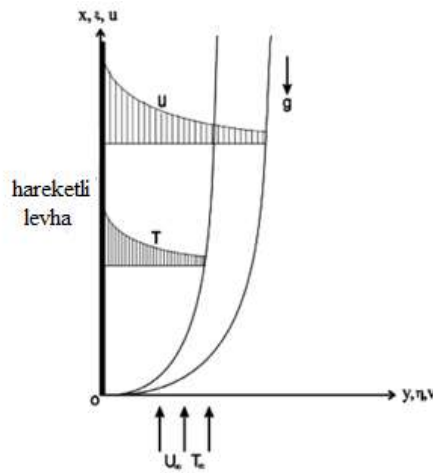
Ishak vd., (2009) paralel üniform serbest akımda, sabit veya hareketli düz levha için genişletilmiş klasik Blasius ve Sakiadis eşitliklerini ele almışlardır. Levhanın sabit ısı akısında ve serbest akım yönü ile aynı veya zıt yönde hareket ettiğini kabul ederek lineer olmayan adi diferansiyel eşitlikleri sonlu fark metodu ile çözmüşlerdir. Temel parametreler olan Prandtl sayısı ve hız oranının yüzey sürtünme katsayısı ve yerel Nu sayısı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Sonuçların, levha ve serbest akış ters yönde hareket ettiğinde ikili çözümlerin var olduğunu belirtmişlerdir.

Patil ve Roy, (2010) paralel serbest akım içinde hareketli düşey bir levhadan ısı üretimi veya absorpsiyonu varlığında, zamana bağlı karışık taşınım akışında ısı yayılım ve kaldırma kuvvetinin birleşik etkisini sayısal olarak inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kararsızlığın, hareketli plaka hızı ve zamana bağlı serbest akım hızı ile ortaya çıktığını bildirmişler, temel sınır tabaka eşitliklerini boyutsuz forma dönüştürerek implicit sonlu fark şeması ile çözmüşlerdir. Sayısal sonuçlar ile yerel sürtünme faktörü ve yerel Nusselt sayısını hesaplamışlar, hız ve sıcaklık profilleri üzerinde karışık taşınım parametrelerinin, Prandtl sayısının, serbest akış hızının kompozit referans hıza oranı ve ısı üretimi veya absorpsiyon parametresinin etkilerini grafiksel olarak göstermişlerdir. Sabit kaldırma kuvvetleri için yüzey

sürtünme katsayısı, Nusselt sayısı ile artarken Prandtl sayısı ile düştüğünü bildirmişler, ayrıca Prandtl sayısındaki artış, ısı sınır tabakanın kalınlığında % 50'nin üzerinde bir azalma sağladığını belirtmişlerdir.

Salem vd., (2010) levha ve ortam akışkanı arasındaki yüksek sıcaklık farkları için hareketli yarı sonsuz düşey bir levhadan power-law akışkanın, MHD karışık taşınım akışı üzerinde sıcaklığa bağlı yoğunluğun etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Akışkan yoğunluğunun sıcaklık ile exponansiyel olarak düştüğünü kabul etmişler, büyük sıcaklık farkları nedeniyle genel Boussinesq yaklaşımlarını dikkate almamışlardır. Hareketli plakanın yüzey sıcaklığının power-law formuna göre değiştiğini, akışkanı küçük manyetik Reynolds sayısının varsayımı üzerine, levhaya düşey olarak uygulanan üniform bir manyetik alanla geçirildiğini kabul etmişlerdir. Birleşik lineer olmayan sınır değer problemini çözmek için dördüncü dereceden Runge-Kutta integrasyon şeması ile bilinmeyen başlangıç şartları için sayısal shooting algoritması kullanmışlardır. Sonuç olarak, yüksek sıcaklık farklarına maruz bırakılmış, Newtonien olmayan bir akışkandaki Boussinesq yaklaşımlarının uygulanmasının, yüzey sürtünme katsayısının değerlerinde önemli bir hata verdiğini ve dış bir manyetik alanın uygulanması bu hatayı belirli bir durumda belirgin bir şekilde azalttığını belirtmişlerdir.

Anilkumar (2011) sürekli hareketli düşey bir levha üzerinde viskoz dağılımın etkilerini de hesaba katarak zamana bağlı laminar karışık taşınım akışının doğal taşınımı destekler ve zıt yönde akışı için sayısal çözümler elde etmiştir (Şekil 2.9).

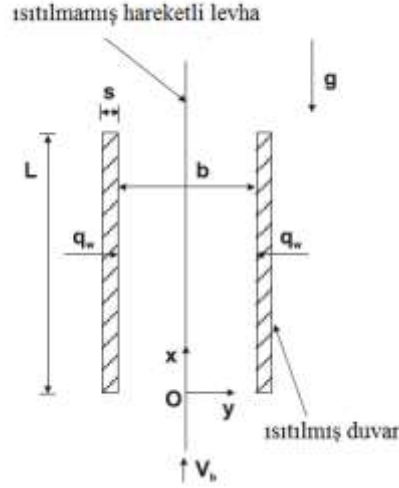


Şekil 2.9. Sürekli hareketli düşey bir levhada karışık taşınım uygulamaları (Anilkumar, 2011).

Serbest akım hızının yanı sıra düşey yöndeki levhanın zamana bağlı hareketi ile kararsızlık ortaya çıktığını belirterek, verilen sınır koşulları ile sınır tabaka denklemlerini önce boyutsuz hale getirmiş ve lineer olmayan kısmi diferansiyel denklem sistemi yarı lineerleştirme tekniği ile implicit sonlu fark metodu ile çözmüştür. Çalışmasının sonunda levha yüzeyindeki ısı transfer hızı ve yüzey sürtünme katsayısı üzerinde, sıcaklık ve hız alanlarına çeşitli parametrelerin etkisini grafik olarak sunmuştur. Sonuçlar ile ısı transferinin ve yüzey sürtünmesinin zamana bağlı serbest akış hız dağılımları tarafından etkilendiğini göstermiştir. Ri sayısının yüzey sürtünme katsayısını ve Nu sayısını iyileştirdiğini bildirmiştir. Kaldırma kuvvetinin varlığında yani $Ri > 0$ olduğunda düşük Pr sayıları için hız profilinin arttığını ve bu durum kaldırma parametresi büyüklüğünü de artırma eğiliminde olduğunu bildirmiştir. Sabit kaldırma kuvveti için Pr sayısı ile Nu sayısının arttığını fakat yüzey sürtünme katsayısının azaldığını belirtmiştir. Gerçekte Pr sayısındaki artmanın, ısı sınır tabakanın kalınlığında belirgin bir azalmaya neden olduğunu belirtmiş ve ısı transferi oranının viskoz dağılımdan kuvvetli bir şekilde etkilendiğini ancak yüzey sürtünmesinin viskoz dağılımdan daha az etkilendiğini belirtmiştir.

Xu ve Pop, (2012) dikey bir kanalda su tabanlı Al_2O_3 , Cu ve TiO_2 nanoakışkanların tam gelişmiş karışık taşınımını araştırarak Rayleigh sayısının değişiminin ve kaldırma parametrelerinin etkilerini analiz etmişlerdir.

Andreozzi vd., (2013) Şekil 2.10'da şematiği verilen dikey bir kanalın orta planına yerleştirilen hareketli bir levha tarafından indüklenen akış ile kaldırma akışı arasındaki etkileşim nedeniyle oluşan karışık taşınımı türbülanslı akış için RNG $k-\epsilon$ modeli kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, ısıtılmamış bir levha, uniform ısı akısında ısıtılmış kanal duvarlarının arasında, kaldırma kuvvetlerinin yönünde sabit bir hızla hareket ettiğini kabul etmişlerdir. $Pr=0.71$ ve $Re=1.32 \times 10^{-4}$ için Ri sayısını ve kanalın en boy oranını değiştirip incelemelerini yapmışlar ve hareketli levha hızının, duvar ısı akısının ve kanal duvarları arasındaki mesafenin akış ve ısı transferine etkilerini analiz etmişlerdir.



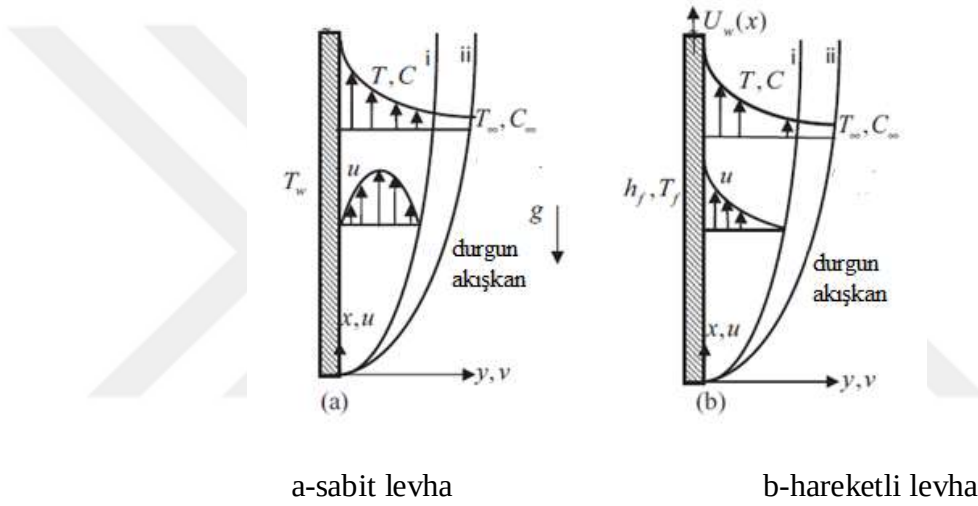
Şekil 2.10. Hareketli bir levhada karışık taşınım uygulamaları (Andreozzi vd., 2013).

El-Aziz (2014) yarı-sonsuz, düşey yönde bir germe tabakası boyunca, zamana bağlı laminer karışık taşınım akışı ve ısı transferi üzerinde viskoz dağılımın etkisini sayısal olarak uygun dönüşüm değişkenleri yardımıyla incelemiştir. Çalışmasında hız ve sıcaklık alanları üzerinde kararsızlık parametresinin, değişken viskozite parametresinin, karışık taşınım parametresinin ve Eckert sayısının etkilerini analiz etmiştir. Problemi shooting method ile 4. Dereceden Runge–Kutta şeması kullanarak çözmüştür. Çalışma sonucunda, karışık taşınım parametresinin artan değerleri ile değişken viskozite ve kararsızlık parametrelerinin tüm değerleri için yerel ısı transfer oranının arttığını bildirmiştir.

Das ve Jana, (2015) üniform enine manyetik alan ve termal radyasyon varlığında, su tabanlı Cu, Al₂O₃ ve TiO₂ nanoakışkanları için hareketli dikey bir plakanın çevresindeki hidromanyetik sınır tabaka akışını incelemişler ve temel denklemleri Laplace dönüşüm tekniğini kullanarak çözmüşlerdir. Sonuç olarak radyasyon parametresindeki bir artışın, sınır tabaka bölgesinde akışkan hızını ve sıcaklığını düşürdüğünü göstermişlerdir. Grashof sayısının ve zamanın artışı ile akışkan hızının ve sıcaklığının arttığını bildirmişlerdir. Levha üzerinde en yüksek ısı transfer hızı ve en düşük kayma gerilmesi Cu-su nanoakışkan için elde edildiğini belirtmişlerdir.

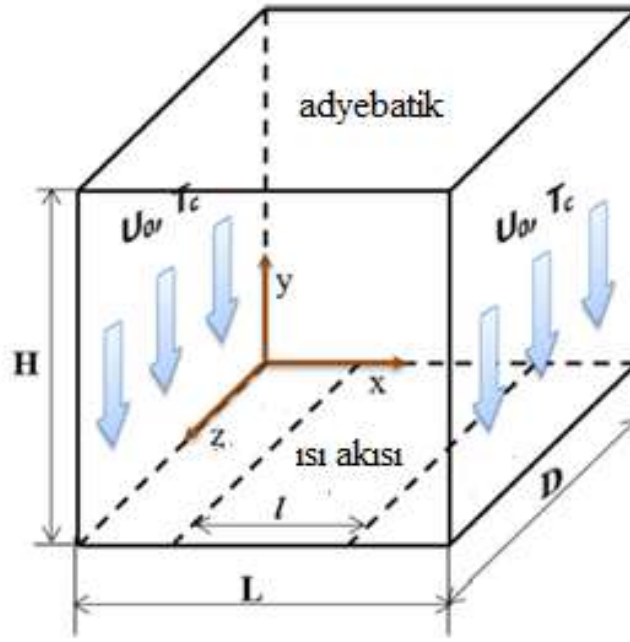
Uddin vd., (2015) ısı taşınım sınır şartlar kullanarak hareketli dikey düz bir levha üzerinde doğal taşınım ile ısı ve kütle transferini sayısal olarak incelemişlerdir (Şekil 2.11). Temel taşınım denklemlerini uygun benzerlik değişkenleri kullanarak birleştirmişler, doğrusal olmayan adi diferansiyel denklem sistemine dönüştürerek

sayısal olarak çözmüşlerdir. Analizlerin, taşınım ısı transferi katsayısının eksenel mesafenin dörtte biri ile ters orantılı olması halinde bir benzerlik çözümünün var olduğunu bildirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonuçlarını literatür çalışmaları ile karşılaştırmışlar ve aralarındaki uyumu göstermişlerdir. Sürtünme faktörü, ısı ve kütle transferi hızları üzerinde taşınım ısı transferi, kaldırma oranı, Prandtl sayısı, Schmidt sayısı ve Rayleigh sayısı gibi parametrelerin etkilerini araştırmışlardır. Kaldırma oranının hızı artırdığını ancak sıcaklık ve konsantrasyonu azalttığını bulmuşlardır. Taşınım ısı transfer parametresi, momentum ve ısıl sınır tabaka kalınlıklarını artırırken, konsantrasyon sınır tabakanın kalınlığını azalttığını belirtmişlerdir.



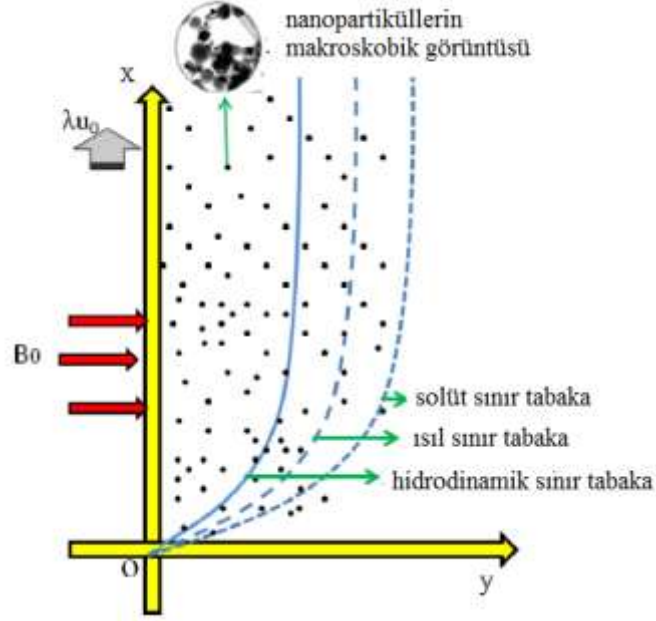
Şekil 2.11. Hareketli bir levhada taşınım uygulamaları (Uddin vd., 2015).

Kareem vd., (2016) aynı düşey yönde hareketli, eş sıcaklığa sahip yan duvarlar ve alt duvarın merkezinde sabit ısı akışı olan kapalı bir kavitede zamana bağlı karışık taşınım ile ısı transferini üç boyutlu sonlu hacim metodu ile incelemişlerdir (Şekil 2.12). Çalışmalarında, geometriyi oluşturan diğer duvarları sabit ve abiyatik kabul etmişler ve belirli Re sayısı aralığı için zamana bağlı Reynolds- Averaged Navier-Stokes (URANS) ve Large Eddy Simulation (LES) olmak üzere iki farklı türbülans modelinin performansını değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, Re sayısının artması ile Nu sayısı ve türbülanslı kinetik enerjinin iyileştiğini, hem LES hem de URANS çözümlerinin her ikisinde de saat yönünde ve saat tersi yönünde iki ana vorteks yapısının görüldüğünü gözlemlemişlerdir. Ancak kavitenin kenarlarında ikincil vorteks yapılarının oluşumunun LES yönteminde daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.12. Hareketli bir levhada karışık taşınım uygulamaları (Kareem vd.,2016).

Mahanthesh vd., (2016) hareketli ve sabit düşey bir levha üzerinde ısı ve kütle transferinin birleşik etkilerini analitik olarak incelemiştir (Şekil 2.13). Çalışmalarında, akışkan olarak elektriksel iletken olan su bazlı Cu nanoakışkan kullanarak uygulanan manyetik alanın, ısı radyasyonunun, iç ısı üretimi ve absorpsiyonu ile kimyasal reaksiyonların etkilerini analiz etmişlerdir. Laplace transform metodu ile korunum denklemleri için birleşik kapalı form çözümler elde etmişlerdir. Bunun için önce temel lineer olmayan kısmi diferansiyel eşitlikleri, Boussinesq yaklaşımı kullanarak türetmişler ve sonra uygun boyutsuz değişkenler ile boyutsuz eşitliklere dönüştürerek analitik olarak çözmüşlerdir. Farklı nanopartikül hacim oranları ile $Pr=6.2$ için yüzey sürtünmesi, Nusselt sayısı ve Sherwood sayısını hesaplamışlardır. Elde edilen analitik çözümlerin uygulanan tüm başlangıç ve sınır koşulları kapsadığını, onların bazı kısıtlayıcı durumlarında bilinen önceki sonuçlara indirgenebildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca nanopartikül hacim oranlarındaki değişim ile akış ve ısı transferi karakteristiklerinin kontrol edilebileceğini bildirmişlerdir.



Şekil 2.13. Hareketli bir levhada karışık taşınım ve kütle transferi uygulamaları (Mahanthesh vd., 2016).

Satish ve Venkatasubbaiah, (2016) dikey bir kanalda hareketli levha kullanarak türbülanslı zorlanmış taşınım akış karakteristikleri üzerinde ısı iletimi, duvar kalınlığı ve Re sayısının etkilerini zamana bağlı, sıkıştırılamaz akışlar için iki boyutlu sayısal olarak incelemişlerdir. Akış için düşük Re sayısında Launder–Sharma’nın k - ϵ türbülans modelini, birleşik ısı transfer çözümleri için sonlu fark şemasını kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda Re sayısının artması ile birlikte ortalama taşınım ısı transferi katsayısının arttığını ve arayüz sıcaklığının ise azaldığını, katı bölgenin kalınlığının artması ile katı ve sıvı bölgede sıcaklığın düştüğünü bildirmişlerdir. Duvar kalınlığı ve ısı iletimi, kanal akışlarındaki taşınım ısı transferi özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiğini, ısıtılmış plaka hızı, katı ve sıvı bölgelerde ısı transferi özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, ortalama taşınım ısı transferi katsayısının hareketli plaka hızının artması ile birlikte arttığını belirtmişlerdir. Bulunan sonuçların literatürde bulunan deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Ramesh vd., (2016) taşınım sınır şartları ile eğimli sabit/hareketli düz bir levhadan geçen akış ve ısı transferi sınır tabaka için matematiksel bir model sunmuşlardır. Çalışmalarında, benzerlik dönüşümü kullanarak temel denklemleri birleştirmişler, üçüncü dereceden lineer olmayan adi diferansiyel denklemlere indirgemişler ve shooting method kullanarak sayısal olarak çözülmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçları

literatürde bulunan sonuçlar ile karşılaştırarak aralarındaki uyumu göstermişlerdir. Akış ve ısı transferi üzerinde levhanın eğim açısının, Pr sayısının, yerel Gr sayısının ve Biot sayısının etkilerini analiz etmişler, sonuçta sabit düz levhanın sıcaklığı hareketli düz levhanın sıcaklığından daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Mohamed vd., (2016) nanoakışkanlarda sabit duvar sıcaklığına sahip hareketli bir levha üzerinde sınır tabaka akışını, viskoz dağılımı da dikkate alarak sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, temel lineer olamayan kısmi diferansiyel eşitlikleri önce benzerlik dönüşümü ile adi diferansiyel eşitlikler sistemine dönüştürmüşler daha sonra dönüştürülen eşitlikleri Keller-box metodu ile çözmüşlerdir. Nu sayısı, Sherwood sayısı ve yüzey sürtünme katsayısı için sayısal çözümler elde etmişlerdir. Çözümlerde akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerinde Pr sayısı, levha hızı, Brownian hareketi ve termoforez parametreleri ile Eckert sayısı ve Lewis sayısının etkilerini analiz etmişlerdir. Sonuç olarak viskoz yayılımının varlığının levha hız parametresinin aralığını azalttığını, termoforez parametrelerin artması ile Sherwood sayısı artarken Brownian hareketi ve termoforez parametrelerinin artması ile Nu sayısının azaldığını bildirmişlerdir.

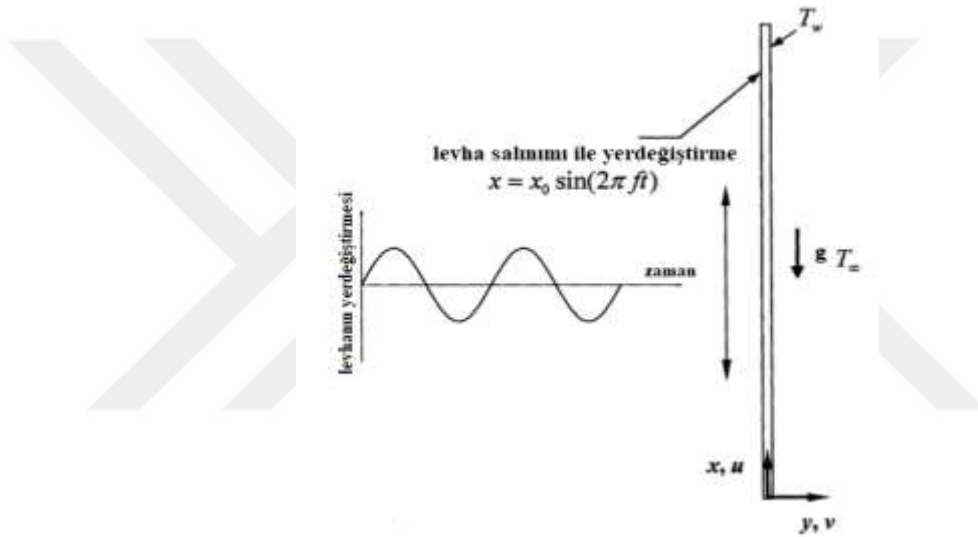
Si vd., (2017) uzatılmış düşey bir levhayı geçen pseudo-plastic power law nanoakışkanın karışık taşınım ile akış ve ısı transferini araştırmışlardır.

Salınlı akışların daha yüksek ısı ve kütle transferine neden olduğu bilinmektedir. Salınım hareketi, ya sabit bir cismin etrafındaki akışkan titreşimi ile ya da herhangi bir akışkan içerisinde katı cismin titreşimi ile elde edilir. Her iki yaklaşımda da aynı hedefe ulaşılmasına rağmen sabit bir cismin etrafındaki akışkan titreşimi için daha fazla enerji gerektirmektedir. Titreşimli akışlar yüksek performanslı kompakt ısı değiştiricileri, pistonlu motorlar, kimyasal reaktörler, pulsatif yakıcılar, yüksek performanslı stirling motorları, kriyojenik soğutma, uzay sanayi, askeri alanlar başta olmak üzere pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. (Kurzweg ve Chen,1988; Revenkar, 2000; Zhang vd., 2004; Akdag, 2010; Li vd., 2014; Khalid vd., 2017; Pradhan vd., 2017; Koffi vd., 2017; Ashafa vd., 2017; Ellahi vd., 2018).

Kim (2000) çapraz bir manyetik alanın varlığında, yarı sonsuz, gözenekli, düşey hareketli bir levhanın çevresinde, viskoz sıkıştırılmaz bir akışkanın hız ve sıcaklık alanlarını iki boyutlu laminar olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, ısı transferinin

Prandtl ve Grashof sayılarından, manyetik ve geçirgenlik parametrelerinden, emme hızı parametresinden, levha hızından etkilendiğini göstermiş ve ayrıca Pr sayısının birçok değeri için, emiş hızı büyüklüğünün artması ile yüzeyde ısı transferinin azaldığını bildirmiştir.

Zhang vd., (2004) yaptıkları sayısal çalışmalarında (Şekil 2.14), periyodik salınımı, ısıtılmış dikey bir levhadan doğal taşınım ile ısı transferini, laminar akış şartlarında incelemişler ve sonuçlarını literatürdeki teorik çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca sabit levha için de ortalama Nu sayısını hesaplamışlar ve levha salınımlarının ısı transferini önemli derecede iyileştirdiğini bildirmişlerdir.



Şekil 2.14. Salınlı düşey bir levhadan doğal taşınım ile ısı transferi uygulamaları (Zhang vd., 2004).

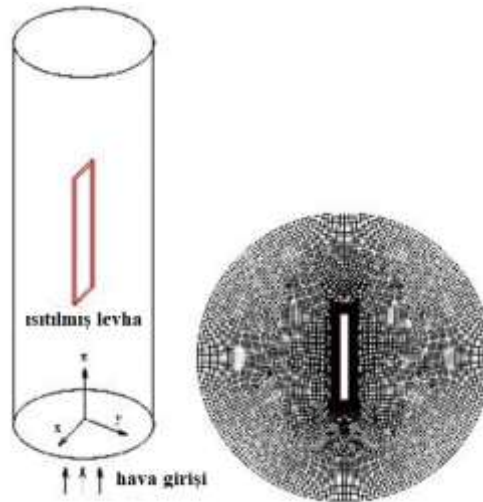
Goma ve Taweel, (2005) sabit sıcaklığa sahip düşey yüzeylerde, doğal ve zorlanmış taşınım sonucu gerçekleşen ısı transferi üzerinde salınımların etkisini analitik olarak incelemişler ve yüzey salınımlarının ısı transferi iyileşmesinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca analitik sonuçları literatürdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve aralarındaki uyumu göstermişlerdir.

Nobari ve Naderan, (2006) farklı salınım frekansı ve genliğine sahip, dairesel bir silindir etrafındaki akışı, iki boyutlu olarak sonlu eleman metodu yardımıyla incelemişlerdir. Akış alanında, cismin hareketini tariflemek için Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE) şeması kullanarak silindir hareketinin çapraz ve düz salınım için iki farklı durumunu araştırmışlardır. Sayısal sonuçların deneysel verilerle karşılaştırması yapılarak, iki boyutlu simülasyonun $Re=300$ değerine kadar

geçerli olduğunu göstermişlerdir. Akış görüntüleme yöntemi ile silindir salınımının akış alanı ve vorteks şekli üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca, ortalama sürtünme katsayısının salınım parametrelerine göre değişimini analiz etmişler ve sonuçları literatürde yer alan deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir.

Muthucumaraswamy ve Vijayalakshmi, (2008) değişken sıcaklık ve kütle difüzyonuna sahip, salınlı sonlu düşey bir levhadan geçen viskoz sıkıştırılmaz bir akış için doğal taşınımı, Laplace dönüşüm tekniği kullanarak analitik olarak çalışmışlar ve faz açısı, Schmidt sayısı, Prandtl sayısı ve zaman gibi farklı parametreler için hız, sıcaklık ve konsantrasyonun etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, faz açısının artması ile hızın arttığını, artan zaman ve azalan Pr sayısı ile sıcaklığın arttığını gözlemlemişler, ayrıca konsantrasyonun zaman ile arttığını ancak Schmidt sayısının artması ile azaldığını bildirmişlerdir.

Li vd., (2016) sabit ısı akısına sahip dikdörtgen düşey düz bir düzlemde ısı transferi ve etrafındaki akışkan akışını laminar pulsatif akış şartlarında sayısal olarak inceleyerek sonuçları deneysel çalışmaları ile karşılaştırmışlar ve her iki sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, pulsatif parametrelerinin akış ve ısı transferini önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir. Düşük pulsatif genliklerde sıcaklık değişimlerinin tek tepe noktası oluşturduğunu, yüksek pulsatif genliklerde ise sıcaklığın çoklu tepe modlarında dalgalandığını göstermişlerdir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Pulsatif akışta düşey bir levhadan ısı transferi uygulamaları (Li vd.,2016).

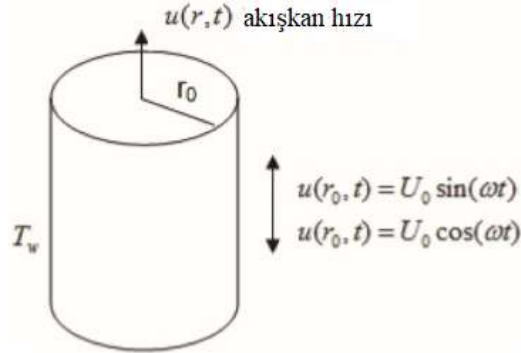
Andreozzi (2018) paralel olmayan, ısıtılmış üst levha ve hareketli alt levha arasındaki akışta meydana gelen karışık taşınım ile ısı transferini ve akış dinamiklerini analiz etmek için sayısal bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında kanal mesafesinin, duvar ısı akısının, hareketli levhanın hızının ve kanal açısının etkilerini iki boyutlu, laminar akış şartlarında inceleyerek sıcaklık ve akım fonksiyon alanlarını elde etmiştir.

Kataria ve Patel, (2018) yaptıkları çalışma ile gözenekli bir ortam içerisinde bulunan salınlı dikey levha üzerinden zamana bağlı doğal taşınımın üniform MHD alanındaki Casson akışkan akışının ısı ve kütle transferine etkilerini hem Laplace transform yöntemini kullanarak analitik olarak hem de Matlab yazılımı ile sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda, sürtünme faktörü, Nu sayısı ve Sherwood sayılarını elde ederek, ısı ve kütle transferini detaylı olarak incelemiştir. Schmidt sayısı ve Pr sayısının artması ile akışkan hızının düştüğünü, Gr sayısının artması ile hızın arttığını, Pr sayısının artması ile sıcaklığın düştüğünü ayrıca Pr sayısı ve zaman ile Nu sayısının azalma eğiliminde olduğunu bildirmişler, sonuçları grafik halinde sunmuşlardır.

Krishna ve Jyothi, (2018) gözenekli bir ortam içerisinde bulunan, salınlı levhanın üniform manyetik alanın etkisi altında ısı ve kütle transferini teorik olarak incelemiştir. Sonuç olarak salınlı frekansı nedeniyle akış alanında ters akış etkilerinin gözlemlendiğini, ısı Gr sayısının artması ile akış alanının hızının düştüğünü, Pr sayısının artması ile ısı sınır tabaka kalınlığının azaldığını bildirmişlerdir.

Khan vd., (2018) yaptıkları analitik çalışmada, tam çözümler için Laplace ve sonlu Hankel dönüşümlerini uygulayarak düşey yönde salınlı bir silindirde doğal taşınım sonucu gerçekleşen ısı transferini incelemiştir (Şekil 2.16). Silindirin kosinüs ve sinüs salınımlarına karşılık gelen hız ve sıcaklık dağılımlarını elde etmişlerdir. Sayısal hesaplamalar ve grafik çizimler ile çeşitli zamanlar için Prandtl ve Grashof sayılarının, hız ve sıcaklık dağılımları üzerindeki etkilerini göstermişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, Pr sayısının artması ile sıcaklık değerlerinin düştüğünü ve Nu sayısının arttığını bildirmişlerdir. Zamanın çok küçük değerleri için taşınım ile ısı transferi baskın iken, zamanın büyük değerleri için iletim yoluyla ısı transferinin

daha baskın olduğunu, ayrıca akışkan hızının Gr sayısı ile arttığını, Pr sayısı ile azaldığını bildirmişlerdir.



Şekil 2.16. Salınlı düşey bir silinde doğal taşınım ile ısı transferi uygulamaları (Khan vd., 2018).

Patil vd., (2018) serbest akışa paralel olarak yukarı yönde hareket eden, ısıtılmış düşey bir levhadan karışık taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmalarında, Richardson sayısının, hız oranı parametrelerinin, kaldırma parametreleri oranlarının ve Schmidt sayılarının etkileri analiz etmişlerdir.

Shah vd., (2019) gözenekli bir ortamda bulunan, hareketli düşey levha üzerindeki doğal taşınım akışlarının ısı hafızalı MHD yapısını incelemişlerdir. Akışkan sıcaklığı, Nu sayısı, hız alanı ve yüzey sürtünme değerleri için tam çözümleri Laplace dönüşüm yöntemi kullanarak elde edilmişlerdir. Sonuç olarak, belirli konsantrasyonlarda Schmidt sayısının ve kaldırma parametresi oranlarının artması ile sınır tabaka kalınlığının azaldığını bildirmişlerdir.

Khan vd., (2019) gözenekli bir ortamda bulunan hareketli bir levhada MHD doğal taşınım akışı üzerinde, ısı üretimi ve kimyasal reaksiyonun etkisini ısı radyasyonu da dahil ederek kesin çözümleri Laplace dönüşüm yöntemi ile incelemişlerdir. Sıcaklık ve yoğunluk farkı nedeniyle oluşan kaldırma kuvvetlerinin doğal taşınım akımlarını oluşturduğunu bildirmişler ve bu durumda manyetik alanın akışkana ve levhaya göre sabitlendiğinde bağlı davranışını araştırmışlardır. Elde ettikleri kesin çözümleri, Mathcad yazılımı kullanarak grafik olarak sunmuşlar ve Sherwood sayısını, yüzey sürtünmesini ve Nu sayısını sayısal olarak hesaplamışlar ve sonuçları tartışmışlardır.

Arif ve Hasan, (2019) yaptıkları sayısal çalışma ile Boussinesq olmayan bir akış modeli tarafından yönetilen, ısıtılmış bir kare silindirden geçeniki boyutlu karışık taşınım hava akışı üzerindeki karakteristik sayısal sınır koşullarının performansını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında iki karakteristik sınır koşulu ele almışlar, ilk sınır koşulunu tüm sınır boyunca, diğer sınır koşulunu uzak sınırın bir kısmında kullanmışlardır. İlk sınır koşulunun uzak sınırdan sahte dalga yansımaları ve sayısal parazit oluşturduğunu, diğer sınır koşulunun bu sayısal artefaktları ortadan kaldırdığını ve akış fiziğini daha doğru şekilde yakaladığını göstermişlerdir.

Sarhan vd., (2019) yatay ve değişik açılardaki dikdörtgen bir levhanın doğal taşınım şartlarında ısı transferi üzerindeki salınımın etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Rayleigh sayısı ve kinetik Reynolds sayısının ortalama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkilerini de analiz etmişlerdir. Sabit ısı akısı altındaki alüminyum levha, düşey düzlemde sinüsoidal salınıma maruz bırakılmış vesalınım genliği, 1.5 ila 7.5 mm arasında ve salınım frekansı 0 ila 16 Hz arasında değiştirilerek deneylerini yapmışlardır. Deneylerin sonuçlarına göre, ortalama ısı transfer katsayısının, levhanın farklı oryantasyon açıları için artan Rayleigh sayısı ile doğrusal olarak arttığını gözlemlemişler ve levha yatay olduğunda ortalama ısı transfer katsayısının çok daha yüksek olduğunu, levhanın oryantasyon açısı arttıkça azaldığını bildirmişlerdir. Levhanın düşey pozisyonundaki ortalama ısı transfer katsayısının, yatay pozisyonundaki ortalama ısı transfer katsayısından düşük olduğunu da göstermişlerdir. Ayrıca, salınım frekansındaki artışın, ortalama ısı transfer katsayısında bir artışa yol açtığı ve maksimum artışın, yatay konumda ve daha yüksek frekanslarda elde edildiğini bulmuşlardır. Bununla birlikte, ortalama ısı transfer katsayısının levha düşey pozisyonunda iken salınım frekansının artması ile azaldığını bildirmişlerdir.

Ghiasi vd., (2019) yaptıkları sayısal çalışma ile laminar sıkıştırılamaz akış ve bağlı döner salınımlı dairesel silindirden tutturulmuş bir ayırma plakası ile ısı transferini incelenmişlerdir. Aktif ve pasif yöntemlerin eşzamanlı kullanımının akış ve sıcaklık alanları üzerindeki etkisini araştırmayı ve optimum ısı transfer artışına neden olacak durumu bulmayı amaçlamışlardır. Çözüm yönteminde, Navier-Stokes denklemlerinin sonlu hacim ayrıklaştırmasından yararlanarak silindir salınımını modellemek için dinamik ağ yapısı çözücüyle, Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formülasyonunu

birleştirmişlerdir. Parametrik çalışmalarında salınım frekansı, ayırıcı plaka uzunluğu ve Reynolds sayısını değiştirerek bu parametrelerin akış ve ısı transferine etkilerini incelemişlerdir. Farklı frekanslarda salınımın komplike olduğunu, daha yüksek frekanslarda daha fazla ısı transferi sağlandığını, ancak ayırıcı bölgede, sürtünme katsayısının çok fazla arttığını bildirmişlerdir. Salınım ve ayırıcı plakanın eşzamanlı kullanımının, sürtünmenin azaltılması ve ısı transferi artışında hem olumlu hem de olumsuz etkilere sahip olabileceğini gözlemlemişlerdir.

Patel (2019) döner bir sistemde, salınımlı dikey bir plakadan, Casson akışkanının doğal taşınım MHD akışını incelemiştir. Termal radyasyonun, ısı üretiminin, Hall akımının ve kimyasal reaksiyonun özelliklerini analiz etmiştir. Boyutsuz denklemleri, Laplace dönüşümü tekniği kullanarak çözmüş, hız, sıcaklık ve konsantrasyon profillerini elde etmiştir. Çalışmasının sonucunda elde edilen sonuçları tablo halinde sunmuştur.

Lee vd., (2019) kare şeklinde kapalı bir muhafaza içerisindeki dönen düz bir levhadan ve ısı kaldırma kuvvetlerinden meydana gelen karışık taşınım ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Hesaplamalarını, Prandtl sayısını sabit kabul ederek ($Pr=0.71$) farklı Rayleigh sayısı ve rotasyonel Reynolds sayısı için gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta, ısı transferi için kritik bir Rayleigh sayısı olduğunu ve bu değer altında ısı transferinin iyileştiğini, üzerinde ise baskılandığını bildirmişlerdir. Ra sayısının eşik değeri aştığında termal salınım meydana geldiğini ve termal salınım frekansının, Ra sayısına, rotor uzunluğuna ve rotorun dönme hızına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıda belirtilen literatür çalışmalarında, genellikle düşey yönde hareketli düz bir levhada karışık taşınım ısı transferinin, düşey yönde sabit düz levhaya göre daha yüksek olduğu bildirilmiş olmakla birlikte aksi yönde görüşlerin de mevcut olduğu belirtilmiştir (Ghiasi vd., 2019). Salınımlı akışlar ve salınımlı yüzeyler ile ilgili literatürde çeşitli araştırmalar yapılmıştır ancak bu çalışmalarda salınım hareketinin karmaşık yapısı nedeniyle ısı ve akış dinamiği metodolojisinin tam anlaşılamadığı görülmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, daha çok analitik ve sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. Deneysel çalışmaların sayısı ise oldukça azdır. Ayrıca akışkan türü, akış rejimi, katı yüzeyin geometrisi, akışkan sıcaklığı, yüzey sıcaklığı, salınımın genliği ve frekansı gibi akış ve ısı transferini etkileyen pek çok

parametrelerin bulunması nedeniyle optimum parametrelerin belirlenmesi için yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, yapılan bu çalışma ile durgun bir ortam akışkanı içinde, düşey yönde periyodik hareketli, sabit ısı akısına sahip düşey düz bir yüzey üzerinde gerçekleşen karışık taşınım ile ısı transferi, hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Giriş

Bu tez çalışmasının temel amacı, periyodik hareket eden, ısıtılmış düşey düz bir levha yüzeyinde, ısı transferi mekanizmasını açıklamak, kaldırma kuvvetlerinin zorlanmış taşınımına etkisini araştırmak, yüzeyde gerçekleşen ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemek, olayı etkileyen fiziksel parametreleri analiz etmek ve deneysel veriler ile sayısal sonuçlar arasındaki uyumu göstermektir.



a



b

Şekil 3.1. Deney düzeneği.

Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak Şekil 3.1a ve b’de gösterilen deney düzeneği oluşturulmuştur. Bunun için öncelikle içerisinde deneysel modelin periyodik hareketinin gerçekleştirildiği şeffaf bir muhafaza tasarlanmıştır. Bu muhafazanın oluşturulmasındaki amaç, deneysel model üzerinde oluşan hava akımı için kararlı akış yapısı oluşturarak sıcak havanın yükselmesine yardımcı olmak ve deneysel modeli, etrafında oluşabilecek istenmeyen dış hava etkilerinden korumaktır. Bu nedenle hacmin alt ve üst kısmı açık, diğer tüm yan yüzeyleri kapalı olacak şekilde tasarlanmıştır.

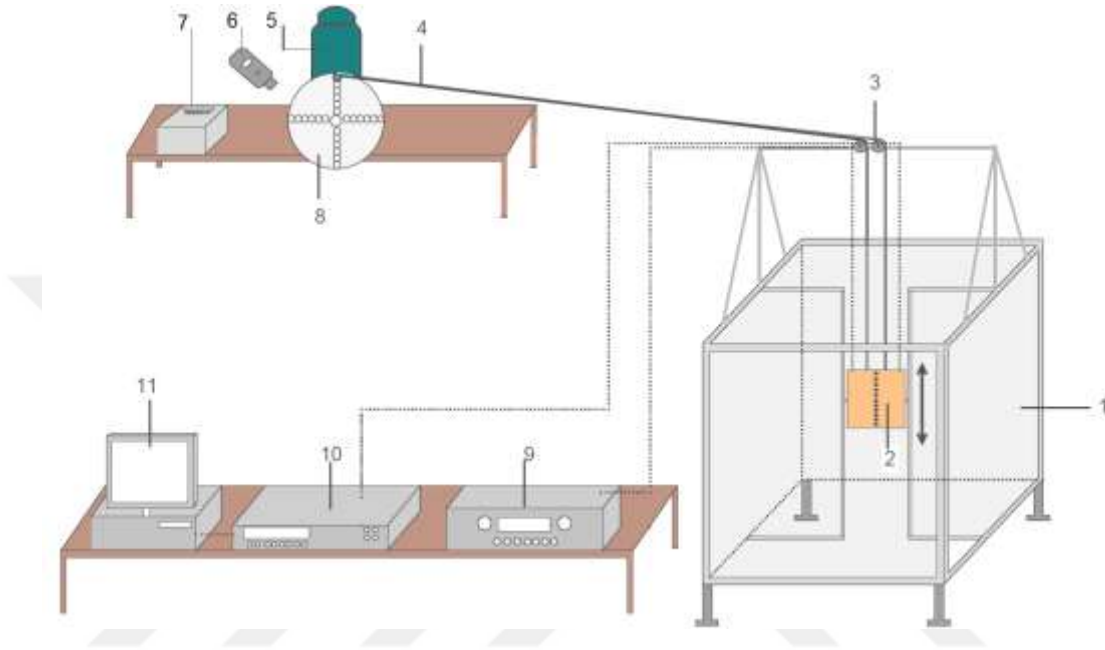
Deneysel modelin, bu muhafaza içerisindeki düşey yönde periyodik salınım hareketi bir volan ve askı-makara sistemi ile sağlanmıştır. Volan üzerindeki özel açılmış deliklerden genlik ayarı yapılmakta ve volan bir DC motor tarafından tahrik edilmektedir. Modelin salınım hareketinin hızı ise deney düzeneğinin limitleri dahilinde motorun frekansı (devir hızı) değiştirilerek sağlanmaktadır. Deneysel model üzerine yerleştirilmiş termoelemanlar ile ölçülen levha yüzey sıcaklıkları, veri toplama sisteminde toplanarak oradan da bilgisayara aktarılmaktadır.

Levhanın düşey yöndeki periyodik salınım hareketi ile yüzeyde oluşan hız ve ısı sınır tabakanın sürekli yenilenmesi sağlanmış ve levha yüzeyindeki karışık (doğal+zorlanmış) taşınım ile birlikte gerçekleşen ısı transferi miktarı hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada, levha yüzeyine uygulanan ısı akısı, levhanın periyodik salınım genliği ve frekansı gibi parametreler değiştirilerek deneyler tekrarlanmıştır. Çalışma ayrıca ANSYS Fluent 18.2 yazılımı kullanılarak sayısal olarak da incelenmiş olup anlık sıcaklık ve akış görüntüleri elde edilerek ısı geçiş mekanizması yorumlanmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki uyum gösterilmiştir.

Bu bölümde, deney düzeneği detaylıca tanıtıldıktan sonra, levha üzerindeki sıcaklık ölçme noktaları, ölçme yöntemi ve deneysel verilerin nasıl analiz edildiği sırasıyla açıklanmıştır. Isı transferinin bağlı olduğu parametrelerin etkisinin belirlenmesi ve Nusselt sayısının hesaplanabilmesi için deneysel model üzerinde farklı ısı akıları ve salınım parametreleri için sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra sonuçlar boyutsuz sayılar cinsinden verilmiş ve ısı transferinin en iyi olduğu parametreler araştırılmıştır. Ayrıca yapılan deneylerde, belirsizliğe sebep olan fiziksel büyüklükler tespit edilmiş ve bu parametrelerin ısı transferi hesaplarında ne kadar belirsizliğe sebep olduğu hesaplanmıştır.

3.2 Deney Düzenegi

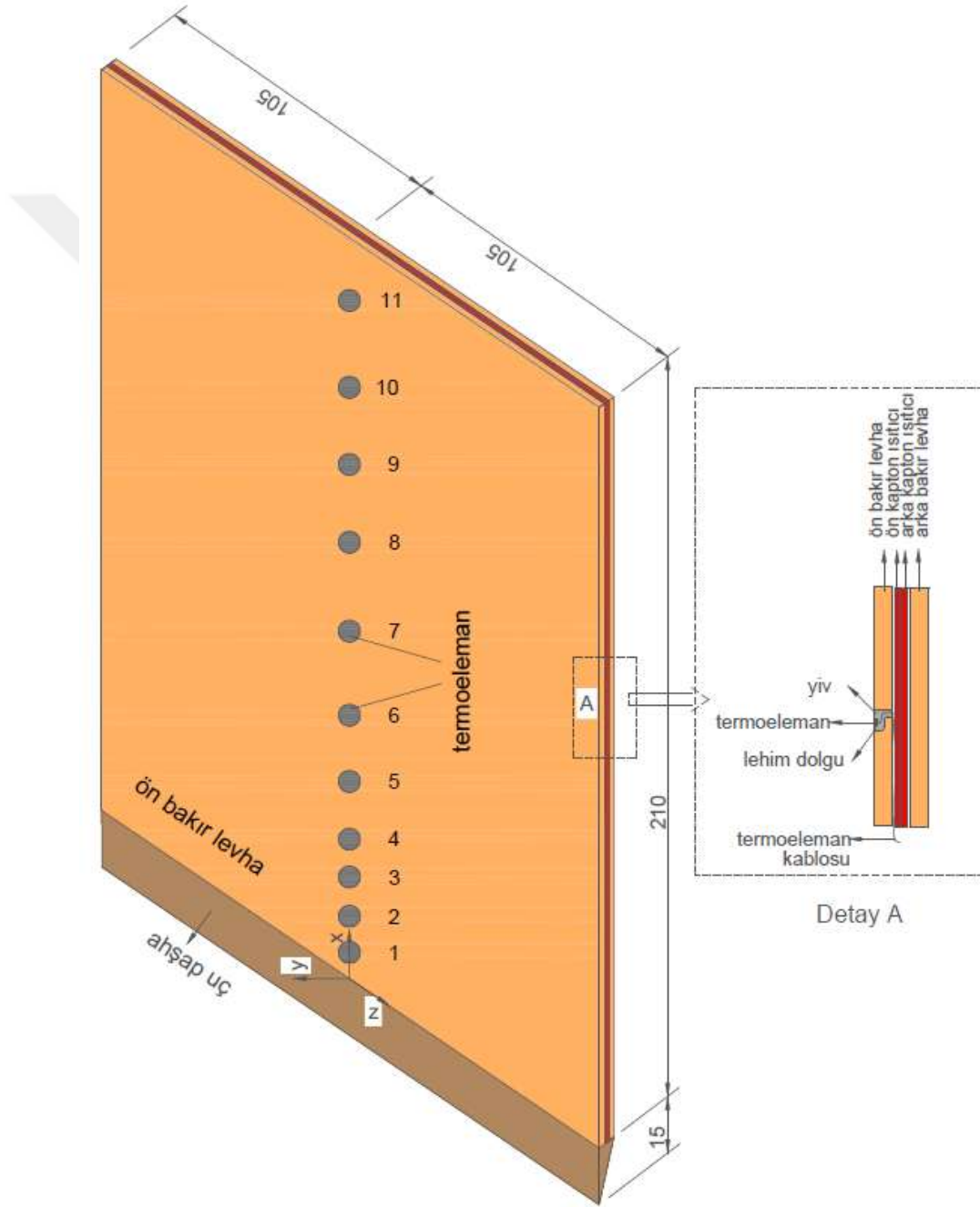
Deneyisel çalışmalarda kullanılan deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir. (1- Şeffaf muhafaza, 2- Deneyisel model, 3- Makara sistemi, 4- Askı sistemi, 5- DC motor, 6- Takometre, 7- Hız ayar ünitesi, 8-Volan, 9- Güç kaynağı, 10-Veri toplama sistemi, 11- Bilgisayar).



Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

Şeffaf muhafaza için öncelikle 5 cm genişliğinde alüminyum profilden $800 \times 800 \times 800$ mm³ ebatlarında bir çerçeve sistemi oluşturulmuştur. Muhafazanın alt ve üst kısımları açık tutulmuş ve diğer tüm yan yüzeyleri 3 mm kalınlığında şeffaf pleksiglass malzeme ile kapatılmıştır. Kapalı yan yüzeylerden birisi, muhafazanın içerisinde olası müdahaleyi kolaylaştırmak için açılır tarzda tasarlanmıştır. Muhafazanın alt kısmını zeminden yükseltmek için 20 cm yüksekliğinde dört adet ayak yapılmıştır. Üst kısmına ise deneyisel modelin salınım hareketine yardımcı olması için askı-makara sistemi yapılmıştır. Bunun için şeffaf muhafazanın üst alüminyum çerçeve kısmına, karşılıklı iki kenarın ortasından 40 cm yüksekliğinde iki dik profil monte edilmiş ve bu dik profiller, üst kısımda yatay bir profille birleştirilmiştir. Ayrıca her dik profil, bulunduğu kenara iki ayrı profil ile de sabitlenerek deneyisel modelin hareketi esnasında yatay profilin esnemesi önlenmiştir. Askı sisteminin yatay profil kısmına deneyisel modelin salınım hareketine yardımcı olmak için dört adet makara monte edilmiştir. Bunun için

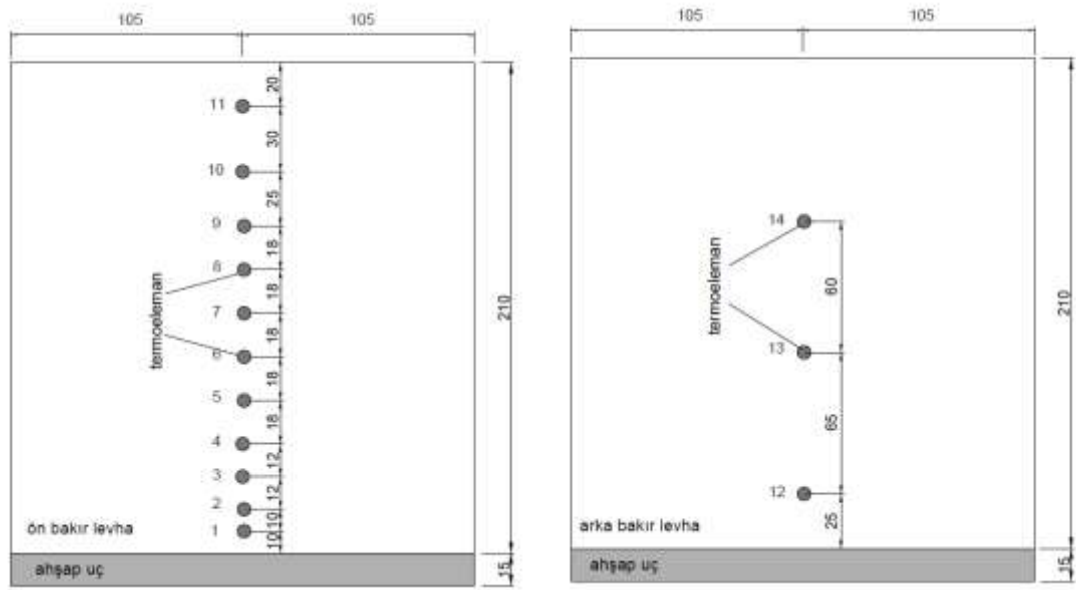
merkezden ortalanmış ve aralarında 10 cm mesafe olacak şekilde iki adet 40 mm çapında makara, askı profilinin yan yüzeyine, aynı özelliklerde iki adet makara ise üst yüzeyine yerleştirilmiştir. Şeffaf muhafaza içerisine alüminyum profilden karşılıklı düşey iki adet ray sistemi yerleştirilmiş ve bu rayların deneysel modelin yukarı aşağı salınım hareketine kılavuzluk etmesi sağlanmıştır. Raylar, alüminyum çerçevenin yan kısımlarına ve zemine mesnetlenerek rijit hale getirilmiştir.



Şekil 3.3. Deneysel modelin şematik görünümü.

Deneyisel model, $210 \times 210 \times 1.5 \text{ mm}^3$ ebatlarında iki adet düz bakır levha, her iki levha üzerine yerleştirilmiş termoelemanlar, levhalar arasına yerleştirilen iki adet Kapton ısıtıcıdan (Omega, KHR flexible) oluşmaktadır. Levhanın hareketi ile yüzeye gelen akışkanın levhanın alt kısmında küt cisim etkisine maruz kalmaması ve akışkanın levha üzerine üniform olarak gelmesini sağlamak için levhanın alt uç kısmına, $x=15 \text{ mm}$ genişliğinde $\theta=13^\circ$ açığa sahip üçgen şeklinde tasarlanmış ahşap uç, bakır levhanın eni boyunca yerleştirilmiştir. Deneyisel modelin şematik görünümü Şekil 3.3'te detaylı olarak verilmiştir.

Şekil 3.4 ile levha yüzey sıcaklıklarını ölçmek için ön ve arka bakır levhalar üzerine yerleştirilen termoelemanların konumları verilmiştir. Bu termoelemanlar (K-tipi, Omega, $\pm 0.1^\circ \text{C}$), levhanın orta eksenı boyunca, tek yönde (x yönünde), belirli aralıklarla levha üzerine yerleştirilmiştir. Termoelemanların yerleştirilmesi için önce levha üzerine matkap ile küçük delikler açılmış, bu delikten geçirilen termoelemanlar sert lehim ile yüzeye sabitlenmiş ve daha sonra yüzey zımparalanarak pürüzsüz hale getirilmiştir.

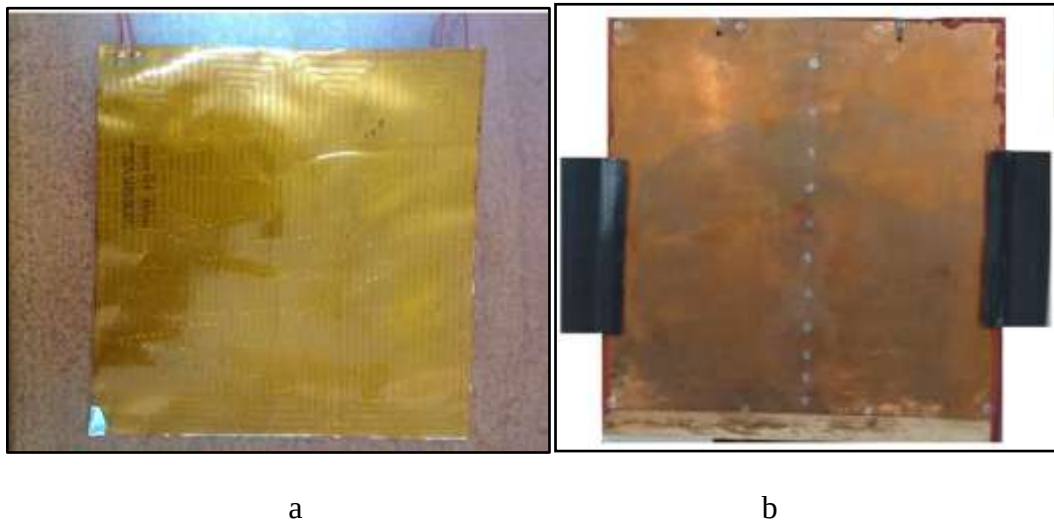


Şekil 3.4. Ön ve arka levhalar üzerine yerleştirilen termoelemanlar (ölçüler mm'dir).

Ön bakır levhaya on bir, arka bakır levhaya ise üç adet termoeleman bu şekilde yerleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri için ön bakır levha üzerine yerleştirilen termoelemandan alınan veriler dikkate alınmış, arka levhadaki termoelemanlardan alınan sıcaklık verileri ise kontrol amacıyla kullanılmıştır.

Ortam sıcaklığını ölçmek için ise şeffaf muhafazanın içine ve dışına birer adet termoeleman yerleştirilmiştir. Termoelemanlardan alınan yüzey ve ortam sıcaklıkları, Keithley-2750 veri toplama sistemi aracılığı ile bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayardan alınan bu sıcaklık verileri kullanılarak levha yüzeyinden gerçekleşen ısı transferi miktarı hesaplanmıştır.

Model simetrik olarak düşünülmüştür. Sıcaklık ölçümleri levhanın tek yüzeyi için bir boyutta (x yönünde) yapılmıştır. Modelin simetrik olarak düşünülmesi, levha yüzeyine verilen ısı akısı miktarını artırmak ve modelin ön ve arka yüzeylerinden ısı transferini sağlamak içindir. Bu nedenle, her iki bakır levha arasına iki adet Kapton ısıtıcı yerleştirilmiştir. Levhalar arasına yerleştirilen Kapton ısıtıcı, Şekil 3.5a'da görülmektedir. Bakır levhalar ve ısıtıcılar arasında bulunan termoeleman kabloları, levhanın her iki yan kısmından dışarı çıkarılmış ve levha uzunluğu boyunca üst kısma doğru özenle toplanmış ve askı-makara sisteminden geçirilerek veri toplama sistemine bağlantısı yapılmıştır. Kapton ısıtıcılara ait kablolarda yine askı-makara sisteminden geçirilerek güç kaynağına bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra iki bakır levha birleştirilerek kenarlarından perçinlenmiş ve tek parça haline getirilmiştir. Ahşap uç, modelin alt uç kısmına, yüksek sıcaklığına dayanıklı silikon ile yapıştırılmıştır. Deneysel modelin kılavuz raylar arasındaki salınımını kolaylaştırmak ve sürtünmeyi en aza indirmek için üç boyutlu yazıcıdan plastik tabanlı filament malzemedan 2 adet mafsallama takozu imal edilmiş ve bu parçalar deneysel modelin yan kısımlarına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.5. a- Kapton ısıtıcı, b-Deneysel modelin son hali.

Tüm bu işlemlerden sonra deneysel modelin son hali Şekil 3.5b' de verilmiştir. Deneysel modelin üst kısmına matkap ile açılan iki ayrı delikten 0.5 cm çapında esnek olmayan bir ip geçirilmiş ve bu ipler askı-makara sisteminden geçirilerek belli bir mesafeden sonra birleştirilmiş ve tek parça olarak volana bağlanmıştır.

Levhanın düşey yönde yaptığı salınım hareketi için 2.4 KW DC motor ile tahrik edilen bir volandan yararlanılmıştır. Üzerinde özel açılmış deliklerin bulunduğu volan vasıtasıyla levha salınım hareketinin genlik ayarı yapılmış ve tahrik motoru hız ayarı ünitesinden desalınımın frekansı değiştirilmiştir. Motorun devir sayısı, hem kontrol panelinden dijital olarak görülmekte hem de optik bir dijital takometre ile de ölçülmektedir.

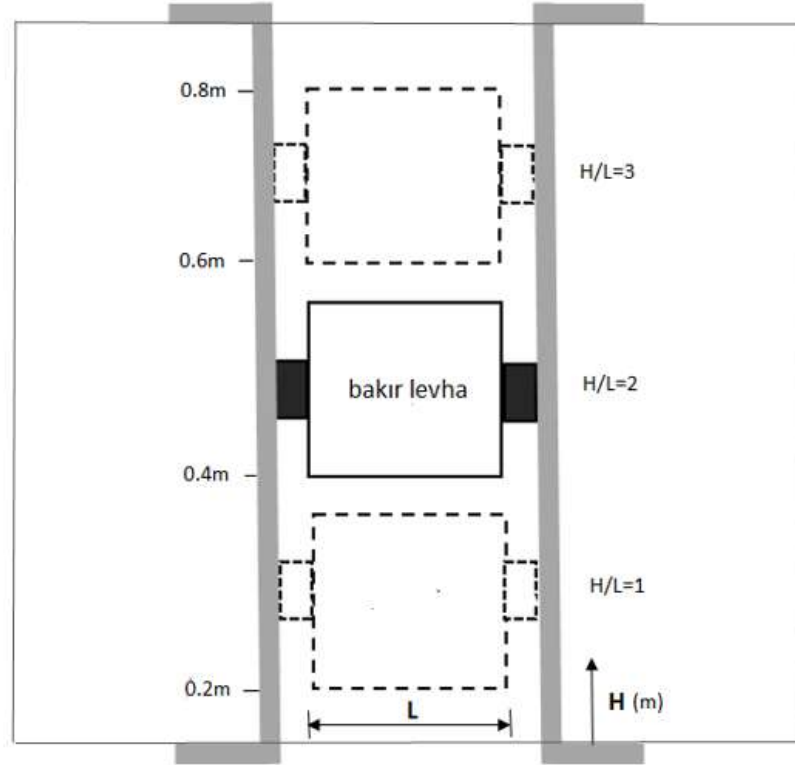
Isıtıcı yüzey oluşturmak için kullanılan 1.5 mm kalınlığındaki bakır levhanın iletim direnci ihmal edilmektedir. Bu levha için Biot sayısı ($Bi=hL/k$) hesaplandığında $Bi=0.028$ değeri bulunmuştur. Yaygın literatürde, Biot sayısının $Bi<0.1$ değeri için toplam kütle (lumped) yaklaşımı yapılabilmektedir (Incropera and Dewitt, 1996).

3.3 Deneylerin Yapılışı

Deney düzeneği oluşturulduktan sonra sistemin çalışması test edilmiştir. Levha yüzeyine güç kaynağı vasıtasıyla farklı ısı akıları uygulanmış ve bu ısı akıları Rayleigh sayısı ($Ra=Gr \times Pr$) ile ifade edilmiştir. Levha yüzeyine uygulanan, 250 W/m², 500 W/m², 625 W/m² değerindeki üç farklı ısı akılarına karşılık gelen Ra sayıları sırasıyla 1.17×10^7 , 2.94×10^7 , 3.6×10^7 olarak elde edilmiştir. Çalışmalarda ısı akısı parametresi olarak Ra sayısı kullanılmıştır

Deneysel model şeffaf muhafazanın alt, orta ve üst konumlarında sabit tutulmuş, her konum için $Ra=1.17 \times 10^7$ değerinde sabit bırakılmıştır. Levha yüzeyinden ölçülen sıcaklıkların değişmediği tespit edilene kadar (sistemin sürekli rejim haline gelmesi) belirli bir süre beklenmiş (yaklaşık 45-50 dakika) ve sonra termoelemanlardan alınan anlık yüzey sıcaklıklar bilgisayara kaydedilmiştir.

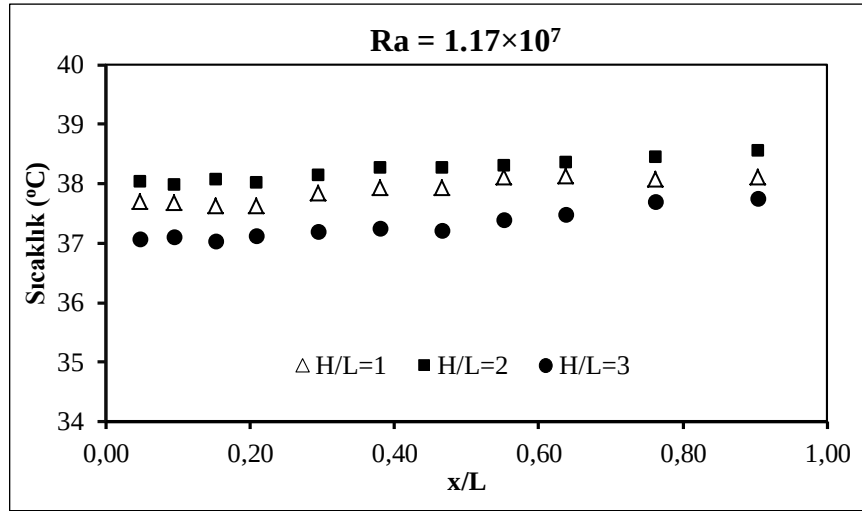
Levhanın muhafaza içerisindeki sabit konumunu tariflemek için H/L oranı kullanılmıştır. Burada H, düşey konumdaki levhanın alt kenarının muhafazanın alt kenarına olan dikey mesafeyi, L ise levha uzunluğunu ifade etmektedir. Muhafaza içerisindeki düşey levhanın farklı H/L konumları Şekil 3.6'da görülmektedir.



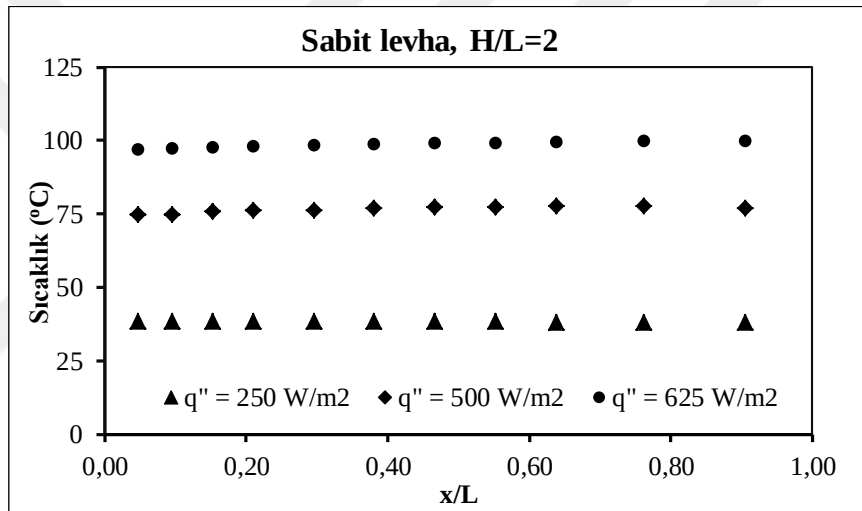
Şekil 3.6. Düşey levhanın muhafaza içerisindeki farklı konumları.

Düşey levha, muhafaza içerisinde üç farklı konumda ($H/L=1, 2, 3$) sabit tutulmuş ve bu konumlarda yüzey sıcaklıkları arasında bir fark olup olmadığı araştırılmıştır. Sabit levhanın $Ra=1.17 \times 10^7$ için muhafaza içerisindeki farklı konumlarında elde edilen bu yüzey sıcaklıkları Şekil 3.7’de verilmiştir. Levha, muafaza içerisindeki üst konumda ($H/L=3$) iken yüzey sıcaklıklarının daha düşük olduğu, bunun da levhanın diğer konumlarına göre daha büyük miktarda dış ortam havası ile temas etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sonra ise muhafaza içerisindeki deneysel model, $H/L=2$ konumunda sabit tutulmuş ve üç farklı Ra sayılarında levha yüzey sıcaklıkları ölçülmüş ve yüzeyden doğal taşınım ile gerçekleşen ısı transferi hesaplanmıştır. Sabit levhanın $H/L=2$ konumunda, doğal taşınım ile gerçekleşen ısı transferi referans alınarak salınımlı levha yüzeyinden karışık taşınım ile gerçekleşen ısı transferi karşılaştırılmıştır. Sabit levhanın $H/L=2$ konumu için farklı Ra sayılarında, levha boyunca elde edilen sıcaklıklar Şekil 3.8’de verilmiştir. Ra sayısının artması ile yüzey sıcaklıklarında da artış görülmektedir.



Şekil 3.7. Sabit levhanın farklı H/L oranları için elde edilen yüzey sıcaklıkları.



Şekil 3.8. Sabit levha üzerinde farklı Ra sayıları için elde edilen yüzey sıcaklıkları.

Periyodik salınım hareketi için öncelikle test edilecek genlik değeri volan üzerinden ayarlanmış ve deneysel model muhafazanın içerisinde H/L=2 konumunda sabit bırakılmıştır. Güç kaynağı aktif hale getirilerek levha yüzeyinin ısınması sağlanmıştır. Daha sonra volanı tahrik eden motor çalıştırılmış ve motorun devri, hız ayar ünitesinden test edilen frekansa ayarlanmıştır. Böylece muhafaza içerisinde bulunan düşey levhanın belirlenen Ra sayılarında, genlik ve frekansta periyodik olarak salınım hareketi yapması sağlanmıştır. Isınan levha periyodik hareketine devam ederken sistemin sürekli rejim haline gelmesi beklenmiştir. Sistemin rejim haline geldiği, levha yüzey sıcaklık ölçümlerinden anlaşılmakta ve daha sonra termoelemanlardan okunan sıcaklık değerleri veri toplama sistemi aracılığı ile bilgisayara kaydedilmektedir.

Çalışmada, açısal hız değerine bağlı olarak levhanın salınım frekansını ifade etmek için Eşitlik (3.1)'de verilen Womersley sayısından (Wo) yararlanılmıştır.

$$Wo = L \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} = \sqrt{Re_{\omega}} \quad (3.1)$$

Salınım genliği olarak Eşitlik (3.2) ile boyutsuz salınım genliği (A_o) tariflenmiştir.

$$A_o = \frac{x_m}{L} \quad (3.2)$$

Burada ω , radyan cinsinden açısal hızı, ν kinematik viskoziteyi (m^2/s), x_m volanın genliğini, L ise levha uzunluğunu göstermektedir. Bu yapılan çalışmada $Wo=65, 92, 113, 131, 146$ olmak üzere beş farklı boyutsuz frekans değeri kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de levhanın salınımına ait hız ile ilgili parametreler verilmiştir.

Çizelge 3.1. Levha salınımına ait hız ile ilgili parametreler.

Wo	$n (d/d)$	$\omega (rad/s)$	$f (1/s)$	$T (s)$
65	15	$\pi/2$	0.25	4.00
92	30	π	0.50	2.00
113	45	$3\pi/2$	0.75	1.33
131	60	2π	1.00	1.00
146	75	$5\pi/2$	1.25	0.80

Burada, Wo (Womersley sayısı) boyutsuz frekansı, $n (d/d)$ motor devir hızını, $\omega (rad/s)$ açısal hızı, $f (1/s)$ frekansı, $T (s)$ ise periyodu ifade etmektedir. Levhanın ilk konumundan itibaren düşey yönde hareketi ile başlayan ve eski konumuna gelmesi için geçen süre (periyod) bir çevrimi ifade etmektedir. Buna göre levha, en düşük salınım hızında bir çevrimi 4 s'de tamamlarken, en yüksek hızda 0.8 s'de tamamlamaktadır.

Deneyler, üç farklı Ra sayısında ($Ra: 1.17 \times 10^7, 2.94 \times 10^7, 3.6 \times 10^7$), dört farklı boyutsuz genlik ($A_o: 0.4, 0.75, 1.1, 1.4$) ve beş farklı Wo sayısı ($Wo: 65, 92, 113, 131, 146$) için tekrarlanmıştır.

Deney sonuçlarının doğruluğundan emin olmak için test edilen tüm parametrelerde deneyler en az üç kez tekrarlanmıştır. Çalışmalarda, geometri ve diğer parametreler sabit tutulmuş olup deneysel çalışmaya ait parametreler EK A'da Çizelge A.1'de detaylı olarak verilmiştir. Düşey yönde salınımlı levha için 60 adet, sabit levhanın muhafaza içindeki farklı H/L konumları için 3 adet ve farklı Ra sayıları için 3 adet deney yapılmış olup toplamda ise 66 adet deney için çalışmalar tekrarlanmıştır.

3.4 Levha Yüzey Sıcaklığının Belirlenmesi

Deneysel modele yerleştirilen termoeleman kabloları, modelin yan kısımlarından dışarıya çıkarılmış ve veri toplama sistemine bağlantısı yapılmıştır. Her bir termoelemandan alınan anlık sıcaklık değerleri, zamana bağlı olarak ayrı ayrı kaydedilebilmektedir. Levhanın düşey yönde periyodik salınım hareketi nedeniyle üzerinde periyodik akış meydana gelmekte, sıcaklık değerleri zamanla değişmektedir. Yüzey sıcaklığını hesaplamak için bu anlık değerler kullanılmaktadır. Yüzeye yerleştirilen her bir termoelemandan alınan anlık sıcaklıkların zaman ortalaması alınarak bu noktaların ortalama sıcaklığı bulunmuştur. Zaman aralıkları eşit olduğu için ortalama sıcaklıklar;

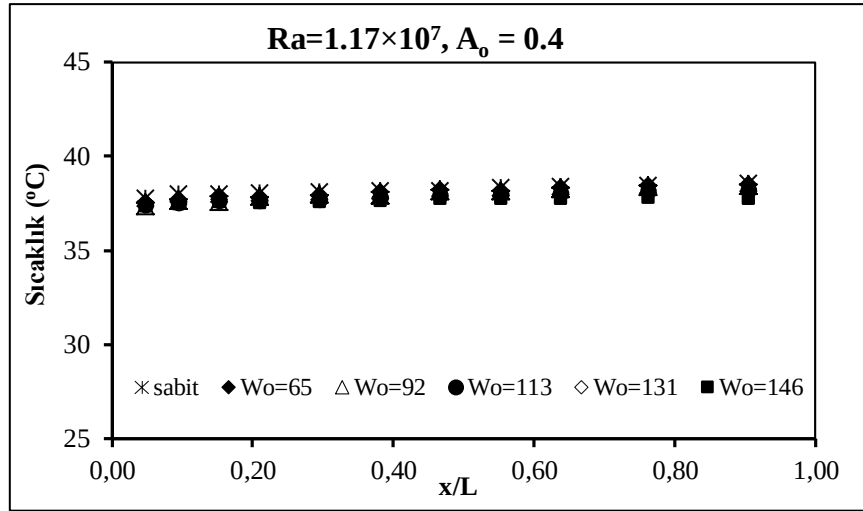
$$T_{w,x} = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{i=1}^N T_{w,i} \Delta t \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada, N toplam veri sayısını, Δt zaman aralığı, $T_{w,i}$ ise anlık sıcaklıkları göstermektedir. Yerel ortalama sıcaklıklar vasıtasıyla, levha yüzeyindeki ortalama sıcaklık, alan ortalamalı olarak Eşitlik (3.4) ile hesaplanmıştır.

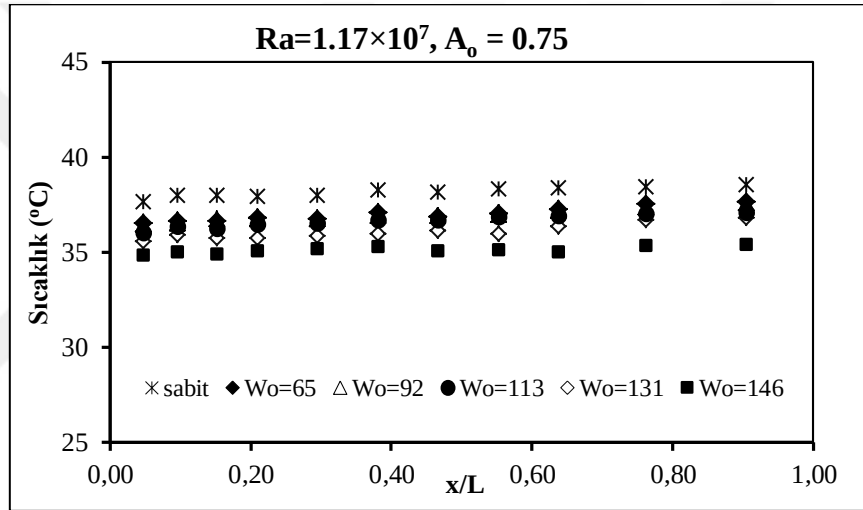
$$\bar{T}_w = \frac{T_1 A_1 + T_2 A_2 + T_3 A_3 + \dots T_i A_i}{A_T} \quad (3.4)$$

$\bar{T}_w$ ortalama levha yüzey sıcaklığını, A_i termoelemanın bulunduğu kısmi alanı, A_T ise levhanın toplam yüzey alanını göstermektedir.

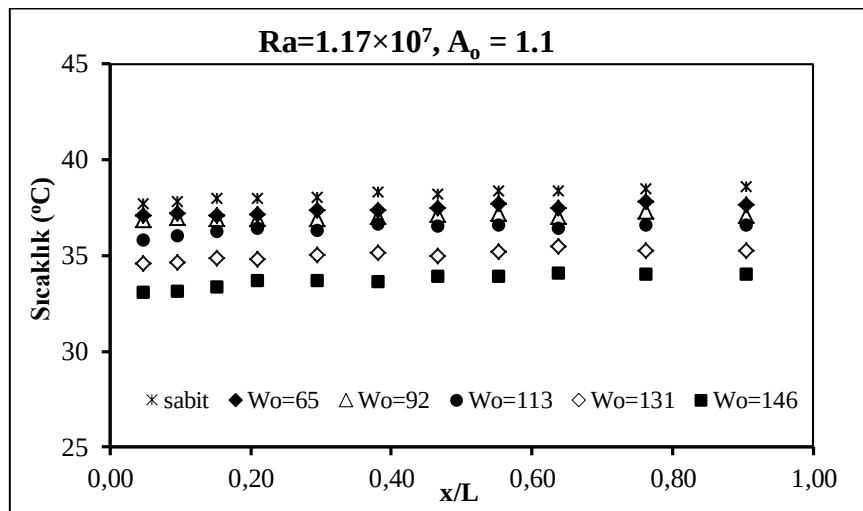
Şekil 3.9'da $Ra=1.17 \times 10^7$ ve farklı genliklerde Wo sayısı ile levha yüzey sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Şekillerden, artan genlikle birlikte levha yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Sabit levha konumunda elde edilen sıcaklıklarla karşılaştırıldığında frekansın artması ile levha yüzey sıcaklıklarının azaldığı gözlenmektedir.



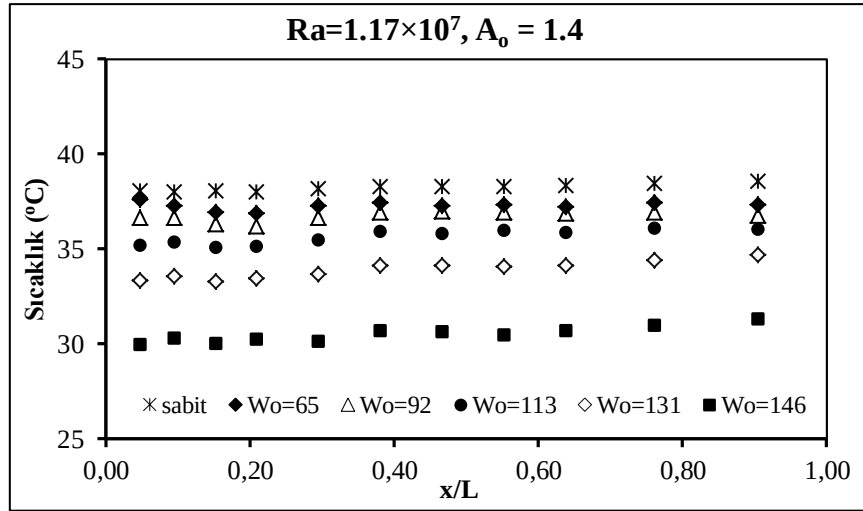
a



b



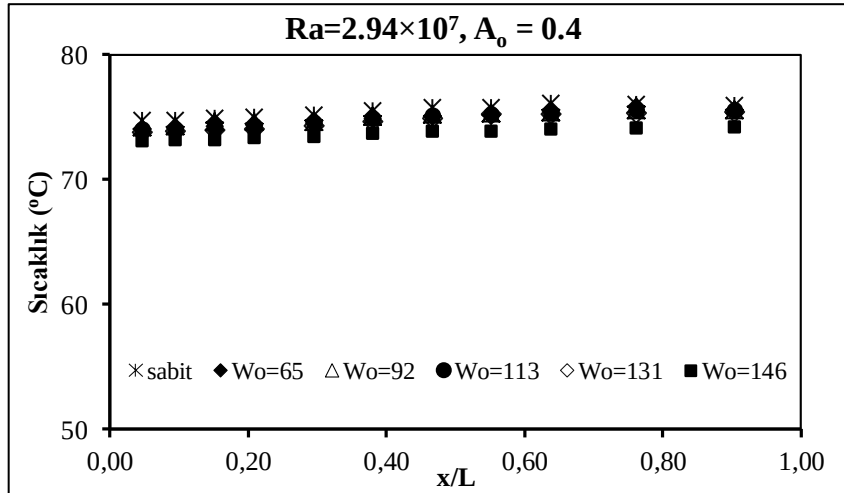
c



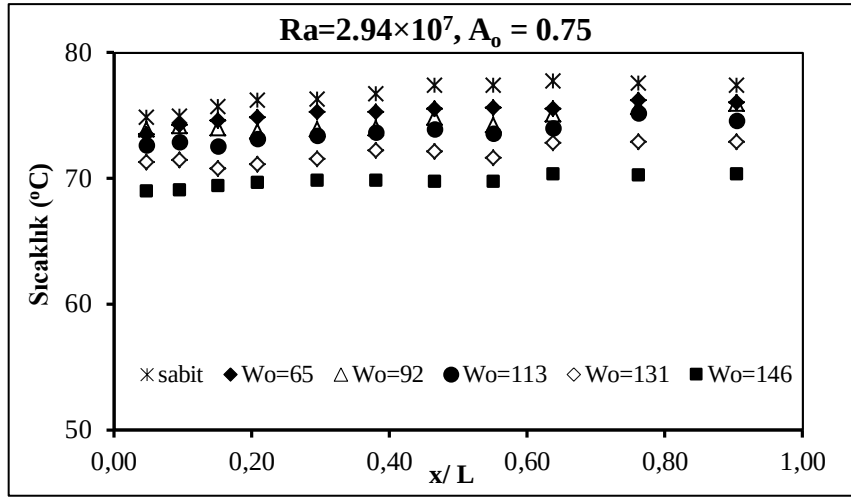
d

Şekil 3.9. Farklı salınım genliği ve frekansı ile yüzey sıcaklıklarının değişimi, a- $A_0=0.4$, b- $A_0=0.75$, c- $A_0=1.1$, d- $A_0=1.4$.

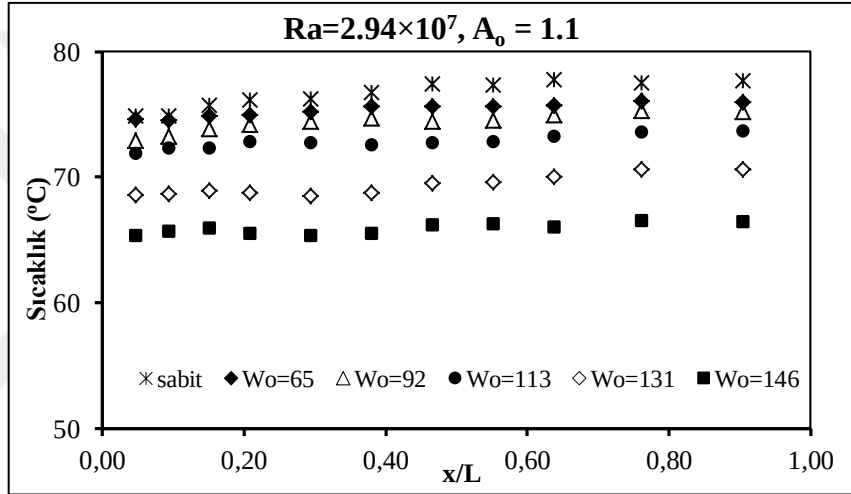
Şekil 3.10'da $Ra=2.94 \times 10^7$ için farklı genliklerde frekansla levha boyunca yüzey sıcaklıklarının değişimi görülmektedir. Ra sayısının artması ile levha yüzey sıcaklıkları da artmaktadır. Şekillerden, yine artan genlikle birlikte levha yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın arttığı görülürken frekansın artması ile levha yüzey sıcaklıkları azalmaktadır.



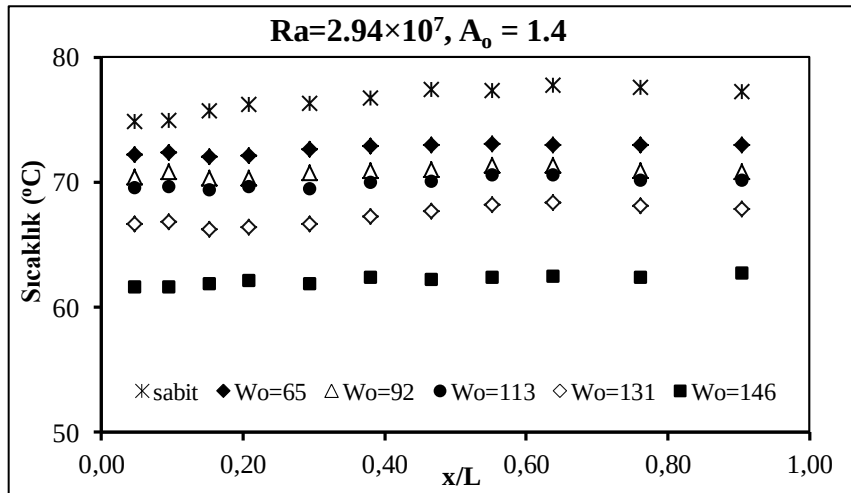
a



b

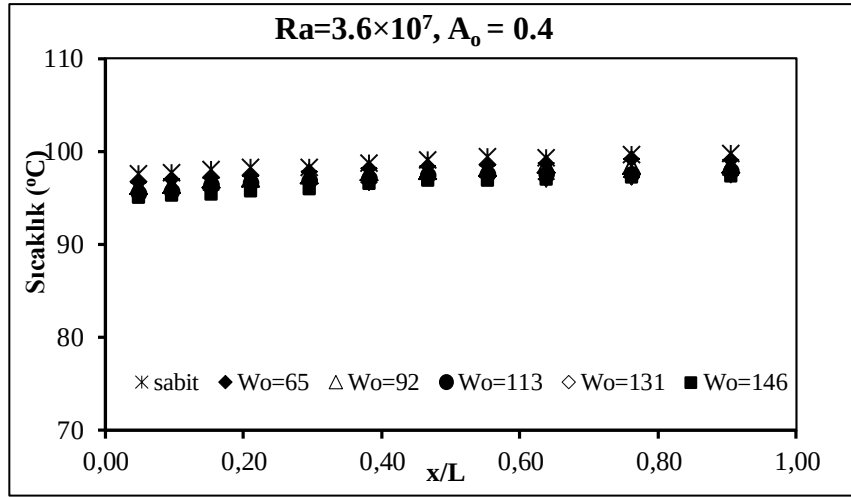


c

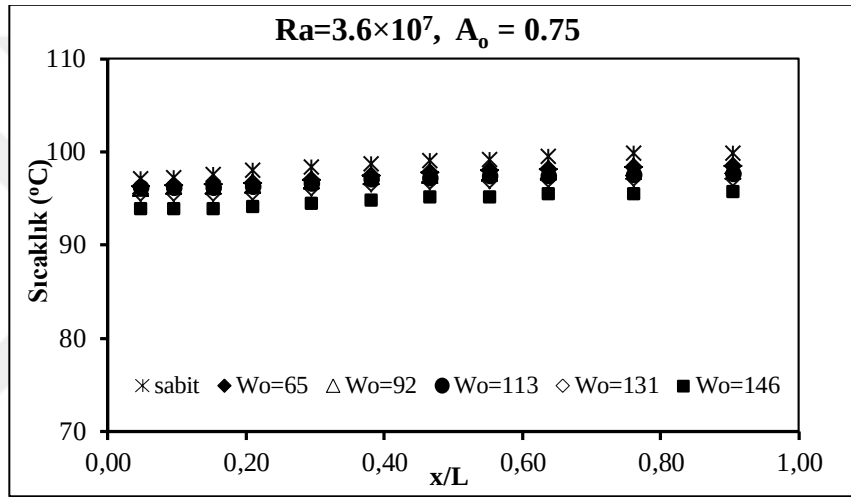


d

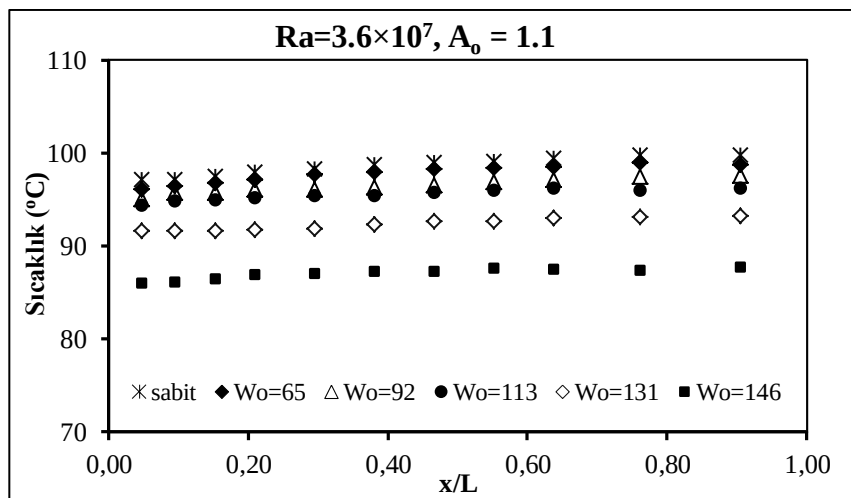
Şekil 3.10. Farklı salınım genliği ve frekansı ile yüzey sıcaklıklarının değişimi, a- $A_0=0.4$, b- $A_0=0.75$, c- $A_0=1.1$, d- $A_0=1.4$.



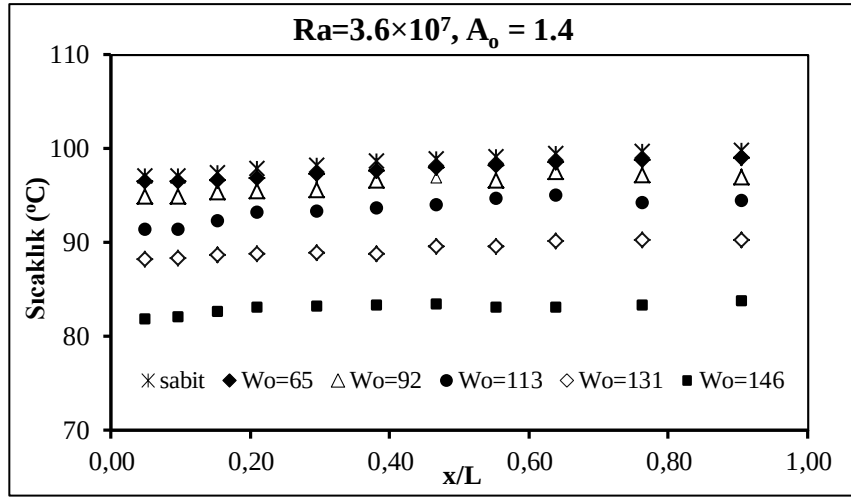
a



b



c



d

Şekil 3.11. Farklı salınım genliği ve frekansı ile yüzey sıcaklıklarının değişimi, a- $A_o=0.4$, b- $A_o=0.75$, c- $A_o=1.1$, d- $A_o=1.4$.

Şekil 3.11'de $Ra=3.6 \times 10^7$ için farklı genliklerde frekansla levha boyunca yüzey sıcaklıklarının değişimi görülmektedir. Isı akısı arttıkça levha yüzey sıcaklıkları da artmış ve 100°C değerine yaklaşmıştır. Şekil 3.11'de, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da olduğu gibi benzer sonuçlar elde edilmiş ve artan genlikle birlikte levha yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın arttığı, frekansın artması ile levha yüzey sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre Ra sayısının, periyodik salınım hareketine sahip levhanın genlik ve frekansının, levha yüzey sıcaklıkları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Artan salınım genliği ve frekansı levha yüzey sıcaklıklarının düşmesine neden olmaktadır. Levha boyunca sıcaklık önce hafif bir şekilde artarken, daha sonra az bir eğimle düşmektedir. Genel olarak, Ra sayısının artması, beklendiği gibi yüzey sıcaklıklarının da artmasına sebep olmaktadır. Ra sayısı ne olursa olsun, artan genlik ve frekansla birlikte yüzey sıcaklıkları da kayda değer bir şekilde düşmektedir. Yüzey sıcaklıklarının düşmesi, yüzeyin daha iyi soğuduğu, ısı transferinin arttığı anlamına gelmektedir. Artan genlik ve frekansla birlikte levha salınım hızı artmakta, zorlanmış taşınım etkileri daha baskın hale gelmektedir. Taşınımın artması ısı transferini artırmaktadır.

3.5 Isı Geçişi Hesabı

Bu çalışmada, termoelemanlardan alınan sıcaklık ölçümleri yardımıyla ısı taşınım katsayısının bulunabilmesi ve levha yüzeyinden ortama geçen net ısı miktarının

belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için hem belirli Ra sayısında, sabit düşey levha üzerindeki doğal taşınım ile gerçekleşen ısı transferi, hem de periyodik salınım hareketli düşey levha üzerindeki karışık taşınım ile gerçekleşen ısı transferi hesaplanmıştır.

Çalışmada ısıtılmış düşey levhadan ışıınım ile olan ısı transferi de Eşitlik (3.5) ile hesaplanmıştır.

$$q''_{ışınım} = \varepsilon \sigma (\bar{T}_w^4 - T_\infty^4) \quad (3.5)$$

Burada, ε yüzeyin yayıcılık oranını (parlatılmış bakır için $\varepsilon=0,03$) , $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ Stefan Boltzmann sabitini, $\bar{T}_w$ ortalama yüzey sıcaklığını (K), T_∞ ise ortam sıcaklığını (K) göstermektedir. Buna göre üç farklı Ra sayısı için düşey levhada ışıınım ile olan ısı transferi Çizelge 3.2’de verilmiştir. Tüm Ra sayılarında, çevreye olan ışıınımla ısı transferi yüzdesi çok düşük olduğu için hesaplamalarda ihmal edilmiştir.

Çizelge 3.2. Levha yüzeyinden ışıınım ile olan ısı transferi.

Ra sayısı	İşıınımla ısı transferi, $q''_{ışınım} \text{ (W/m}^2\text{)}$	İşıınımla ısı transferinin % oranı
1.17×10^7	2.24	0.9
2.94×10^7	11.24	2.25
3.60×10^7	18.36	2.94

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi sabit levhanın farklı H/L konumları için yüzey sıcaklıkları elde edilmiş ve doğal taşınımla ısı transferi için Nu sayıları hesaplanmıştır. Doğal taşınım için elde edilen ısı transferi referans alınarak periyodik salınımlı levha yüzeyinden elde edilen karışık taşınımla ısı transferi karşılaştırılmıştır.

Isı transferi miktarını hesaplamak için kullanılan anlık (yerel) Nu (x,t) sayısı Eşitlik (3.6) ile verilmiştir.

$$Nu(x, t) = \frac{h(x, t)L}{k_f} \quad (3.6)$$

Anlık (yerel) ısı taşınım katsayısı ($h(x, t)$) ise Eşitlik (3.7) ile tariflenmiştir.

$$h(x, t) = \frac{q''}{(T_w(x, t) - T_\infty)} \quad (3.7)$$

Burada $h(x, t)$ (W/m^2K) anlık ısı taşınım katsayısını, L levha uzunluğunu (m), k_f akışkanın ısı iletim katsayısını (W/mK), $T_w(x, t)$ ($^{\circ}C$), anlık (yerel) levha yüzey sıcaklığını ve T_∞ ($^{\circ}C$) ise ortam sıcaklığını göstermektedir. Kapton ısıtıcılar vasıtasıyla levha yüzeyine verilen ısı akısı ise q'' (W/m^2) ile ifade edilmektedir.

Levhanın hareketi periyodik olduğu için çevrim ortalama ısı taşınım katsayısı (h_m) ve çevrim ortalama Nu_m sayısı değerleri esas alınmaktadır. Anlık ısı taşınım katsayısının zaman ortalaması alınarak çevrim ortalama ısı taşınım katsayısı (h_m), Eşitlik (3.8) ile elde edilmiştir.

$$h_m = \frac{1}{\tau L} \int_0^L \int_0^\tau h(x, t) dt dx \quad (3.8)$$

Burada τ , bir çevrim zamanını göstermektedir. Bu eşitlikten yararlanarak çevrim ortalama Nusselt sayısı (Nu_m) Eşitlik (3.9) ile bulunur.

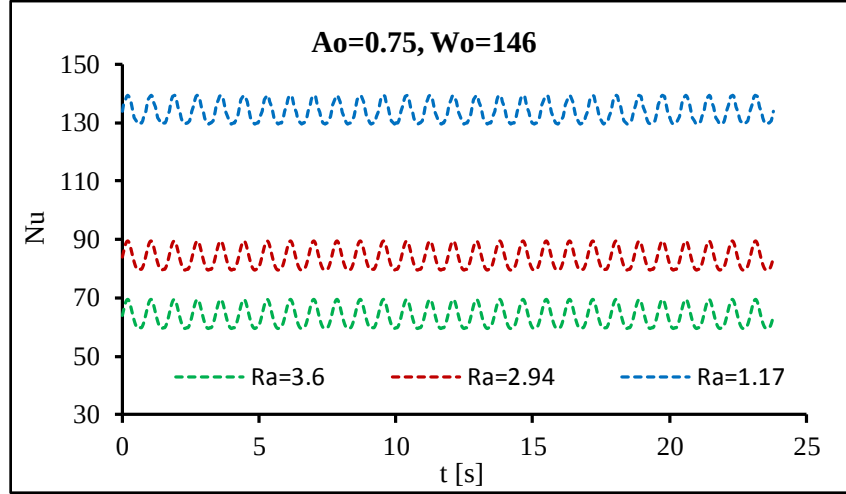
$$Nu_m = \frac{1}{\tau L} \int_0^L \int_0^\tau Nu(x, t) dt dx \quad (3.9)$$

Yukarıda verilen integrallerin hesaplanması sonucunda, ısı transfer hesaplamalarında kullanılan ortalama Nu sayısı (Nu_m), Eşitlik (3.10) ile verilmiştir.

$$Nu_m = \frac{q'' L}{k_f (\bar{T}_w - T_\infty)} \quad (3.10)$$

Burada $\bar{T}_w$ ($^{\circ}C$) çevrim ortalama levha yüzey sıcaklığını ifade etmektedir.

Şekil 3.12’de sabit salınım genliği ($A_0=0.75$) ve sabit salınım frekansında ($Wo=146$), farklı Ra sayıları ($Ra \times 10^7$) için ön levha yüzeyindeki ilk termoelemandan alınan sıcaklık verilerine göre zamanla değişen anlık (yerel) Nu sayısı verilmiştir. Bu termoelemandan (1 Nolu termoeleman) ölçülen sıcaklık verileri, sistem rejim haline geldikten sonra alınmış ve sonra Nu sayısı hesaplanmıştır. Isı akısı yükseldikçe anlık Nu sayısının düştüğü gözlemlenmektedir. Bu durum, ısı akısı artmasına rağmen yüksek ısı akılarında ortalama yüzey sıcaklığının daha yüksek olması nedeniyle Eşitlik 3.6’da verilen sıcaklık farkının daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır.

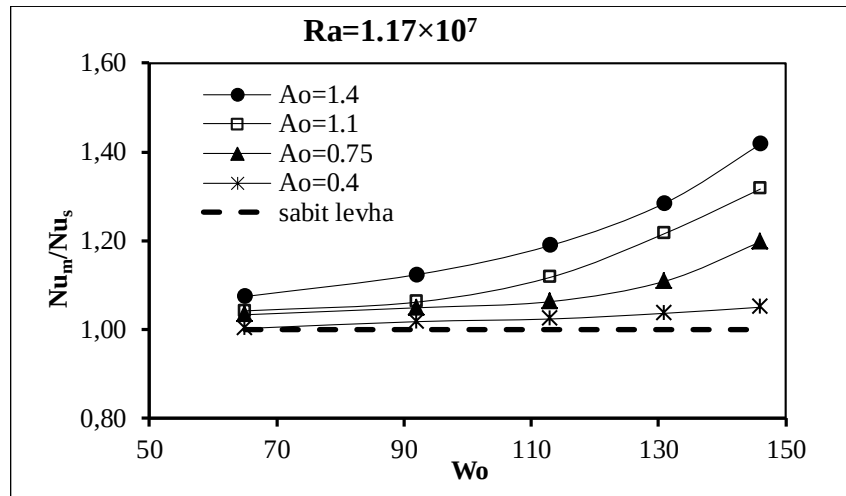


Şekil 3.12. Farklı Ra sayılarında ($Ra \times 10^7$) levha yüzeyindeki ilk termoelemanından alınan sıcaklık verilerine göre anlık Nu sayısının değişimi.

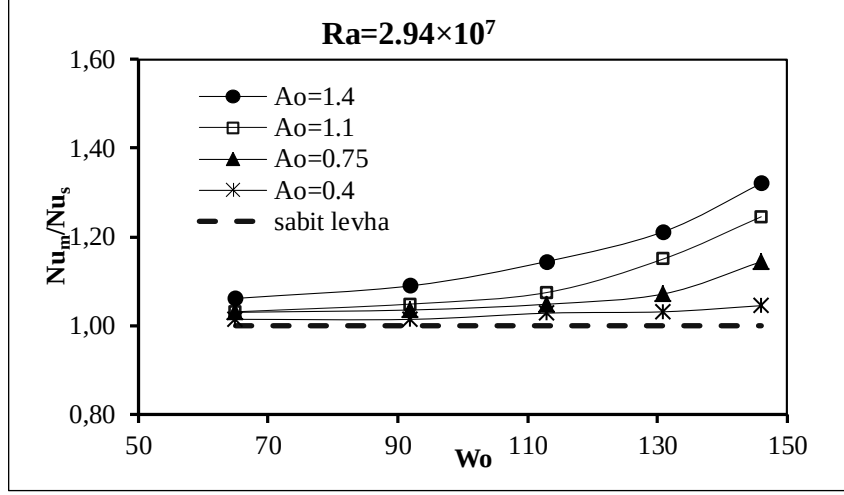
Periyodik salınım hareketine sahip düşey levha yüzeyinden elde edilen karışık taşınım ile ısı geçişinin (Nu_m) sabit düşey levha yüzeyinden elde edilen doğal taşınım ile ısı geçişine (Nu_s) oranı, ısı transferi performansı (η) olarak Eşitlik 3.11 ile tariflenmiştir. Isı transfer performansının 1'den büyük olması, doğal taşınımına göre karışık taşınım ile ısı transferinin arttığını göstermektedir.

$$\eta = \frac{Nu_m}{Nu_s} \quad (3.11)$$

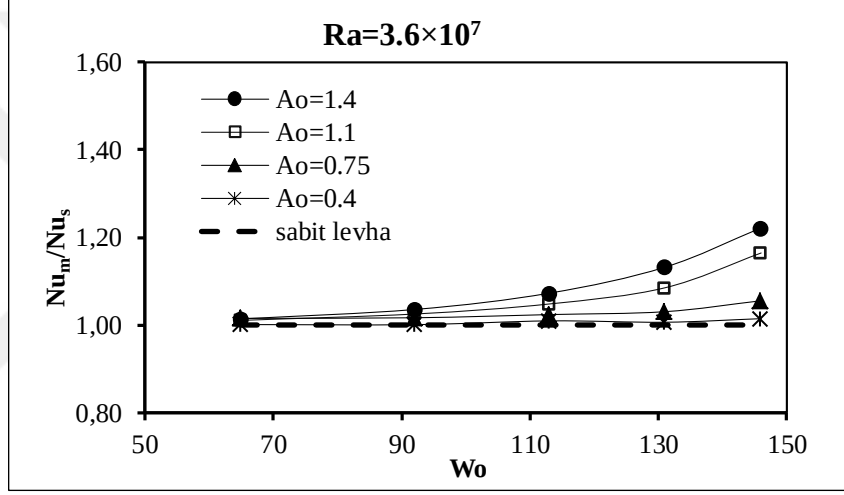
Şekil 3.13'de farklı ısı akıları için farklı genlik ve frekansların ısı transferi performansına etkileri verilmiştir.



a



b



c

Şekil 3.13. Farklı ısı akıları için salınım genliği ve frekansının ısı transferi performansına etkisi.

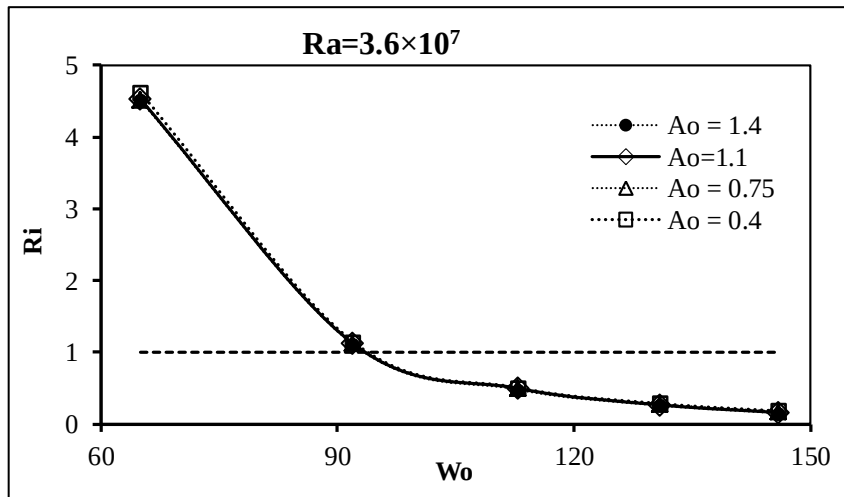
Şekil 3.13'den tüm ısı akıları için artan genlik ve frekansla birlikte ısı transferi performansının sabit levhaya göre arttığı gözlenmektedir. Ancak düşük ısı akısında bu artışın daha fazla olduğu görülmektedir. Periyodik hareketli levhanın yüksek genlik ($A_o=1.4$) ve yüksek frekans ($Wo=146$) değerinde $Ra=1.17 \times 10^7$ için sabit levhaya göre yaklaşık 1.45, $Ra=2.94 \times 10^7$ yaklaşık 1.38, $Ra=3.6 \times 10^7$ ise yaklaşık 1.26 ısı transferinde iyileşme elde edilmiştir.

Karışık taşınım olayında doğal taşınımın zorlanmış taşınımına oranı Richardson sayısı (Ri) olarak bilinir ve Eşitlik (3.12) ile tariflenir.

$$Ri = \frac{Gr}{Re_{\omega}^2} \quad (3.12)$$

Grashof sayısı (Gr) doğal taşınımı, Kinetik Reynolds sayısı (Re_ω) ise zorlanmış taşınımı ifade eden boyutsuz sayılardır. $Ri \gg 1$ ise Grashof sayısının Kinetik Reynolds sayısından daha büyük olduğunu, dolayısı ile doğal taşınım etkilerinin baskın olduğunu ifade etmektedir. $Ri \ll 1$ ise Kinetik Reynolds sayısının Grashof sayısından daha büyük olduğunu dolayısı ile zorlanmış taşınım etkilerinin daha baskın olduğunu göstermektedir. $Ri \approx 1$ durumu ise hem doğal taşınım hem de zorlanmış taşınım etkilerinin her ikisinin de aynı öneme sahip olduğu karışık taşınım durumunu ifade etmektedir.

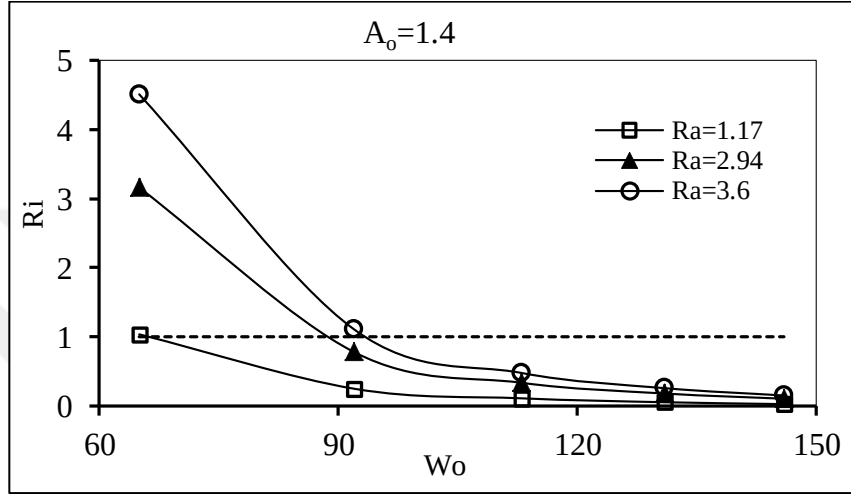
Bu çalışmada, düşey periyodik salınıma sahip levhanın genlik ve frekansının Ri sayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 3.14’de $Ra=3.6 \times 10^7$ için farklı genlik ve frekansların Ri sayısına etkisi gösterilmektedir. Salınım genliğinin Ri sayısı üzerinde hiçbir etkisi olmadığı ancak frekansın Ri sayısını önemli derecede etkilediği görülmektedir. Düşük frekanslarda, Ri sayısının yüksek olduğu, dolayısı ile ısı transferinde doğal taşınım etkilerinin daha baskın olduğu görülmektedir. Salınım frekansının $Wo=92$ değeri için Ri sayısı 1’e yaklaşmaktadır. Bu durumda ısı transferinde hem doğal taşınım hem de zorlanmış taşınım etkilerinin eşit olduğu karışık taşınım sözkonusudur. Daha sonra ise salınım frekansının artması ($Wo \geq 113$) ile birlikte Ri sayısı giderek azalmakta ve ısı transferinde doğal taşınım etkileri azalarak zorlanmış taşınım baskın hale gelmektedir.



Şekil 3.14. Salınım genliği ve frekansının Ri sayısı üzerindeki etkisi.

Şekil 3.15’de ise sabit bir genlik ($A_0=1.4$) için farklı Ra sayılarında ($Ra \times 10^7$) Wo sayısının Ri sayısına etkileri görülmektedir. Düşük frekansta ($Wo=65$) Ra sayısı

arttıkça Ri sayısının arttığı dolayısı ile karışık taşınımında doğal taşınım etkilerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ra sayısının ve salınım frekansının belirli değerleri ($Ra=1.17 \times 10^7$ için $Wo=65$, $Ra=2.94 \times 10^7$ ve $Ra=3.6 \times 10^7$ için $Wo=92$) için Ri sayısının 1'e yaklaştığı görülmektedir. Bu belirli değerlerde ısı transferinde doğal taşınım ve zorlanmış taşınım etkileri eşit derecede öneme sahiptir. Düşük Wo sayılarında, Ra sayısının azalması Ri sayısını daha çok etkilerken, artan Wo sayılarında Ra sayısının azalması Ri sayısını daha az etkilemektedir.



Şekil 3.15. Farklı Ra sayılarında ($Ra \times 10^7$) salınım frekansının Ri sayısına etkisi.

Artan frekansla birlikte tüm Ra sayılarında, Ri sayısı da azalarak referans değerin ($Ri=1$) altına düşmekte, bu da yüzeyden olan ısı transferinde zorlanmış taşınımın daha baskın olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, test edilen en yüksek frekans ($Wo=146$) değerinden sonra, Ra sayısı ve frekansın artması Ri sayısını etkilememektedir. Dolayısı ile $Wo=146$ ve $Ra=3.6 \times 10^7$ değerinden sonra Ra sayısını ve salınım frekansını artırmak Ri sayısını çok fazla değiştirmeyecektir.

3.6 Isı Transferini Etkileyen Fiziksel Parametreler ve Boyutsuz Sayılar

Düşey periyodik salınlı levha için deneylerde ısı geçişine etki eden temel fiziksel büyüklükler belirlenmiş ve Eşitlik (3.13) ile verilmiştir.

$$h = f(\omega, x_m, L, \rho, T_\infty, T_w, \beta, \mu, c_p, k_f, g) \quad (3.13)$$

Bu fiziksel büyüklükler kullanılarak yapılan boyut analizi, EK B'de detaylı olarak verilmiş ve boyut analizi sonucunda, elde edilen boyutsuz sayılar aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

π_1 =Nusselt sayısı

$$\pi_1 = \frac{hL}{k_f} = Nu \quad (3.14)$$

Nusselt sayısı (Nu), taşınım ile ısı transferinin bir ölçüsü olup ısı transferinde en önemli boyutsuz sayıdır. Nu sayısı ne kadar büyük olursa taşınım ile ısı transferi de o kadar etkili olmaktadır.

π_2 =Kinetik Reynolds sayısı

$$\pi_2 = \frac{\rho \omega L^2}{\mu} = Re_\omega \quad (3.15)$$

Kinetik Reynolds sayısı (Re_ω), cisim veya akışkan hareketinde salınımın frekansını ifade eden boyutsuz bir sayıdır. Periyodik salınım hareketinde en önemli parametrelerden biridir. Kinetik Reynolds sayısının kare kökü Womersley sayısı olarak tariflenir ve düşük salınım hızlarında tercih edilmektedir.

π_3 =Prandtl sayısı

$$\pi_3 = \frac{\mu c_p}{k_f} = Pr \quad (3.16)$$

Prandtl sayısı (Pr), hız ve ısı sınır tabakaları içinde yayılım ile momentum ve enerji aktarımının birbirine oranını gösteren boyutsuz bir sayıdır. Akışkanın kimliği olarak da bilinen Pr sayısı sıcaklıkla değişmektedir. Bu çalışmada akışkan olarak hava kullanılmıştır.

π_4 =Boyutsuz genlik

$$\pi_4 = \frac{x_m}{L} = A_o \quad (3.17)$$

Boyutsuz genlik (A_o), volanın genliğinin (x_m) levha uzunluğuna (L) oranı olup periyodik salınım hareketinde en önemli parametrelerden biridir. Isı transferini etkileyen önemli bir boyutsuz sayıdır.

$\pi_5 \times \pi_6 \times \pi_7$ =Grashof sayısı

$$\pi_5 \times \pi_6 \times \pi_7 = \frac{g\beta\Delta TL^3}{g^2} = Gr \quad (3.18)$$

Grashof sayısı (Gr), kaldırma kuvvetlerinin viskoz (sürtünme) kuvvetlerine oranını ifade eden boyutsuz bir sayıdır. Doğal taşınım durumunda kullanılan önemli bir sayıdır ve akış rejimini belirlemektedir.

$$Nu = f(Re_\omega, Pr, A_o, Gr) \quad (3.19)$$

Yapılan boyut analizi sonucunda, çalışmada ısı transferini etkileyen boyutsuz sayılar yukarıdaki gibi elde edilmiştir.

Literatür çalışmalarında periyodik hareketli yüzeylerin veya akışkanların salınım frekansını ifade etmek için genelde Strouhal sayısı (St) veya Womersley sayısı (Wo) kullanılmaktadır. Strouhal sayısı, salınım frekansının büyük değerlerinde tercih edilirken, daha küçük salınım frekansı değerlerinde ise Wo sayısı kullanılmaktadır. Bu çalışmada, levhanın salınım frekansı küçük değerlerde olduğu için Wo sayısı tercih edilmiştir. Çalışmada deneysel düzeneğin limitleri dahilinde beş farklı frekans ($Wo = 65, 90, 113, 131, 146$) kullanılmıştır.

3.7 Belirsizlik Analizi

Bu çalışmada, deneylerde oluşan belirsizliklerin çoğu ölçme hatalarından kaynaklanmaktadır. Deneysel çalışmalarda belirsizlik oranlarının tespiti için farklı yöntemler kullanılmakta olup bunlardan en çok tercih edileni Holman, (2001) tarafından geliştirilen “Belirsizlik Analizi” dir. Bu yöntemde, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R , bu büyüklüğe etki eden bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olmak üzere n adet bağımsız değişkeni ifade eder (Eşitlik 3.20).

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.20)$$

Buna göre toplam belirsizlik Eşitlik (3.21) kullanılarak elde edilmektedir.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

Bu çalışmada, belirsizliğe sebep olan büyüklükler T_w ($^{\circ}C$) levha yüzey sıcaklığı, T_{∞} ($^{\circ}C$) ortam sıcaklığı ve ω (rad/s) açısal hız ölçümlerinden kaynaklanmaktadır. Bu büyüklüklerin ölçümünün deneylerde ne kadar belirsizliğe sebep olduğu

bulunmaktadır. Diğer büyüklüklerin (q'' , k_f gibi) belirsizliğe etkileri çok düşük olduğundan hesaplamalarda ihmal edilmiştir. T_w levha yüzey sıcaklığının sebep olduğu belirsizlik oranının tespitinde, ilk olarak ortalama levha yüzey sıcaklığı Eşitlik (3.22) ile hesaplanmıştır.

$$\bar{T}_w = \frac{T_1 A_1 + T_2 A_2 + T_3 A_3 + T_4 A_4 + T_5 A_5 + T_6 A_6 + T_7 A_7 + T_8 A_8 + T_9 A_9 + T_{10} A_{10} + T_{11} A_{11}}{A_T} \quad (3.22)$$

Daha sonra her bir sıcaklık için ölçülen belirsizliğin toplam yüzey sıcaklığında ne kadarlık bir belirsizliğe sebep olduğu Eşitlik (3.21) ile bulunmuştur. Ortamdaki hava sıcaklığının ortalaması T_∞ için ölçülen anlık sıcaklıkların ortalaması alındığından belirli bir belirsizlik oranı belirlenmiştir. Benzer şekilde frekansı temsil eden açısal hız, ω (rad/s) için de belirli bir belirsizlik oranı kullanılmıştır.

Nusselt sayısının belirsizliği;

Deneylerde elde edilen sıcaklık ölçümlerine göre Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Burada, levhanın periyodik salınımlarının da etkisinin görülebilmesi için Nu sayısı, Wo sayısı ile birlikte analiz edilmiştir. Bu durumda belirsizlik hesabına esas, ortalama Nusselt sayısı Eşitlik (3.23) ile aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$Nu_m = \frac{q'' L^2 \omega^{1/2}}{k_f (\bar{T}_w - T_\infty) \theta^{1/2}} \quad (3.23)$$

Burada belirsizliğe sebep olan parametreler; T_w , T_∞ ve ω olup belirsizlik oranları ayrı ayrı tespit edilmiştir. Her bir parametrenin belirsizlik oranlarının her deney için Nu sayısı hesabında ne kadar belirsizliğe sebep olduğu Eşitlik (3.24) ile hesaplanmıştır.

$$w_{Nu} = \left[\left(\frac{\partial Nu}{\partial T_\infty} w_{T_\infty} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_w} w_{T_w} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \omega} w_\omega \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.24)$$

Yapılan her bir deney için hesaplanan belirsizlik miktarları EK. C'de Çizelge C.1'de verilmiştir. Deney_1 için yapılan belirsizlik hesabının sayısal değerleri aşağıda örnek olarak verilmiştir.

$$w_{Nu} = [((-97.68)(0.3015))^2 + ((294.66)(0.25))^2 + ((2731.387)(0.223))^2]^{1/2}$$

$$w_{Nu} = 614.48 \quad (3.25)$$

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \%7.18 \quad (3.26)$$

Hesaplama sonucunda Deney_1 için belirsizlik miktarı % 7.18 olarak bulunmuştur. Diğer parametreler için yapılan belirsizlik miktarları detaylı olarak EK C’de tablo halinde verilmiştir (Çizelge C1).

Çizelge C1’den test edilen tüm ısı akıları için frekans arttıkça belirsizlik oranının azaldığı, yüksek ısı akılarında ise deneylerdeki belirsizliğin arttığı görülmektedir. Yapılan çalışmada test edilen tüm parametrelerin değerlendirilmesi sonucunda deneylerdeki toplam ortalama belirsizlik % **4.25** olduğu tespit edilmiştir.

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \% 4.25 \quad (3.27)$$

Bu oranın kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı söylenebilir.

4. SAYISAL ÇALIŞMA

4.1 Giriş

Bu bölümde, düşey yönde periyodik hareketli düz levha üzerinde karışık taşınım ile oluşan ısı geçişi, deneysel parametreler esas alınarak sayısal olarak incelenmektedir. Kullanılan sayısal yöntemin prensibi, diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılarak iterasyonla çözülmesi esasına dayanmaktadır. Bunun için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiz yöntemine göre çözüm yapan ANSYS FLUENT 18.2 ticari yazılımı kullanılmaktadır. Bu programda süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılmaktadır (Ansys Fluent, 2018).

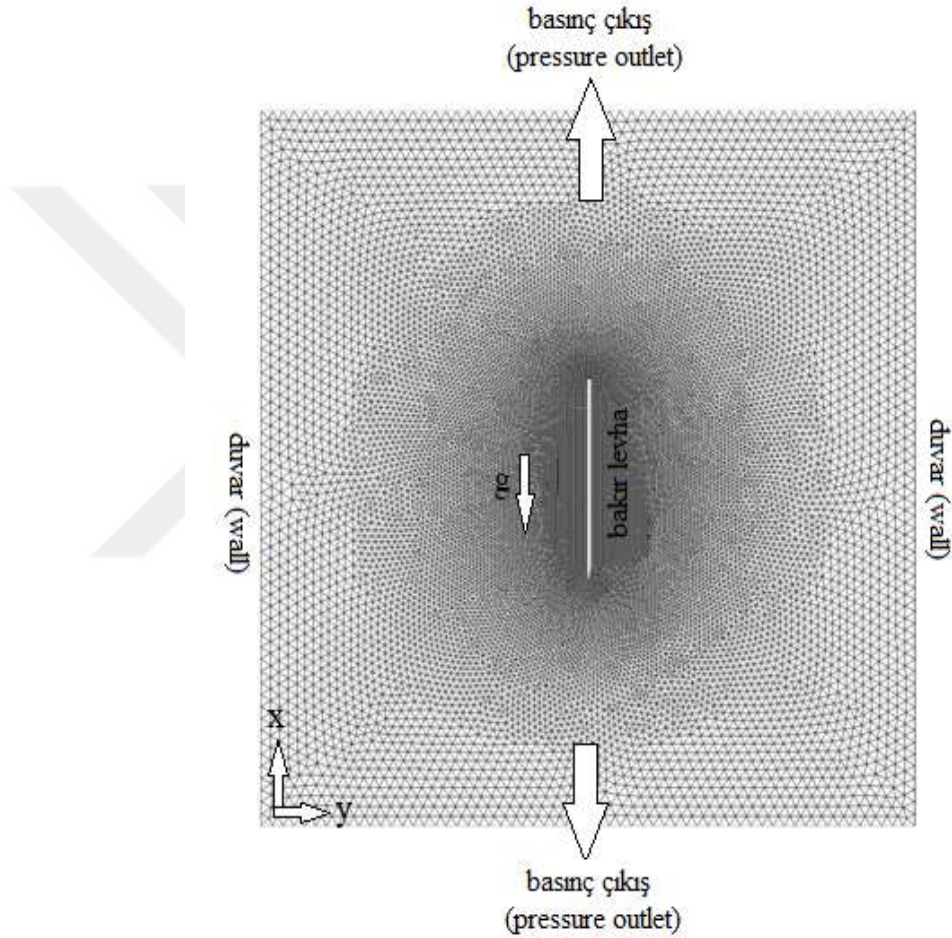
Sayısal problemlerde, çözüm alanına ait herhangi bir sınır üzerinde, bir hareketin tariflenmesi ya da bir akışkan içerisinde katı bir cismin yerçekiminin etkisiyle serbest düşme olayı veya katı cismin kullanıcı tarafından tanımlanmış (udf: user defined function) lineer ya da rotasyonel hareketinin tariflenmesi için hareketli ağ yapısından yararlanılmaktadır. Hareketli ağ modelinde sınırların yeni pozisyonlarına göre her zaman adımında program tarafından otomatik olarak mevcut ağ yapısı güncellenmektedir. Bunun için programda modele ait hareketli sınırların ya da katı cismin hareketinin tariflenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, deneysel geometriye bağlı olarak iki boyutlu sayısal çözüm alanının çizilmesi ve hücrelere bölünmesi (mesh) Workbench programı ile yapılmıştır. Sayısal model için şeffaf muhafaza $800 \times 800 \text{ mm}^2$ ölçülerinde iki boyutlu olarak düşünülmüştür. Bu muhafaza içerisine 210 mm uzunluğunda ve 4 mm kalınlığında bakır levha düşey olarak yerleştirilmiştir. Oluşturulan sayısal model ve uygulanan ağ yapısı sınır şartları ile birlikte Şekil 4.1’de verilmiştir. Sayısal modelin ağ yapısında, üçgen mesh yapısı kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Grid bağımsızlığı testi.

<i>No</i>	<i>Eleman Sayısı</i>	<i>Nu sayısı</i>
1	11699	110.78
2	24518	113.25
3	31625	114.12
4	48228	114.27
5	68284	114.29

Grid bağımsızlığını sağlamak, optimum hücre sayısı ve büyüklüğünü tespit etmek amacıyla farklı eleman sayılarında testler uygulanmış ve elde edilen Nu sayıları karşılaştırılmıştır. Bunun için $H/L=2$ konumunda, $Ra=1.17 \times 10^7$ için sabit düşey levhadan doğal taşınım ile elde edilen Nu sayıları hesaplanmıştır. Sayısal modelde, farklı eleman sayıları (hücre) için hesaplanan Nu sayıları Çizelge 4.2 ile verilmiştir. 31625 eleman sayısından sonra Nu sayısındaki değişimin % 1' den az olduğu tespit edilerek bu çalışmada sabit levha için 31625 eleman sayısı tercih edilmiştir.



Şekil 4.1. Sayısal modelin ağ yapısı ve sınır şartları.

Sayısal çalışmalarda modele uygulanan mesh yapısının kalitesini kontrol etmek için bazı parametrelerden yararlanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanı orthogonal quality, skewness, aspect ratio ve grid bağımsızlığıdır. Orthogonal quality ve skewness 0 ile 1 arasında herhangi bir değer olup orthogonal quality değeri 1'e, skewness değeri ise 0'a doğru yaklaştıkça mesh kalitesi artmaktadır. Genel olarak düşük orthogonal quality ve yüksek skewness değerleri önerilmemektedir. Aspect ratio ise iki boyutlu ağ yapısındaki her bir hücre uzunluğunun hücre enine oranını

gösterir ve bu oran 1'e yaklaştıkça mesh kalitesi artmaktadır. Yapılan çalışmada sayısal modelin hücrelere bölme işlemi sonucunda minimum orthogonal quality=0.713, maksimum aspect ratio=2.7 ve maksimum skewness= 0.32 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin de normal sınırlar içinde kaldığı söylenebilir.

Hareketli mesh modeli, sürekli yenilenen ağ yapısından dolayı daima zaman bağlı çözüm gerektirmektedir. Bu nedenle akışın zamana bağlı olduğu kabul edilerek, kullanılan eşitliklerin çözümünde basınç tabanlı çözücü (pressure-based solver) tipi kullanılmıştır. Çözüm metodu için PISO algoritması tercih edilmiştir. Basınç, momentum ve enerji denklemlerinin ayrıklaştırılmasında Second Order Upwind şema kullanılmıştır. Yakınsama kriteri olarak enerji eşitliklerinde 10^{-8} , momentum eşitliklerinde 10^{-5} ve süreklilik denkleminde 10^{-3} kullanılmıştır.

Sayısal çalışmada akışkan olarak kullanılan havanın termofiziksel özellikleri için dış ortam sıcaklığı değerleri referans alınmıştır. Çözümlere doğal taşınım etkilerini de dahil etmek için akışkan yoğunluğunu sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlayan Boussinesq yaklaşımı seçilmiştir.

Sayısal model için tariflenen sınır şartlar Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Deneysel modelde şeffaf muhafazanın alt ve üst kısımları açık olduğundan, sayısal modelde bu sınırlara basınç çıkış (pressure outlet) sınır şartı uygulanmıştır. Düşey levha için sabit ısı akısı sınır şartı tariflenmiştir. Diğer sınırlar için duvar sınır şartı (wall) girilmiş ve kaymama sınır şartı tariflenmiştir.

Bu çalışmada hava tabakası içerisinde bakır levhanın düşey yönde periyodik hareketini tariflemek için kullanıcı tanımlı fonksiyon (udf) dosyası oluşturulmuş ve zamana bağlı hız profili Eşitlik (4.1) ile tariflenmiştir.

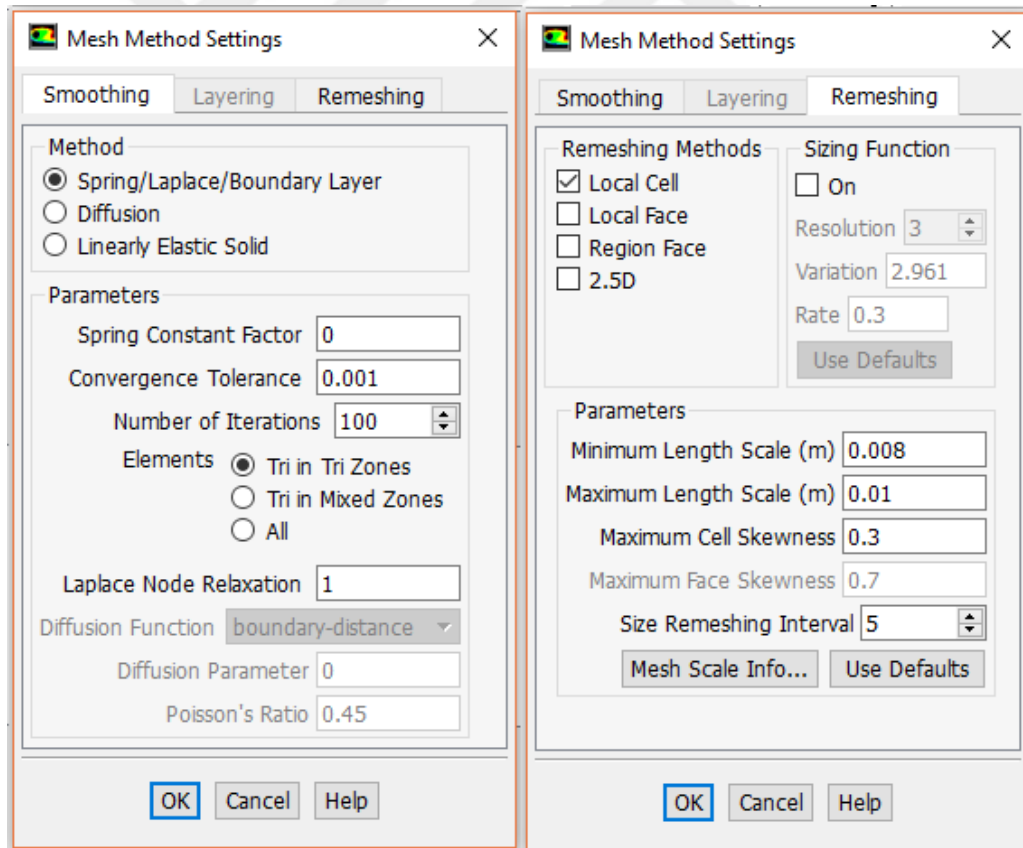
$$u_w = A_o \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

Burada A_o , boyutsuz salınım genliğini, ω ise açısal hızı göstermektedir.

Sayısal çalışmalarda, Ra sayısı, salınımın genliği (A_o) ve frekansı (Wo) değiştirilerek düşey hareketli levha üzerindeki akış ve ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir.

Hava tabakası içerisindeki bakır levhanın (rigid body) periyodik hareketi için programda hareketli ağ yapısı (dinamik mesh) aktif hale getirilmiştir. Hareketli mesh

modelinde Smoothing ve Remeshing metodu uygulanmıştır. Smoothing metod için Spring/Laplace yöntemi, Remeshing metodunda ise Local Cell yöntemi kullanılmıştır. Smoothing Spring yaklaşımı küçük sınır deformasyonlarında tercih edilen bir yöntemdir. Bu yaklaşımda cismin ya da sınırın hareketi boyunca hücrelerin bağlantıları ve sayısı değişmez yani sabit kalmaktadır. Hareketli hücreler yay hareketine benzer şekilde uzayıp kısalmaktadır. Daha büyük deformasyonlarda Smoothing metodunun Remeshing metod ile birlikte kullanılması gerekmektedir. Remeshing metod ise hareketli sınır ya da cisimlerden dolayı çarpık olan hücrelerin yeniden yapılanmasında kullanılmaktadır. Bu metod, tri/tet mesh yapısı içeren, sınır hareketi büyük olan hücrelerin yenilenmesinde tercih edilmektedir. Cismin periyodik hareketi sırasında deforme olan bölgelerdeki mevcut ağ yapısı, belirtilen parametreler doğrultusunda sürekli olarak yenilenmektedir. Dinamik mesh modeli için kullanılan metodlar ve parametreler Şekil 4.2’de detaylı olarak verilmiştir (Fluent User Manuel, 2018).



a

b

Şekil 4.2. Çalışmada kullanılan dinamik mesh metodları, a-Smoothing method, b-Remeshing method.

Şekil 4.2b’de Remeshing method ile yenilenen ağ yapılarına ait parametreler gösterilmektedir. Burada “Local cell” Remeshing metodu sınırların değişmediği bir alan içerisinde katı bir cismin hareketi için kullanılmaktadır. Remeshing metodundaki parametreler için “mesh scale info...” ile belirtilen değerlerin referans alınması tavsiye edilmektedir. Ancak çözümün hassasiyeti için bu çalışmada referans değerlerden daha düşük değerlerin kullanılması tercih edilmiştir. Çözümdeki ağ yapısı dikkate alındığında hareketli ağ yapısı sonucu deforme olan hücrenin minimum uzunluk değeri belirtilen değer altındaysa, ya da maksimum uzunluk değeri veya maksimum hücre çarpıklığı (skewness) belirtilen değer üzerindeyse hücrelerin ağ yapısı yenilenmektedir.

4.2 Matematik Model

Düşey yönde periyodik hareketli, iki boyutlu, düz bir levha üzerinden geçen zamana bağlı, karışık taşınım akışı için, fiziksel özellikler sabit ve viskoz yayılım etkisi ile Boussinesq yaklaşımına göre kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_\infty) \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.5)$$

Burada u , v sırasıyla x , y yönündeki hız bileşenlerini göstermektedir. Sıcaklık T , ve ısı genleşme katsayısı, β ile gösterilmiştir. İdeal gazlar için ısı genleşme katsayısı değeri $\beta=1/T_f$ ile hesaplanır ve T_f akışkanın film sıcaklığını ifade etmektedir. Isı yayılım katsayısı $\alpha=k/\rho c_p$ olup ve eşitlikteki ρ , c_p , k ve ν ifadeleri sırasıyla yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve kinematik viskoziteyi göstermektedir.

Sayısal çalışmada öncelikle $H/L=2$ konumunda sabit düşey levha için ortalama yüzey sıcaklığı elde edilmiştir. Daha sonra bu yüzey sıcaklığı kullanılarak doğal taşınım ile

elde edilen ısı transfer miktarı hesaplanmıştır. Doğal taşınım ile elde edilen Nu sayısı referans alınarak, düşey yönde periyodik salınımlı levha yüzeyinde meydana gelen karışık taşınım ile olan ısı transferi miktarının sabit levha yüzeyinden elde edilen ısı transferi miktarına oranı belirlenmiştir. Bu oran, ısı transferi performansı olarak tariflenmiş olup ısı transferindeki iyileşme miktarını göstermektedir.

Sayısal model için belirtilen sınır şartlar tariflendikten sonra Eşitlik (4.2)-(4.5) ile verilen kütle, momentum ve enerji denklemleri Fluent programı ile sayısal olarak çözülmüştür. Çözüm sonuçlarını değerlendirmeden önce başlangıç şartlarından uzaklaşmak ve geçici rejim etkisini bertaraf etmek için belli sayıda iterasyonun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada 0.01 zaman adımında akış zamanı 2700 s değerine ulaşana kadar tüm çözümler için iterasyonlar devam etmiştir. Daha sonra levha üzerinde yüzey ortalama sıcaklık değerleri okunarak ısı transferi miktarı hesaplanmıştır. Levhanın periyodik hareketinden dolayı yüzeyinde periyodik akış meydana gelmektedir, çözümlerin değerlendirilmesinde de bir periyodu içeren zaman dilimi kullanılmıştır. Bir periyod levha salınım hareketinin tamamlandığı bir çevrimi ifade etmektedir. Bunun için bir çevrim açısal hız, frekans ve faz açısı cinsinden $\phi = \omega t = 2\pi f t = 360^\circ$ olarak tariflenmiştir. Sayısal çalışmada, çeşitli salınım parametrelerine bağlı olarak bir çevrim boyunca elde edilen anlık sıcaklık değerleri ile anlık hız ve sıcaklık görüntüleri sunulmuştur.

Hareketli ağ (Dinamik mesh) yapısını içeren çözümlerde en uygun viskoz çözüm modelinin belirlenmesi için öncelikle çeşitli türbülans modellerinde çözümler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

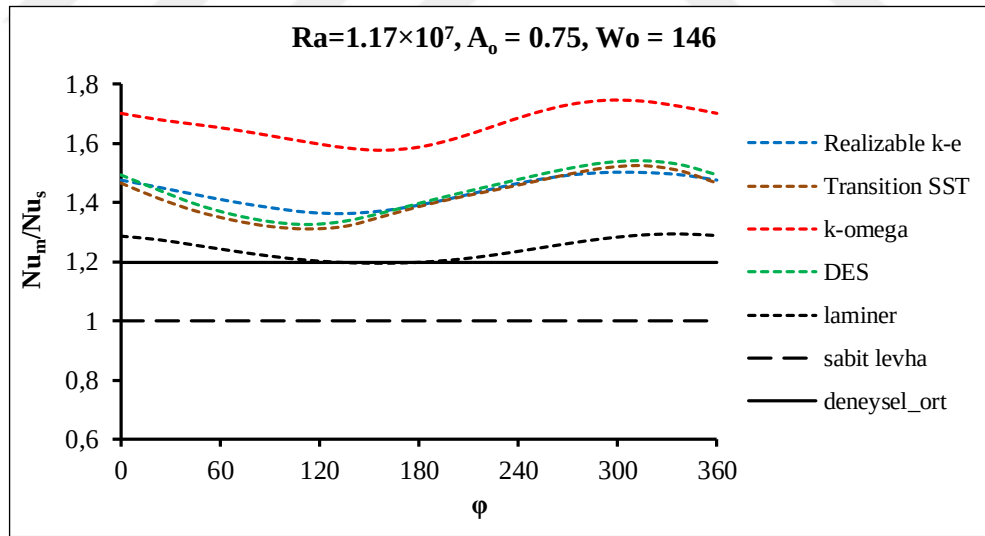
Türbülans modellerinin çözümünde $Ra = 1.17 \times 10^7$ için, salınım genliği $A_0 = 0.75$ ve salınım frekansı $Wo = 146$ değeri için çözümler gerçekleştirilmiştir. Viskoz modellerden a) Detached Eddy Simulation (DES) türbülans modeli, b) Realizable k-epsilon türbülans modeli, c) k-omega türbülans modeli, d) Transition SST türbülans modeli kullanılarak sayısal çözümler tekrarlanmıştır ve her bir model için ısı transferi performansı hesaplanmıştır. Daha sonra aynı parametreler için laminar akış şartlarında çözümler gerçekleştirilerek ısı transferi performansı hesaplanmıştır. Simülasyonları yapılan tüm viskoz modellerin çözümü sonucunda elde edilen ısı transferi performansları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Türbülans modelleri çözümü sonucunda elde edilen ısı transferi performans değerlerinin, deneysel çözüm sonucundan oldukça yüksek olduğu, deneysel sonuca en yakın ısı transferi performans değerinin laminar akış modelinde elde edildiği tespit edilmiştir. Farklı çözüm metotları sonucu elde edilen ısı transferi performansının karşılaştırması ve bu sonuçların deneysel sonuçlara göre yüzde değişimi Çizelge 4.2 ile verilmiştir.

Çizelge 4.2. Farklı çözüm metodlarının karşılaştırılması.

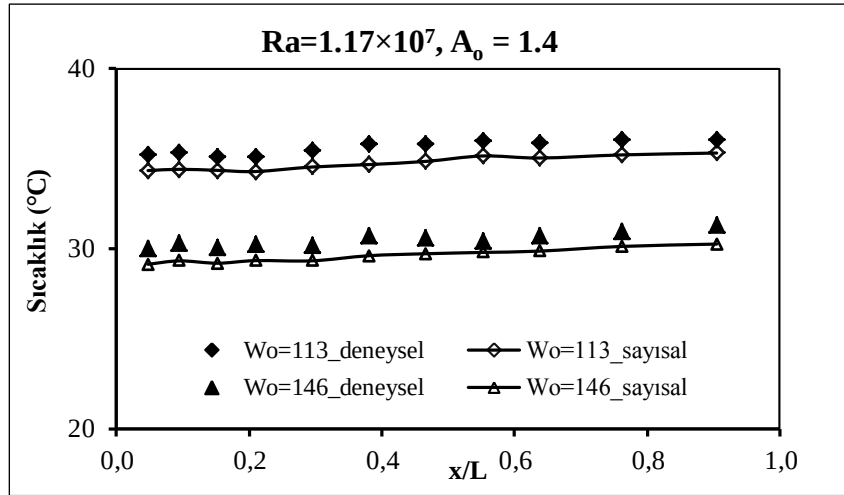
Çalışma türü	Çözüm Metodu	Nu_w/Nu_s	% değişim
Deneyisel	-	1.1973	-
Sayısal	Laminer	1.2438	3.7370
Sayısal	Transition SST türbülans modeli	1.4183	12.3062
Sayısal	DES türbülans modeli	1.4370	16.6799
Sayısal	Realizable k-e türbülans modeli	1.4384	16.7589
Sayısal	k-omega türbülans modeli	1.6635	28.0231

Şekil 4.3’de $Ra=1.17 \times 10^7$, $A_0=0.75$ ve $Wo=146$ için farklı çözüm modellerinde, bir çevrim boyunca ($\varphi=360^\circ$) elde edilen ısı transferi performansları, deneysel ortalama ve sabit levhanın ısı transferi performansı ile karşılaştırılarak verilmiştir.



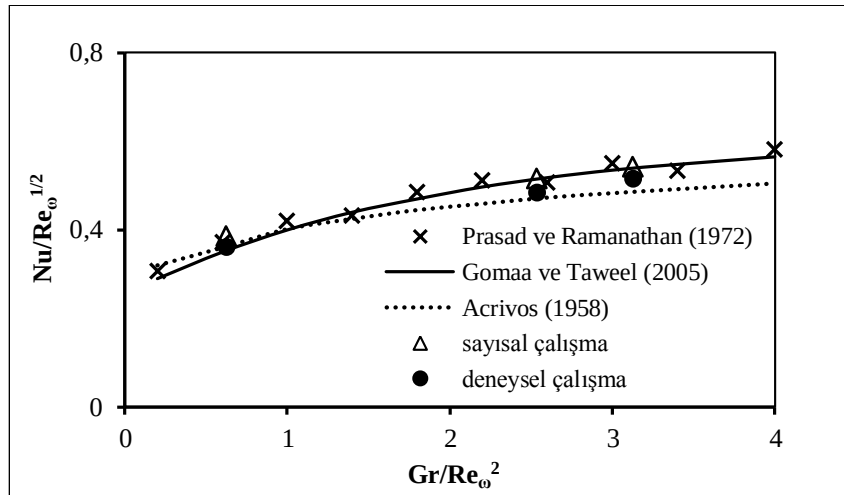
Şekil 4.3. Farklı çözüm modellerinin ısı transferi performansının karşılaştırılması.

Deneyisel sonuçlardan en fazla sapma gösteren çözüm modeli k-omega türbülans modeli olduğu tespit edilmiş ve çözümlerde deneysel sonuçlarla daha uyumlu olması nedeniyle laminar akış modeli tercih edilmiştir.



Şekil 4.4. DeneySEL ve sayısal olarak levha yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması.

Şekil 4.4' de, $Ra=1.17 \times 10^7$ ve $A_0=1.4$ sabit değerleri için deneySEL ve sayısal çalışmada elde edilen iki farklı salınım frekansında levha yüzeyindeki sıcaklık dağılımları karşılaştırılmıştır. Her iki çalışma için yüzey üzerinde elde edilen sıcaklık değerleri birbirine oldukça yakındır. Sıcaklık değerleri arasındaki fark $\Delta T = \pm 0.83$ °C civarında olduğu tespit edilmiştir. DeneySEL çalışmada yüzey sıcaklığındaki ölçme belirsizliğinin yada sayısal çözüm hatalarının bu farka neden olduğu düşünülmektedir.



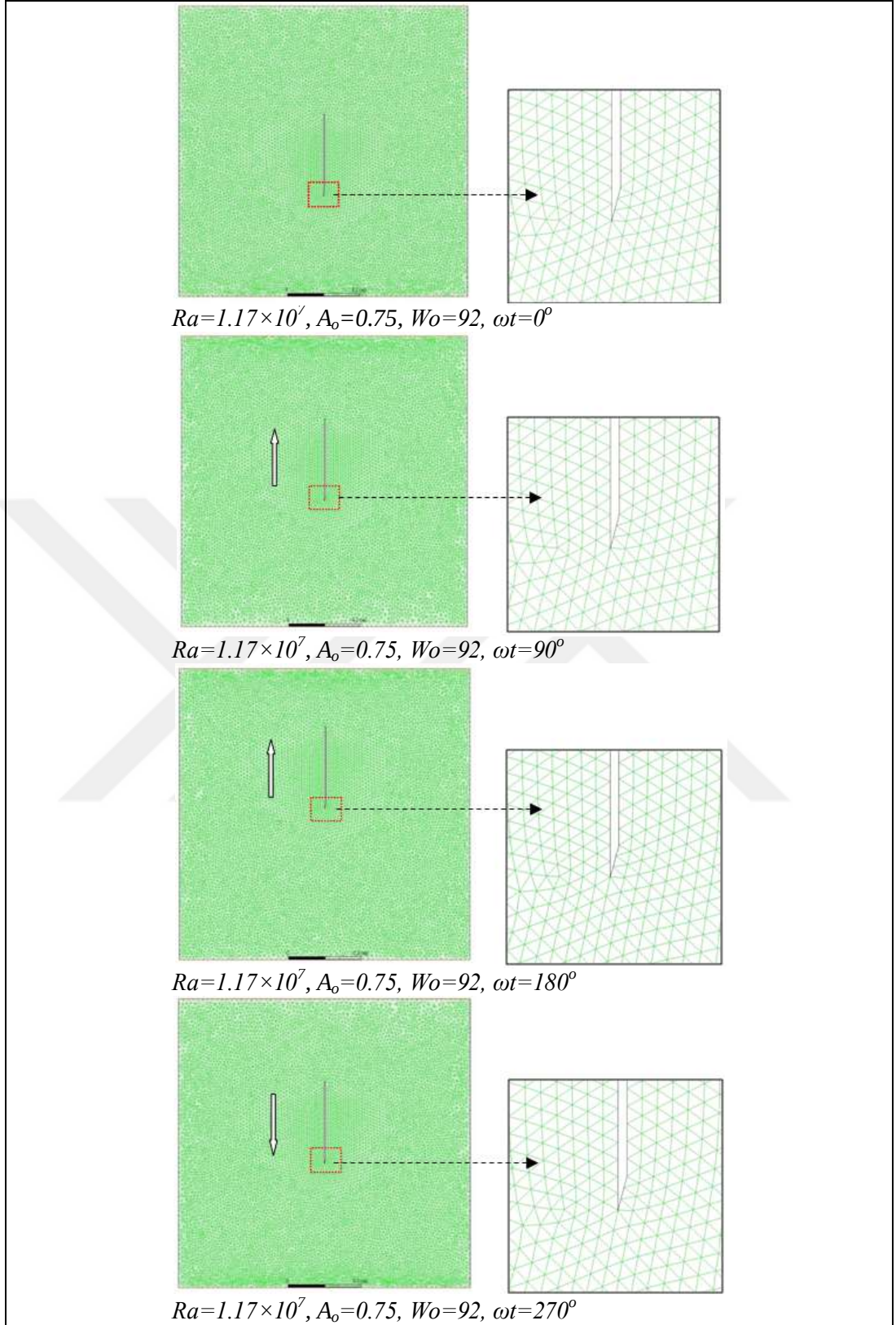
Şekil 4.5. Sayısal ve deneySEL sonuçların literatür çalışmaları ile karşılaştırılması.

Bu çalışmada elde edilen deneySEL ve sayısal sonuçlar, Acrivos, (1958) yaklaşımı, Goma ve Taweel, (2005) tarafından yapılan teorik çalışma sonuçları ve Prasad ve Ramanathan, (1972) tarafından yapılan deneySEL çalışma sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada en düşük Re_ω değeri ($Re_\omega=4000$) sabit tutularak üç farklı Gr sayısı için $Nu/Re_\omega^{1/2}$ değeri hesaplanmıştır. Elde edilen

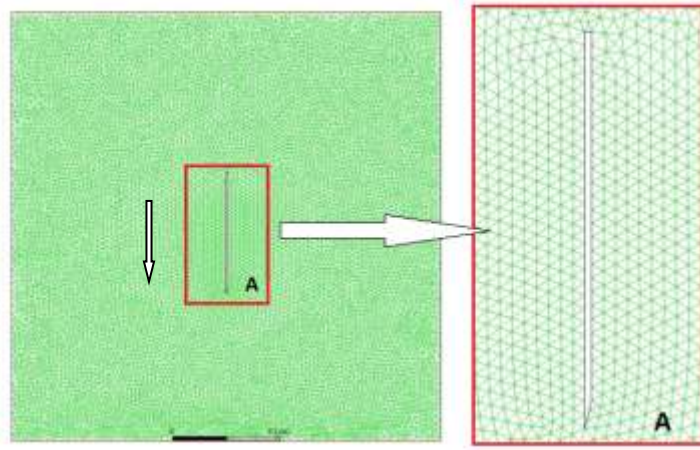
deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının literatür sonuçları ile karşılaştırması Şekil 4.5’de verilmiştir. Şekilden de sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

Şekil 4.6’da $Ra=1.17 \times 10^7$, $A_o=0.75$, $Wo=92$ sabit değerleri için bir çevrim boyunca ağ yapısının görüntüsü verilmiştir. Levhanın çözüm alanı içerisindeki hareketi sırasında ağ yapısı daha önce belirtilen parametreler doğrultusunda sürekli olarak yenilenmektedir. Şekillerden bir çevrim boyunca sürekli yenilenen ağ yapısının çok küçük hücrelere ayrıldığı ve oldukça düzgün dağılımlı olduğu görülmektedir.





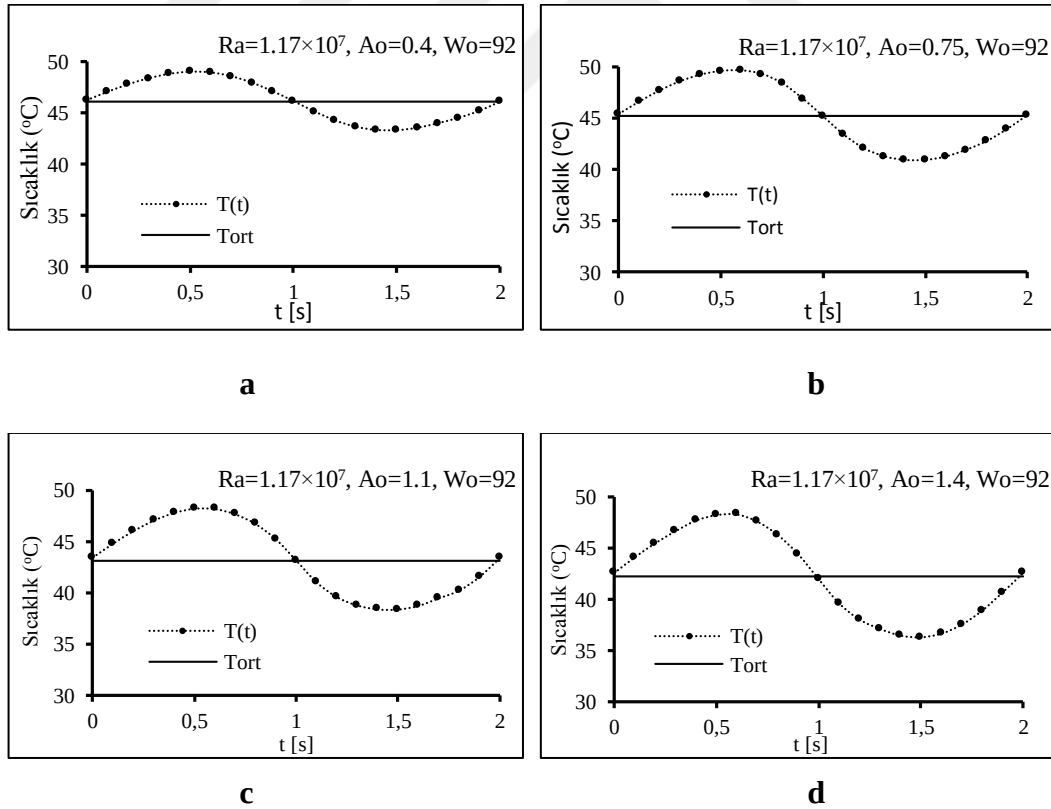
Şekil 4.6. Bir çevrim boyunca hareketli ağ yapısı ($Ra=1.17 \times 10^7$, $A_0=0.75$, $Wo=92$).



$$Ra=1.17 \times 10^7, A_o=0.75, Wo=92, \omega t=360^\circ$$

Şekil 4.6 (devamı). Bir çevrim boyunca hareketli ağ yapısı ($Ra=1.17 \times 10^7$, $A_o=0.75$, $Wo=92$).

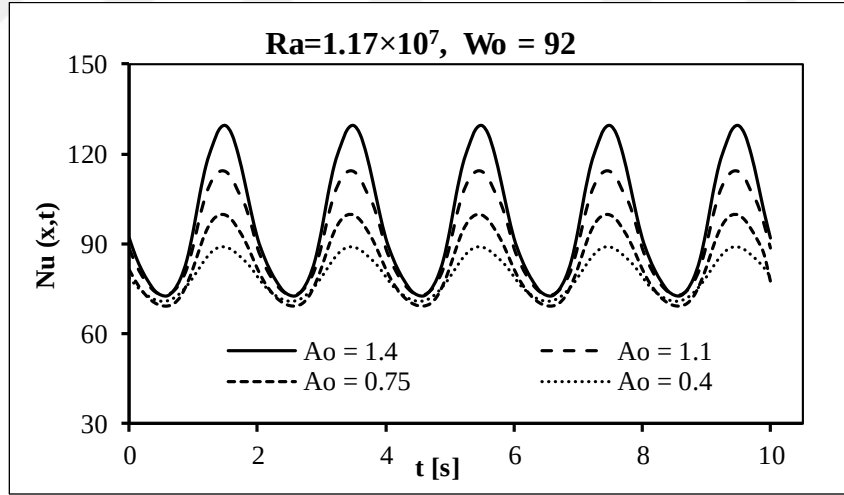
Şekil 4.7’de, $Ra=1.17 \times 10^7$ ve $Wo=92$ salınım frekansı için bir çevrim boyunca farklı salınım genlikleri ile levha yüzeyinde elde edilen anlık ve ortalama sıcaklıkların değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Bir çevrim boyunca salınım genliği ile levha yüzeyindeki anlık ve ortalama sıcaklıkların değişimi, a- $A_o=0.4$, b- $A_o=0.75$, c- $A_o=1.1$, d- $A_o=1.4$.

Şekillerden tüm salınım genlikleri için bir çevrim boyunca elde edilen anlık sıcaklıkların sinüzoidal olarak değiştiği ve salınım genliğinin azalması ile anlık sıcaklık eğrisinin genliğinin de azaldığı görülmektedir. Ayrıca salınım genliğinin artması ile levhanın ortalama yüzey sıcaklığı da azalmaktadır. Bu durum salınım genliğinin ısı transferi üzerinde önemli etkisinin olduğunu ve artan genliklerde düşen yüzey sıcaklıkları ile ısı transferinin iyileştiğini göstermektedir.

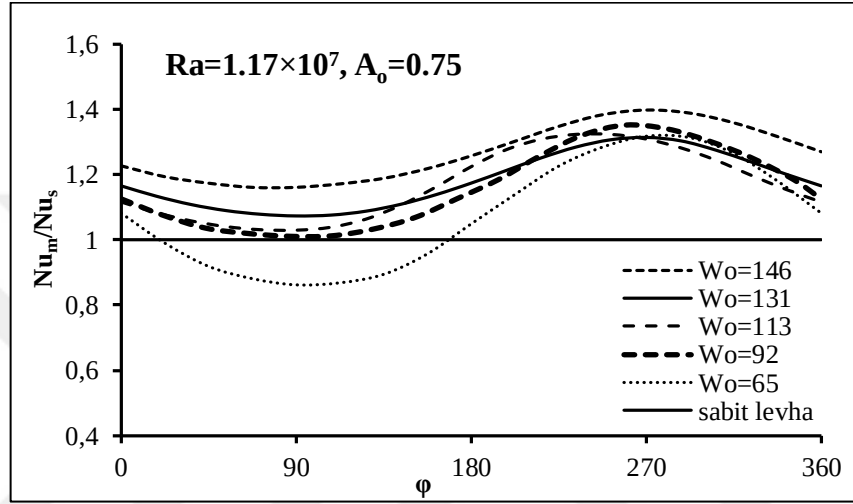
Şekil 4.8’de $Ra=1.17 \times 10^7$ ve $Wo=92$ salınım frekansı için farklı salınım genlikleri ile levha yüzeyinde elde edilen anlık Nu sayılarının değişimi gösterilmiştir. Her salınım genliğinde, Nu sayısının sinüzoidal ve periyodik olarak değiştiği gözlenmiştir. Salınım genliği arttıkça sinüzoidal eğrinin genliği de artmaktadır. Salınım genliği arttıkça, levha düşey yönde daha büyük mesafede salınım hareketi yaptığı için bu durum yüzeydeki sıcaklık aralığının daha büyük olmasına neden olmakta ve böylece elde edilen anlık Nu sayıları da geniş bir aralıkta değişmektedir. Levhanın düşük salınım genliğinde ise tersi durum söz konusudur. Düşük genliklerde levha daha küçük mesafede salınım yaptığı için yüzey sıcaklıkları dolayısı ile Nu sayıları daha küçük aralıkta değişmektedir.



Şekil 4.8. Farklı salınım genlikleri için zamanla Nu (x,t) sayısının değişimi.

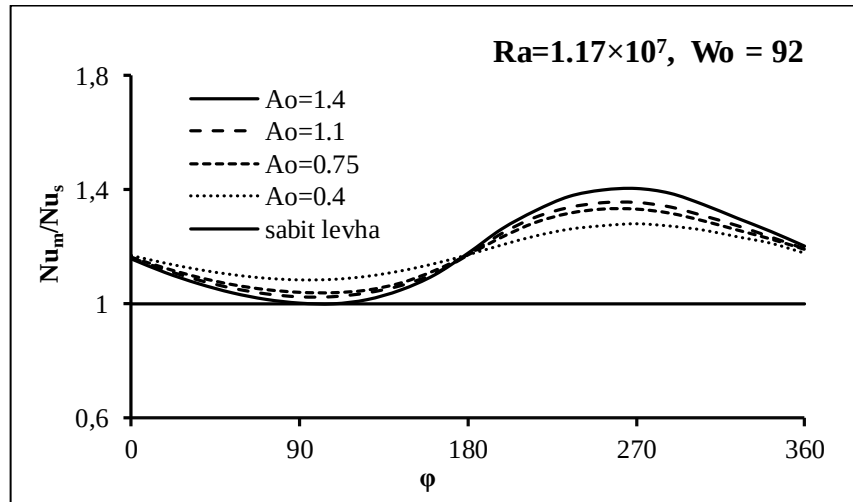
Şekil 4.9’da düşey salımlı levhanın sabit genlik ($A_o=0.75$) ve sabit Ra sayısında ($Ra=1.17 \times 10^7$), salınım frekansı ile bir çevrim boyunca ısı transferi performansındaki değişim, sabit levha ile karşılaştırılarak verilmiştir. Salınım frekansının ısı transferi üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Yüksek frekanslarda ortalama ısı transferi performansının daha yüksek olduğu ve frekansın

azalması ile ısı transferi performansı eğrisinin genliğinin arttığı görülmektedir. Yüksek frekanslarda levhanın salınım hızı yüksek olduğundan ısı transferi performansı eğrisi de daha düşük genliklerde dalgalanmakta, frekans düştükçe levhanın salınım hızı da düşmekte ve bu sefer ısı transfer performansı eğrisi yüksek genliklerde dalgalanmaktadır. Salınım frekansının artması, sınır tabakadaki akışkan ile etrafındaki soğuk akışkan arasındaki karışımı artıracaktır ve yüksek hızlarda daha hızlı bir karışım olacağından bu durum ısı transferini de artmasına neden olacaktır.



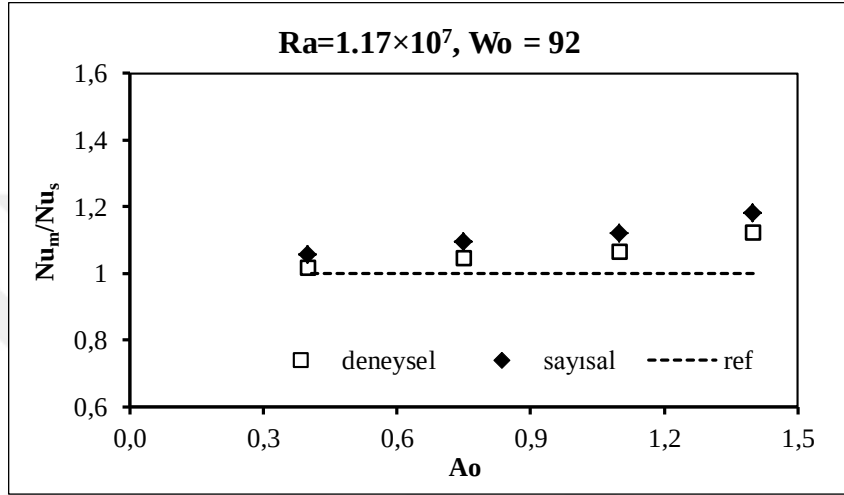
Şekil 4.9. Bir çevrim boyunca frekansla ısı transferi performansının değişimi.

Şekil 4.10'da düşey salınlı levhanın sabit frekans ($Wo=92$) ve sabit Ra sayısında ($Ra=1.17 \times 10^7$), salınım genliği ile bir çevrim boyunca ısı transferi performansındaki değişim, sabit levha ile karşılaştırılarak verilmiştir.



Şekil 4.10. Bir çevrim boyunca genlik ile ısı transferi performansının değişimi.

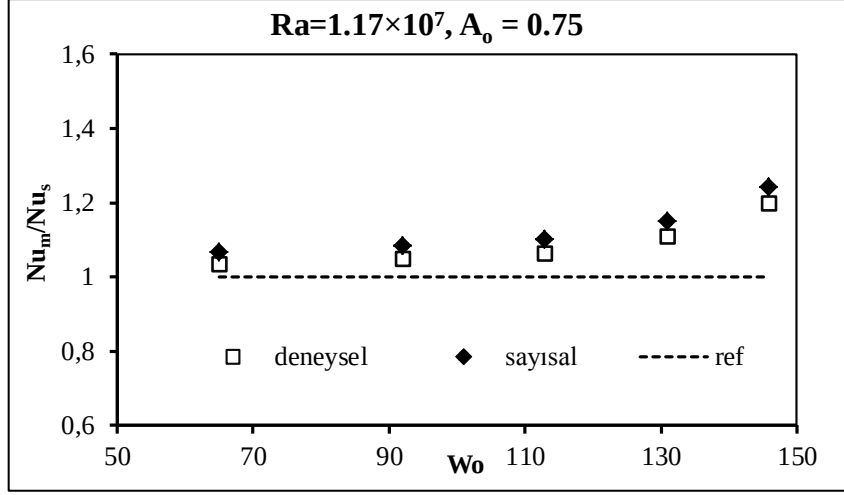
Yüksek genliklerde ortalama ısı transferi performansının daha yüksek olduğu ve genliğin azalması ile ısı transferi performans eğrisinin genliğinin azaldığı görülmektedir. Yüksek genliklerde levhanın daha fazla deplasman yaptığından ısı transferi performansı eğrisi de daha yüksek genliklerde dalgalanmakta, genlik düştükçe ısı transfer performansı eğrisi de düşük genliklerde dalgalanmaktadır. Bu durum, salınım genliğinin ısı transferi iyileşmesi üzerinde oldukça önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



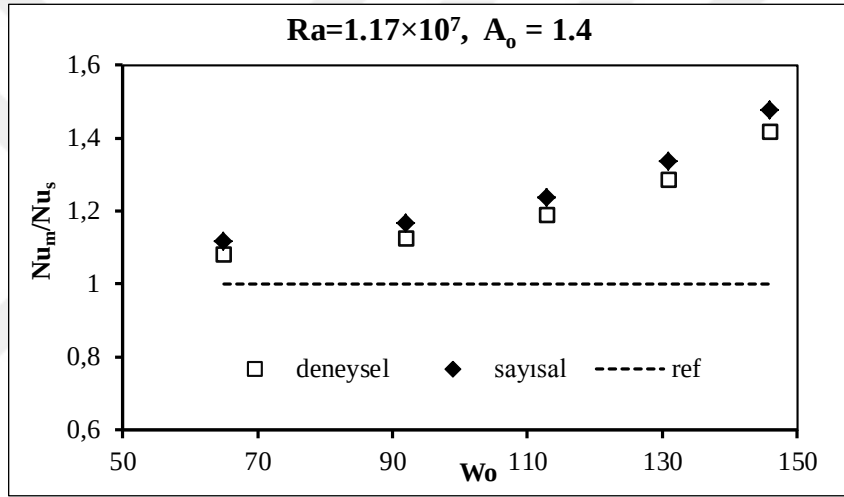
Şekil 4.11. Salınım genliği ile deneysel ve sayısal ısı transfer performansının karşılaştırılması.

Şekil 4.11'de $Ra=1.17 \times 10^7$ ve $Wo=92$ salınım frekansı için salınım genliği ile deneysel ve sayısal çalışmada elde edilen ısı transferi performansının değişim sabit levha ile karşılaştırılarak verilmiştir. Sayısal çözümlerde de salınımın genliği arttıkça ısı transferi performansı artmaktadır. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar ile sayısal çözüm sonuçları oldukça iyi bir uyum göstermektedir. Her iki sonuçlar arasındaki farkın, deneysel belirsizliklerden ve/veya sayısal çözüm hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 4.12a'da $A_o=0.75$ ve Şekil 4.12b'de ise $A_o=1.4$ sabit genliklerinde, $Ra=1.17 \times 10^7$ için, salınım frekansları ile ısı transferi performansındaki değişim, deneysel ve sayısal sonuçlara göre karşılaştırılmıştır.



a

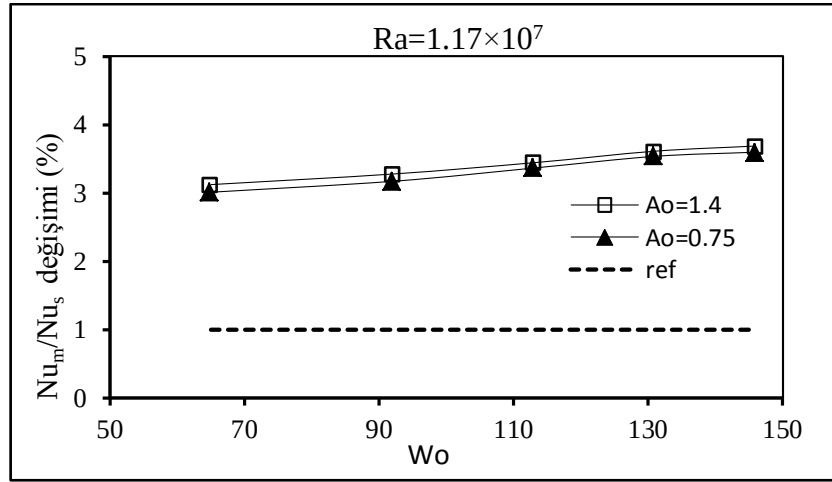


b

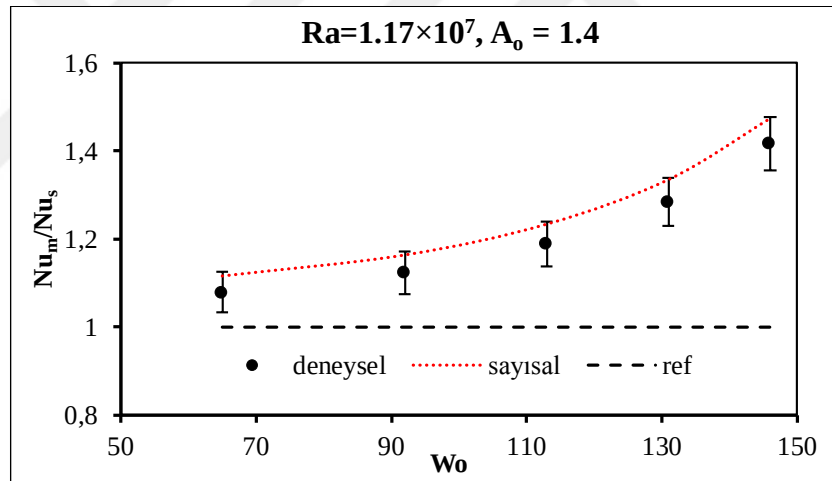
Şekil 4.12. Salınım frekansı ile deneysel ve sayısal ısı transferi performansının karşılaştırması, a- $A_0=0.75$, b- $A_0=1.4$.

Deneysel sonuçlarda olduğu gibi, sayısal sonuçlarda da salınım frekansının artması ile ısı transfer performansının arttığı görülmektedir ve her iki çalışma sonuçları arasında iyi bir uyum söz konusudur. Şekil 4.12a'da, $A_0=0.75$ sabit genlik için en yüksek ısı transfer performansı, $Wo=146$ 'da % 24 olarak bulunurken Şekil 4.12b'de $A_0=1.4$ sabit genlik için en yüksek ısı transfer iyileşmesi yine en yüksek frekans olan $Wo=146$ 'da % 47 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.13'de, $Ra=1.17 \times 10^7$ için sayısal ısı transferi performansının deneysel çalışma sonuçları ile yüzde (%) değişimi gösterilmiştir. Isı transfer performansının yüzde değişimi artan Wo sayısı ile hafif artmaktadır. En fazla artış $Wo=146$ için % 3.6 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 13. Sayısal ısı transferi performansının deneysel sonuçlara göre % değişimi. Şekil 4.14’de ısı transferi performansının, sayısal çalışma ile deneysel çalışma sonuçlarının, toplam deneysel belirsizlik oranlarına (% 4.25) göre karşılaştırması verilmiştir. Sayısal sonuçların deneysel belirsizlik sınırları içinde kaldığı görülmektedir.

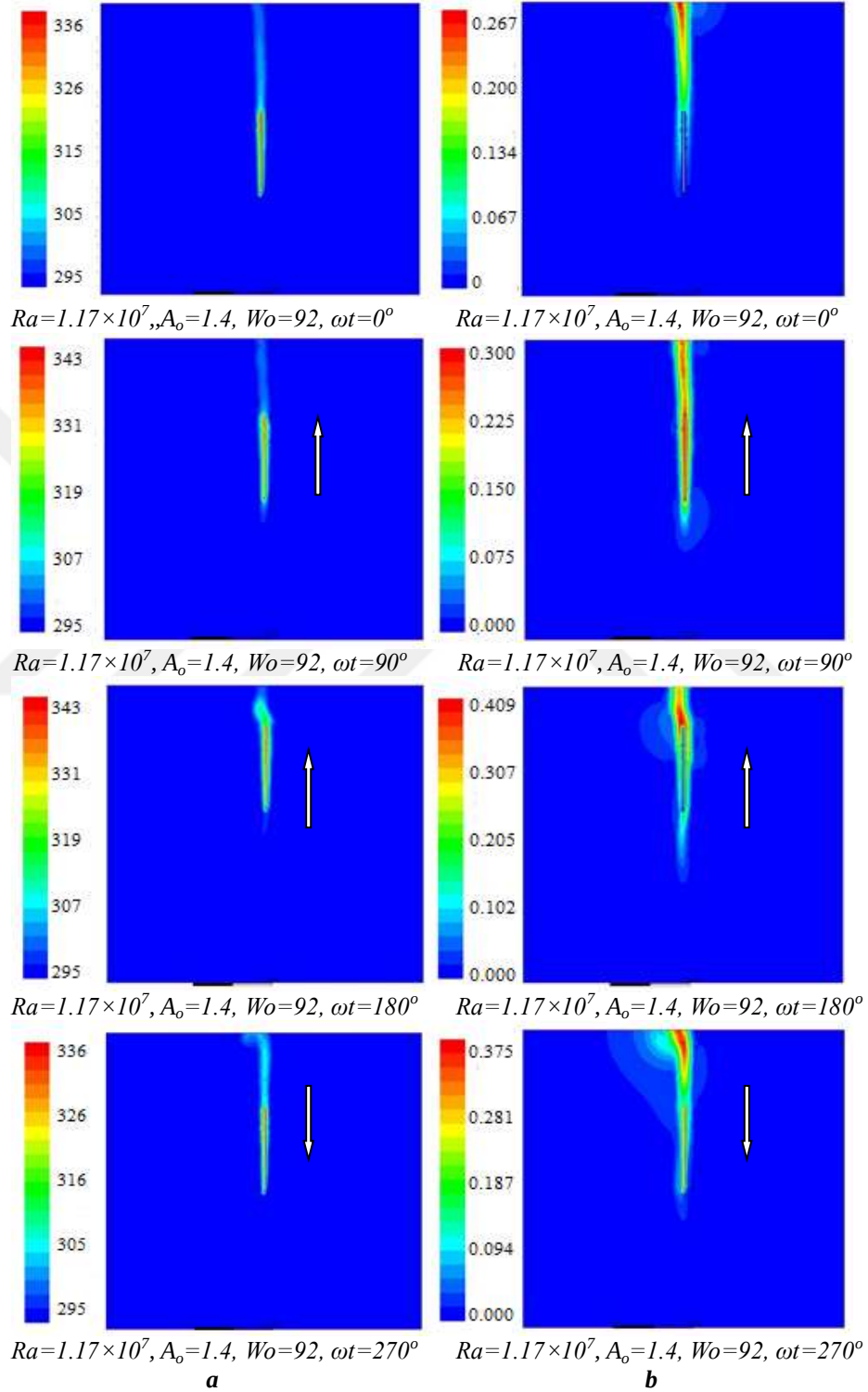


Şekil 4. 14. Toplam deneysel belirsizlik oranlarına göre sayısal ve deneysel ısı transferi performansının karşılaştırılması.

Sayısal çalışma sonucunda, periyodik salınımlı levha üzerinde meydana gelen akış ve ısı geçiş mekanizmasını daha iyi yorumlayabilmek amacıyla farklı parametreler için levha yüzeyinde ve akış alanındaki anlık hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir.

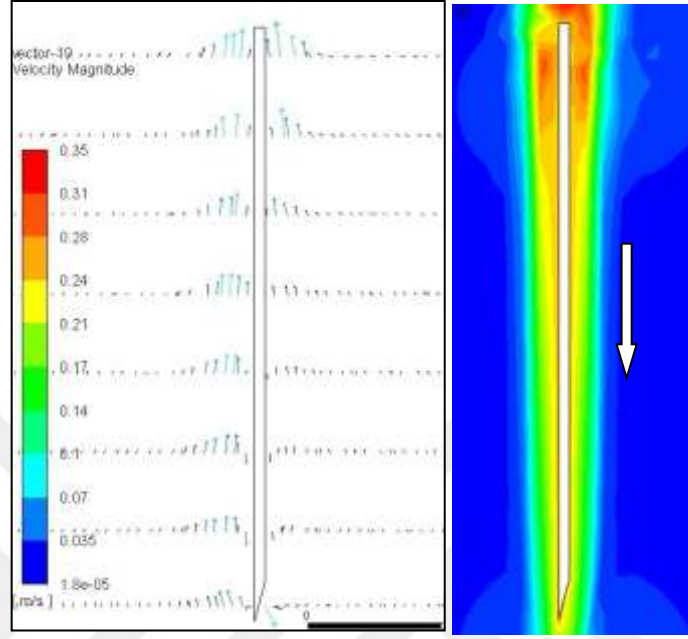
Şekil 4.15’de sabit Ra sayısında ($Ra=1.17 \times 10^7$), sabit genlik ($A_0=1.4$) ve sabit Wo sayısı ($Wo=92$) için salınımlı levhanın farklı faz açılarında sıcaklık (a) ve hız görüntüleri (b) verilmiştir. Isınan levhanın periyodik salınım hareketi nedeniyle yüzeyden çevreye hem doğal hem de zorlanmış taşınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Levha üzerindeki sıcaklık ve hız gradyanları, levhanın periyodik

salınım hareketi nedeniyle zamana bağlı olarak sürekli değişmektedir. Sıcaklık görüntülerinden, levhanın etrafını sıcak bir hava tabakasının çevrelediği, ısınan bu hava tabakasının da yoğunluğunun azalması nedeniyle yukarı yönde hareket ettiği gözlenmektedir.

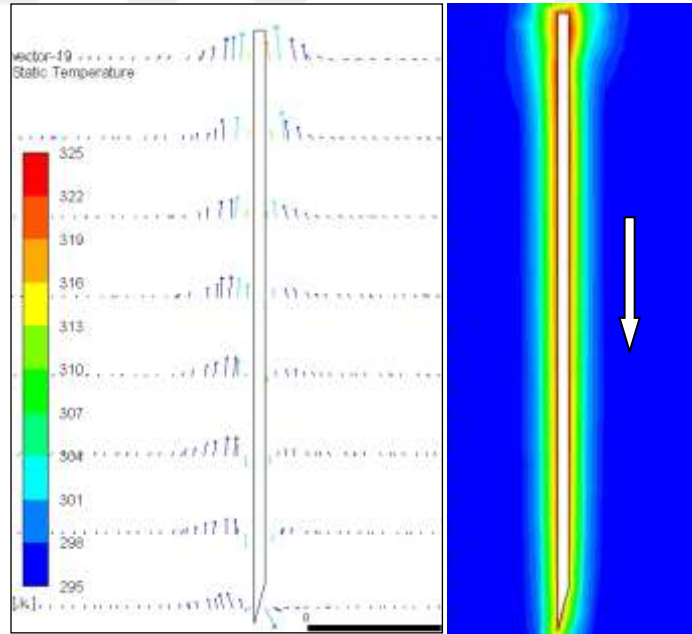


Şekil 4.15. Farklı faz açılarında a-Sıcaklık görüntüleri, b- Hız görüntüleri ($Ra=1.17 \times 10^7$, $A_o=1.4$, $Wo=92$).

Levhanın periyodik salınım hareketi, levha üzerindeki hız ve ısı sınır tabakalarını sürekli deforme ederek yenilenmesine neden olmaktadır. Bu da levha yüzeyinin, soğuk hava tabakasıyla daha fazla temas etmesini sağlayarak yüzey üzerindeki ısı transferi hızının artırmaktadır.



a

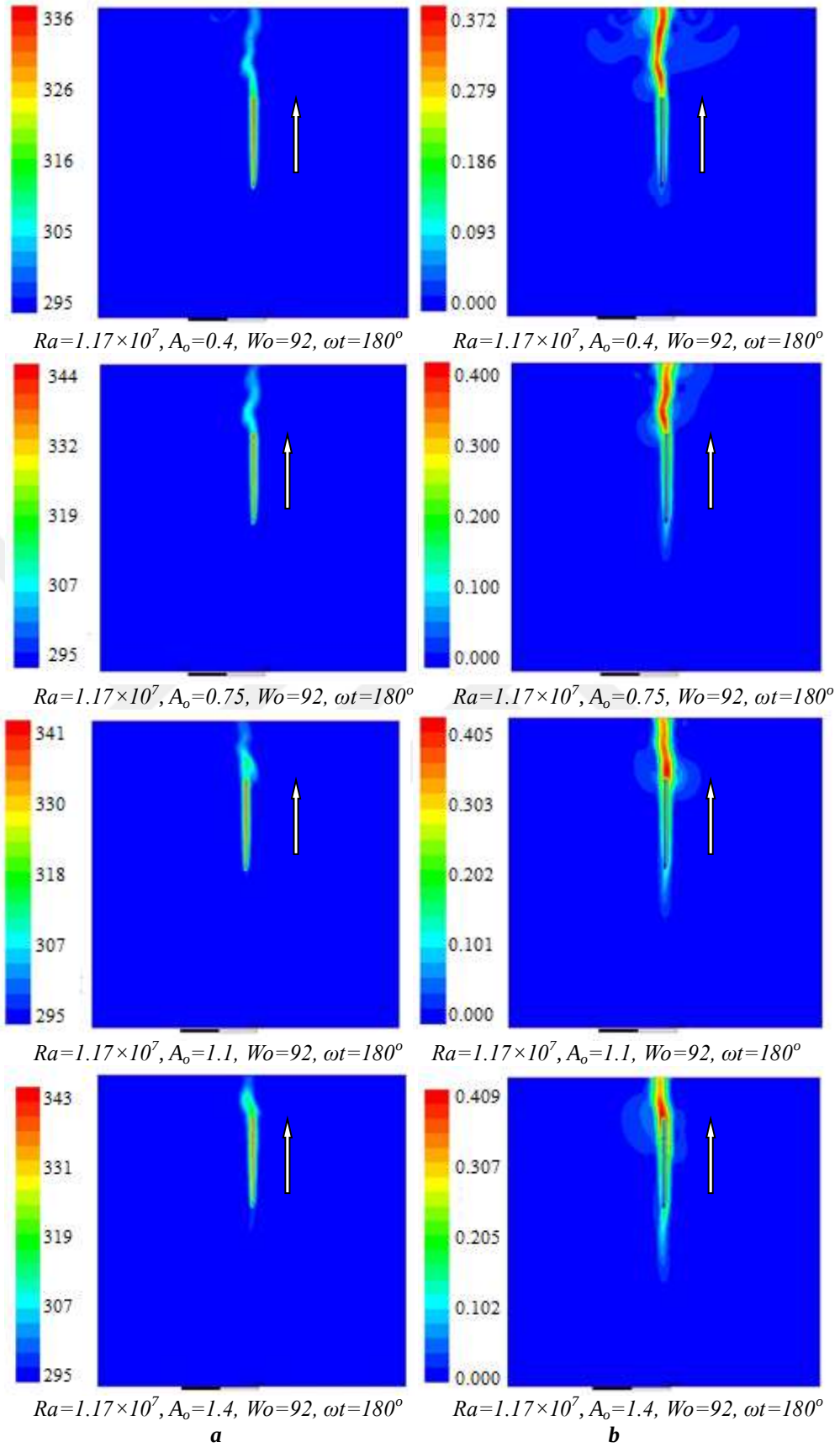


b

Şekil 4.16. Levha üzerinde oluşan akış vektörleri, a-hız, b- sıcaklık ($Ra=1.17 \times 10^7$, $A_o=1.4$, $Wo=92$, $\omega t=300^\circ$).

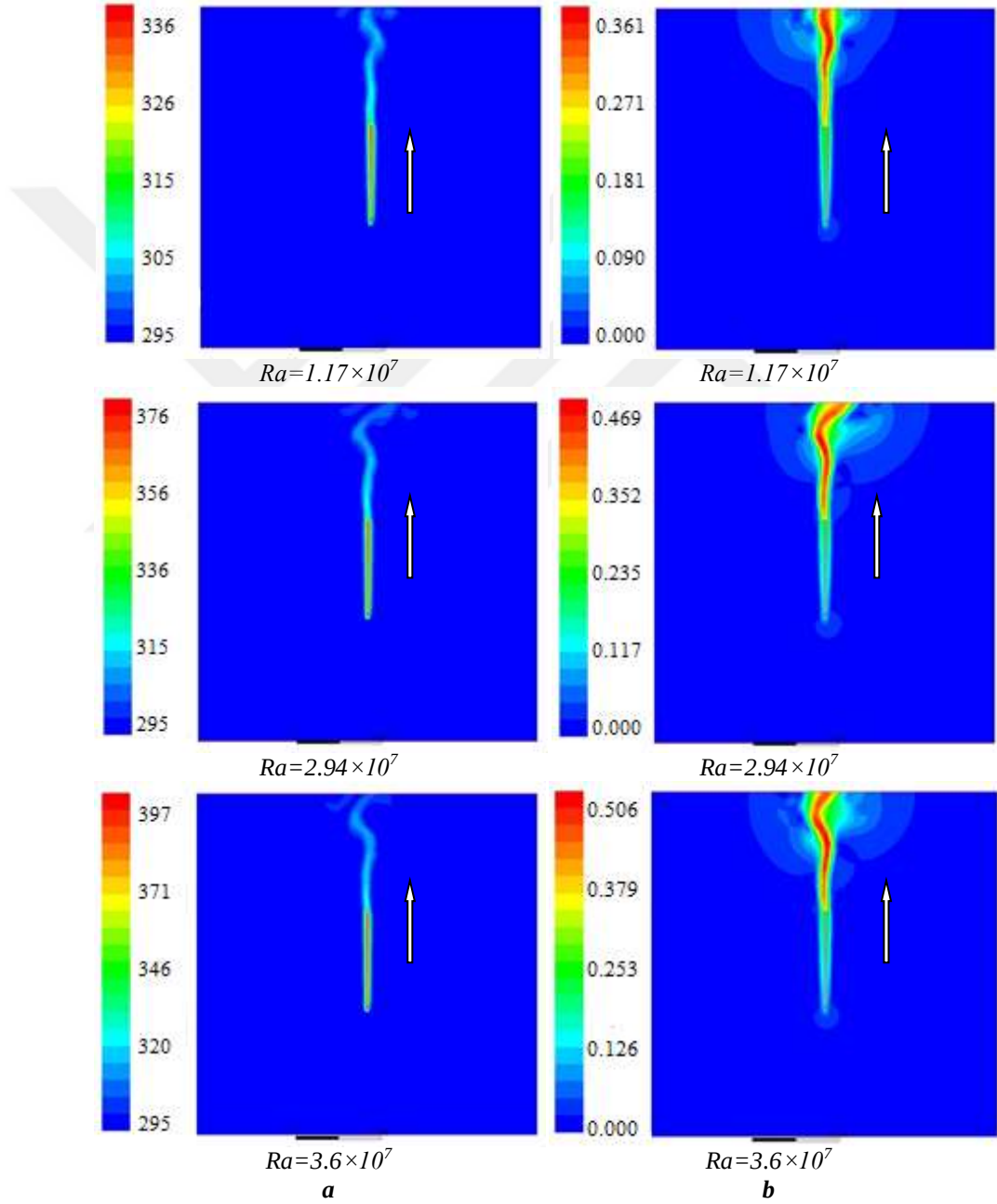
Şekil 4.16’de $Ra=1.17 \times 10^7$, $A_0=1.4$, $Wo=146$, $\omega t=270^\circ$ sabit parametrelerinde, levha etrafında oluşan hidrodinamik ve ısı sınır tabaka oluşumu hakkında detaylı bilgi vermek amacıyla ayrıntılı şekil verilmiştir. Burada, aşağı yönde hareket eden levha üzerinde oluşan hız (a) ve sıcaklık (b) alanları verilmiştir. Hız ve sıcaklık görüntülerinden, levhanın üst kısımlarında vektörlerin yönünün yukarı doğru ve uzunluklarının daha büyük olduğu, aşağı doğru inerken vektörler uzunluklarının azaldığı, belli bir mesafeden sonra büküm noktası olduğu ve vektörlerin bir kısmının yön değiştirdiği, levha alt kısımlarında vektör uzunluklarının oldukça azaldığı görülmektedir. Bu durum periyodik salınım hareketine sahip levhanın yukarı ve aşağı her yön değiştirdiğinde hız ve ısı sınır tabakalarının deforme olduğunu, periyodik çevrim ile sürekli yenilendiğini ifade etmektedir. Böylece her çevrimde, sıcak ve soğuk havanın sürekli karışımı sağlanarak ısı transferinde iyileşme meydana gelecektir.

Şekil 4.17’de sabit ısı akısı ($Ra=1.17 \times 10^7$), sabit faz açısı ($\omega t=180^\circ$) ve sabit Wo sayısı ($Wo=92$) için salınımlı levhanın farklı genliklerde sıcaklık (a) ve hız görüntüleri (b) verilmiştir. Şekiller, levha yüzeyindeki hız ve sıcaklık dağılımının levhanın periyodik salınım genliğinden oldukça etkilendiğini göstermektedir. Düşük genliklerde levhanın üst kısmında daha geniş bir alana dağılan hız profillerinin, genliğin artması ile birlikte daha dar bir alana sahip olduğu görülmektedir. Genliğin artması, levha yüzeyindeki ısı ve hız sınır tabakaların incelmesine, bu durum ısı transferine karşı direncin azalmasına neden olmaktadır. Böylece yüksek genliklerde daha fazla ısı transferi elde edilmektedir.

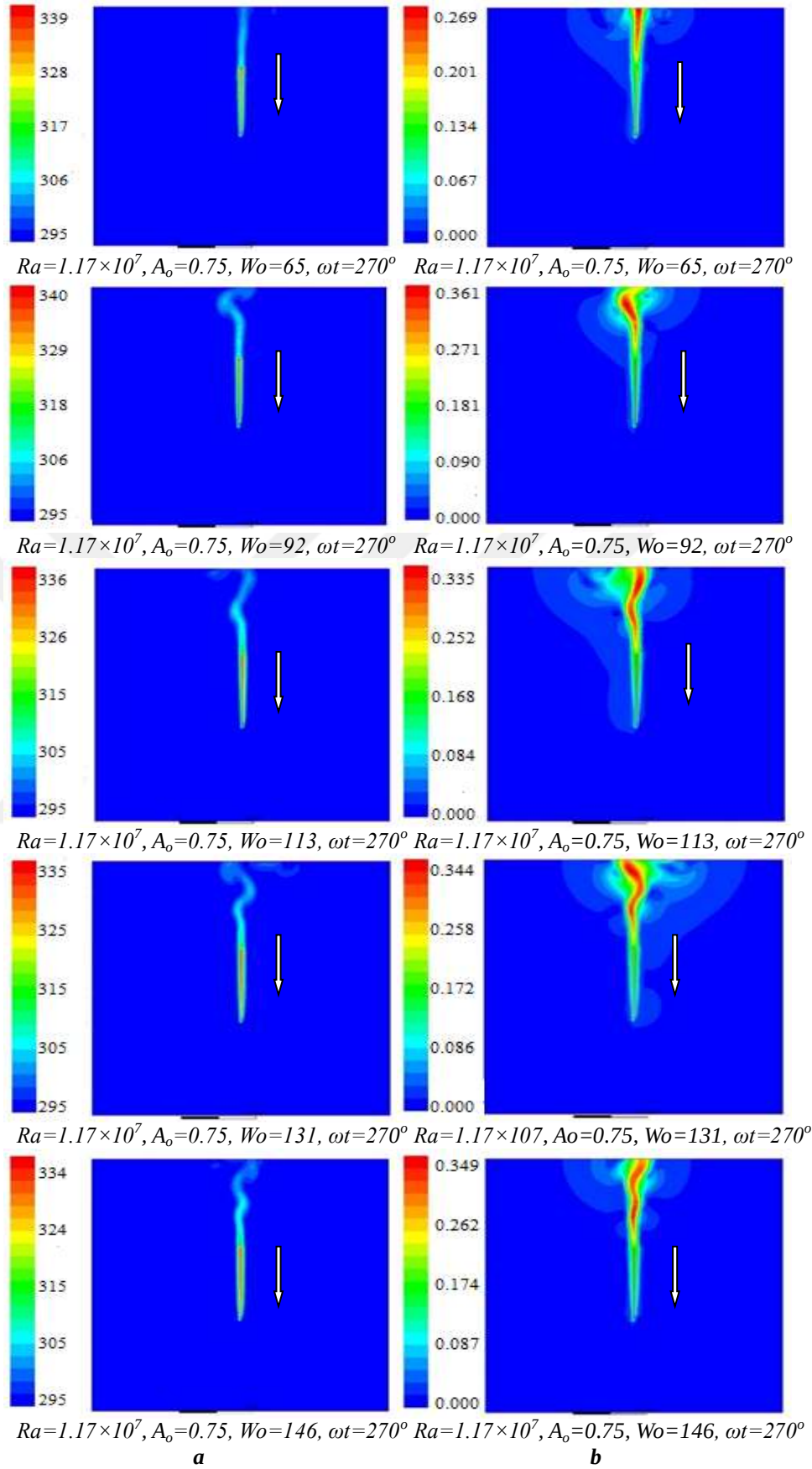


Şekil 4.17. Farklı salınım genlikleri için, a-Sıcaklık görüntüleri, b- Hız görüntüleri ($Ra=1.17 \times 10^7$, $Wo=92$ ve $\omega t=180^\circ$).

Şekil 4.18’de farklı Ra sayılarında, $A_o=0.75$, $Wo=146$, $\omega t=90^\circ$ parametreleri için sıcaklık (a) ve hız görüntüleri (b) verilmiştir. Bu görüntülerden, levha yüzeyindeki sıcaklık ve hız dağılımının yüzeye uygulanan ısı akısından oldukça etkilendiği gözlenmektedir. Levhaya uygulanan ısı akısı arttıkça yüzey sıcaklıkları ve hız değerleri de artmaktadır. Salınımın etkisiyle levha yüzeyindeki sıcak hava yükselerek yerini ortam sıcaklığındaki hava tabakasına bırakmaktadır. Levha yüzeyinin daha fazla ısınması ile üst kısımdaki hava tabakasının hızının da arttığı görülmektedir.



Şekil 4.18. Farklı ısı akıları için a-sıcaklık görüntüleri, b-hız görüntüleri ($A_o=0.75$, $Wo=146$ ve $\omega t=90^\circ$).



Şekil 4.19. Farklı salınım frekansları için, a-Sıcaklık görüntüleri, b-Hız görüntüleri ($Ra=1.17 \times 10^7$, $A_o=0.75$ ve $\omega t=270^\circ$).

Şekil 4.19’da levhanın farklı periyodik salınım frekansı için sabit Ra sayısında ($Ra=1.17 \times 10^7$), sabit bir salınım genliği ($A_o=0.75$) ve sabit bir faz açısı ($\omega t=270^\circ$) için sıcaklık (a), ve hız görüntüleri (b) verilmiştir. Bu görüntülerden, levha yüzeyindeki ve akış alanındaki sıcaklık ve hız dağılımlarının periyodik salınım frekansından önemli derecede etkilendiği görülmektedir. Sıcaklık görüntülerinden, yüksek frekanslarda levhanın üst kısmındaki sıcak hava tabakasının daha yoğun olduğu görülmektedir. Levhanın salınım frekansının artması ile levha üzerinde oluşan hız ve ısı sınır tabakaların deforme olması ve yenilenmesi daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Böylece frekansın artması levha yüzeyinin daha fazla miktarda ve daha hızlı şekilde soğuk hava tabakası ile temasını sağlayarak yüzeyin daha hızlı soğumasına yardımcı olacaktır.

Yapılan çalışmada, levha yüzeyine uygulanan ısı akışının ve salınım parametrelerinin ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma ile periyodik salınımına sahip düşey düz bir levha yüzeyinden gerçekleşen karışık taşınım ile ısı transferi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, salınım genliği, salınım frekansı ve Ra sayısı değiştirilmiş ve deneysel düzeneğin limitleri dahilinde tüm deneyler tamamlanmıştır. Levha yüzeyindeki anlık ve ortalama sıcaklık değerleri elde edilmiş ve deneysel sonuçlar, boyutsuz sayıların fonksiyonu olarak grafikler halinde sunulmuştur. Salınımlı levha yüzeyindeki karışık taşınım ile ısı transferi, sabit levhadaki doğal taşınım ile ısı transferiyle karşılaştırılarak ısı transferindeki iyileşme oranları belirlenmiştir. Ayrıca levha yüzeyine uygulanan farklı ısı akıları ve salınım parametrelerinin Ri sayısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerde ısı geçişi üzerindeki etkileri araştırılan fiziksel parametreler için boyut analizi yapılmıştır. Elde edilen boyutsuz sayılar kullanılarak deneysel çalışma sonuçları raporlanmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Deneysel çalışmada belirsizliğe neden olan parametreler belirlenerek toplam belirsizlik analizi hesaplanmıştır.

Sayısal çalışmalar için deneysel veriler kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği tabanlı ANSYS Fluent 18.2 programı yardımıyla hesaplamalar yapılmıştır. Çözüm alanının çizilmesi, hücrelere bölünmesi ve sınır şartların uygulanması işlemi iki boyutlu olarak Workbench programında oluşturulmuştur. Levhanın periyodik salınım hareketinin oluşturulması için programda hareketli ağ (dinamik mesh) modeli kullanılmıştır. Çözüm metodu için önce farklı türbülans modellerinde ve laminar akış rejiminde çözümler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Laminar şartlarda yapılan çözüm sonuçlarının deneysel sonuçlarla daha uyumlu olması nedeniyle çözümler laminar akış şartlarında gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda levha yüzeyinden ortama geçen karışık taşınım ile ısı transferi miktarı hesaplanmış ve sonuçlar yaygın literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca levha yüzeyindeki anlık hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiş ve farklı salınım parametrelerinin ve Ra sayılarında ısı transferine etkileri analiz edilmiştir.

Çalışma sonuçlarında, elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir;

1. Ra sayısı arttıkça levha yüzey sıcaklığının arttığı,

2. Tüm Ra sayılarında, salınım genliği ve frekansı arttıkça levha yüzey sıcaklıklarının azaldığı,
3. Periyodik salınımlı düşey levha için elde edilen ısı transferinin sabit düşey levha için elde edilen ısı transferinden daha yüksek olduğu,
4. Salınım genliği ve frekansının artması ile ısı transferi performansının arttığı,
5. Isı transferi performansının Ra sayısından ve salınım parametrelerinden oldukça etkilendiği,
6. Levha yüzeyine uygulanan ısı akısı arttıkça karışık taşınımında doğal taşınım etkilerinin artması nedeniyle ısı transferi performansının düşük ısı akılarına göre daha az arttığı,
7. Düşük Ra sayılarında ve frekanslarda doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin eşit öneme sahip olduğu, artan Ra sayılarında ve düşük frekanslarda doğal taşınım etkilerinin daha baskın olduğu, yüksek frekanslarda ise zorlanmış taşınım etkilerinin daha baskın olduğu,
8. Salınım genliğinin, Ri sayısı üzerinde herhangi bir etkisinin görülmediği,
9. En iyi ısı transferi performansı düşük Ra sayısında ($Ra=1.17 \times 10^7$), yüksek salınım genliğinde ($A_o=1.4$) ve yüksek salınım frekansında ($Wo=146$) yaklaşık % 43 olarak elde edildiği, yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının, yaygın literatür çalışmaları ile oldukça uyumlu olduğu,
10. Anlık hız ve sıcaklık görüntülerinden, salınım frekansının artması ile yüzeyde oluşan hız ve ısı sınır tabakaların deforme olması ve yenilenmesi daha kısa sürede gerçekleştiğinden, levha yüzeyinin daha fazla miktarda ve daha hızlı şekilde soğuk hava tabakası ile temasını sağlayarak yüzeyin daha hızlı soğumasına yardımcı olduğu gözlemlenmiştir.
11. Çalışma deneysel limitler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek Ra sayılarında, salınım genliği ve frekansında, karışık taşınım ile ısı transferinin ne yönde değişeceği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdelmassih, G., Vernet, A. ve Pallares, J., 2016. Steady and unsteady mixed convection flow in a cubical open cavity with the bottom wall heated, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 682–691.
- Acrivos A., 1958. Combined laminar free-and forced- convection heat transfer in external flows, *AIChE J.* 4, 285-289.
- Ahmad, S., Arifin, N. M., Nazar, R., Pop, I., 2008. Mixed convection boundary layer flow along vertical moving thin needles with variable heat flux, *Heat Mass Transfer*, 44, 473–479.
- Akçay, S., 2015. Pulsatif jet kullanarak düz levha yüzeyinden ısı transferinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Akdag, U., Cetin, O., Demiral, D. ve Ozkul, I., 2013. Experimental investigation of convective heat transfer on a flat plate subjected to a transversely synthetic jet, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 49, 96-103.
- Akdag, U., 2010. Numerical investigation of pulsating flow around a discrete heater in a channel, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 37, 7, 881-889.
- Ali, M. ve Al-Yousef, F., 1998. Laminar mixed convection from a moving vertical surface with suction or injection, *Heat Mass Transfer*, 33, 301–306.
- Ali, M. ve Al-Yousef, F., 2002. Laminar mixed convection boundary layers induced by a linearly stretching permeable surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 4241-4250.
- Ali, M.E., 2006. The effect of variable viscosity on mixed convection heat transfer along a vertical moving surface, *International Journal of Thermal Sciences*, 45, 60–69.
- Al-Sanea, S.A., 2003. Convection regimes and heat transfer characteristics along a continuously moving heated vertical plate, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24, 888–901.
- Al-Sanea, S.A., 2004. Mixed convection heat transfer along a continuously moving heated vertical plate with suction or injection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 1445–1465.
- Andreozzi, A., 2018. Numerical study of mixed convection in a horizontal no parallel-plates channel with an unheated moving plate, *Int. Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 28, 3, 547-570.
- Andreozzi, A., Bianco, N., Manca, O. ve Naso, V., 2008. Effect of a moving plate on heat transfer in a uniform heat flux vertical channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 3906-3912.

- Andreozzi, A., Bianco, N., Manca, O. ve Naso, V., 2013. Turbulent mixed convection in uniformly heated vertical channel with an assisting moving surface, *International Journal of Thermal Sciences*, 71, 20-31.
- Anilkumar, D., 2011. Nonsimilar solutions for unsteady mixed convection from a moving vertical plate, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 16, 3147–3157.
- ANSYS Inc., 2018. ANSYS Fluent user's guide.
- Arif, M.R. ve Hasan, N., 2019. Performance of characteristic numerical boundary conditions for mixed convective flows past a heated square cylinder using a non-Boussinesq approach, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, An International Journal of Computation and Methodology*, 76, 4, 254-280.
- Ashafa, S., Ahmed A.A. ve Sakir, A.A., 2017. Analytical solution of the effect of MHD inclination and unsteady heat transfer in a laminar, transition and turbulent flow of a basic gaseous micro-flow past a vertically moving oscillating plate, *American Journal of Engineering & Natural Sciences (AJENS)*, 1, 2, 29-35.
- Aydın, O. ve Kaya, A., 2007. Mixed convection of a viscous dissipating fluid about a vertical flat plate, *Applied Mathematical Modelling*, 31, 843–853.
- Aziz, A., 2009. A similarity solution for laminar thermal boundary layer over a flat plate with a convective surface boundary condition, *Commun. Nonlinear. Sci. Numer. Simul.*, 14, 1064–1068.
- Bachok, N., Ishak, A. ve Pop, I., 2010. Boundary layer flow of nanofluid over a moving surface in a flowing fluid, *Int. J. Therm. Sci.*, 49, 1663–8.
- Bejan, A., 1994. Convective heat transfer, Wiley Interscience, New York, USA.
- Blasius, H., 1908. Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung. *Z. Math Phys*, 56, 1–37.
- Calmidi, V.V. ve Mahajan, R.L., 1998. Mixed convection over a heated horizontal surface in a partial enclosure, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 19, 358-367.
- Chamkha, A.J., Takhar, H.S. ve Nath, G., 2004. Mixed convection flow over a vertical plate with localized heating (cooling), magnetic field and suction (injection), *Heat and Mass Transfer*, 40, 835–841.
- Chamkha, A.J., Takhar, H.S., ve Nath, G., 2001. Effect of buoyancy force on the flow and heat transfer over a continuous moving vertical or inclined surface, *International Journal of Thermal Sciences*, 40, 825-833.
- Chen, C.H., 1998. Laminar mixed convection adjacent to vertical, continuously stretching sheets, *Heat and Mass Transfer*, 33, 471-476.

- Chen, C.K., Chen, B.S. ve Liu, C.C., 2014. Heat transfer and entropy generation in fully-developed mixed convection nanofluid flow in vertical channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79, 750–758.
- Chen, T.S. ve Armaly, B.F., 1987. Mixed convection in external flow. In: Kakac, S., Shah, R.K., Aung, W. (Eds.), *Handbook of Single- Phase Convective Heat Transfer*. Wiley, New York, 14.1–14.35 (Chapter 14).
- Chen, T.S. ve Strobel, F.A., 1980. Buoyancy effects in boundary layer adjacent to a continuous, moving horizontal flat plate, *Journal of Heat Transfer*, 102, 1, 170–172.
- Chen, T.S. ve Strobel, F.A., 1980. Buoyancy effects on heat and mass transfer in boundary layer on a continuous, moving horizontal plate, *Journal Numerical Heat Transfer*, 3, 1, 115–130.
- Cheng, C.H., Chen, H.N. ve Aung, W., 1997. Experimental study of the effect of transverse oscillation on convection heat transfer from a circular cylinder, *J. Heat Transfer*, 119, 3, 474–482.
- Chida, K. ve Katto, Y., 1976. Conjugate heat transfer of continuously moving surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19, 461–470.
- Churchill S.W. ve Chu, H.H.S., 1975. Correlating Equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, 1323–1329.
- Cortell, R., 2007. Flow and heat transfer in moving fluid over a moving flat surface, *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 21, 435–446.
- Çengel, Y.A. ve Ghajar, A.J., 2015. *Isı ve Kütle transferi esaslar ve uygulamalar*, Palme Yayıncılık, 4.Basım.
- Çetin, Ö., 2013. Sentetik jet uyarıcı kullanarak düz levha yüzeyinin etkili soğutulması, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Das, S. ve Jana, R.N., 2015. Natural convective magneto-nanofluid flow and radiative heat transfer past a moving vertical plate, *Alexandria Engineering Journal*, 54, 55–64.
- Dogan, M. ve Sıvrıoglu, M., 2012. Experimental and numerical investigation of clearance gap effects on laminar mixed convection heat transfer from fin array in a horizontal channel-A conjugate analysis, *Appl. Therm. Eng.*, 40, 102–113.
- El-Aziz, M.A., 2014. Unsteady mixed convection heat transfer along a vertical stretching surface with variable viscosity and viscous dissipation, *Journal of the Egyptian Mathematical Society*, 22, 529–537.
- Ellahi, R., Alamri, S.Z., Basit A. ve Majeed, A., 2018, Effects of MHD and slip on heat transfer boundary layer flow over a moving plate based on specific entropy generation, *Journal of Taibah University for Science*, 12, 4, 476–482.

- Erickson, L.E., Fan, L.T. ve Fox, V.G., 1966. Heat and mass transfer on a moving continuous flat plate with suction or blowing, *Ind. Engrg. Chem. Fund.*, 5, 19–25.
- Fang, T., 2003. Similarity solutions for a moving-flat plate thermal boundary layer, *Acta. Mech.*, 163, 161–172.
- Fisher, E.G., 1976. *Extrusion of Plastics*. Wiley, New York, USA.
- Ghiasi, A., Razavi, S.E., Rouboa, A. ve Mahian, O., 2019. Numerical study on flow over a confined oscillating cylinder with a splitter plate, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 29, 5, 1629-1646.
- Goma, H. ve Al Taweel, A.M., 2005. Effect of oscillatory motion on heat transfer at vertical flat surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 1494–1504.
- Gryzagoridis, J., 1975. Combined free and forced convection from an isothermal vertical plate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, 911–916.
- Holman, J.P., 2001. *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York.
- Incropera, F.P. ve DeWitt D.P., 2006. *Isı ve kütle geçişinin temelleri*, Literatür yayıncılık, Dördüncü basımdan çeviri.
- Incropera, F.P., 1988. Convection heat transfer in electronic equipment cooling, *J. Heat Transfer*, 110, 1097–1111.
- Ingham, D.B., 1986. Singular and non-unique solutions of the boundary layer equations for the flow due to free convection near a continuously moving vertical plate, *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)*, 37, 559–572.
- Ishak, A., Nazar, R. ve Pop, I., 2009. Flow and heat transfer characteristics in a moving flat plate in a parallel stream with constant surface heat flux, *Heat Mass Transfer*, 45, 563–567.
- Jaluria, Y., 2003. Thermal processing of materials: from basic research to engineering, *Journal of Heat Transfer*, 125, 6, 957-979.
- Kang, B.H. ve Jaluria, Y., 1994. Heat transfer from continuously moving material in channel flow for thermal processing, *J. Thermophys. Heat Transfer*, 8, 546–554.
- Kareem, A.K., Gao, S. ve Ahmed, A.Q., 2016. Unsteady simulations of mixed convection heat transfer in a 3D closed lid-driven cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 100, 121–130.
- Karwe, M.V. ve Jaluria, Y., 1991. Numerical simulation of thermal transport associated with a continuously moving flat sheet in materials processing, *J. Heat Transfer*, 113, 612–619.

- Kataria, H.R. ve Patel, H.R., 2018. Heat and mass transfer in magnetohydrodynamic (MHD) Casson fluid flow past over an oscillating vertical plate embedded in porous medium with ramped wall temperature, *Propulsion and Power Research*, 7, 3, 257–267.
- Khalid, A., Khan, I. ve Shafie, S., 2017. Heat transfer in free convection flow of micropolar fluids over an oscillating vertical plate, *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 13, 4, 654-658.
- Khan, D., Khan, A., Khan, I., Ali, F., Karim, F. ve Tlili, I., 2019. Effects of relative magnetic field, chemical reaction, heat generation and newtonian heating on convection flow of casson fluid over a moving vertical plate embedded in a porous medium, *SCiEnTifiC Reports*, 9, 400.
- Khan, I., Shah, N.A., Tassaddiq, A., Mustapha, N. ve Kechi, S.A., 2018. Natural convection heat transfer in an oscillating vertical plate, *PLoS ONE*, 13, 1, 1-14.
- Khonakdar, D.R. ve Raveshi, M.R., 2016. Mixed convection on a vertical plate in supercritical fluids byselecting the best equation of state, *J. of Supercritical Fluids*, 107, 549–559.
- Kim, Y.J. 2000. Unsteady MHD convective heat transfer past a semi-infinite vertical porous moving plate with variable suction, *International Journal of Engineering Science*, 38, 8, 833-845.
- Kitamura, K. ve Mitsuishi, A., 2010. Fluid flow and heat transfer of mixed convection over heated horizontal plate placed in vertical downward flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2327–2336.
- Koffi, M., Andreopoulos, Y. ve Jiji, L., 2017. Heat transfer enhancement by induced vortices in the vicinity of a rotationally oscillating heated plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 112, 862-875.
- Krishna, M.V. ve Jyothi, K., 2018. Hall effects on MHD rotating flow of a visco-elastic fluid through a porous medium over an infinite oscillating porous plate with heat source and chemical reaction, *Materials Today: Proceedings* 5, 367–380.
- Kumari, M. ve Nath, G., 2006. Conjugate mixed convection transport from a moving vertical plate in a non-Newtonian fluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 45, 607–614.
- Kumari, M., Slaouti, A., Taldlar, H.S., Nakamura, S. ve Nath, G., 1996. Unsteady free convection flow over a continuous moving vertical surface, *Acta Mechanica*, 116, 75-82.
- Kurzweg, U.H. ve Chen, J., 1988. Heat transport along oscillating flat plate, *J. Heat Transfer*, 110, 789-790.
- Kuvvet, K. ve Sarper, B., 2018. Makine mühendisliği deneyler 2, Doğal ve zorlanmış taşınım ile ısı transferi deneyi, Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane.

- Lee, S.L., Chiou, J.B. ve Cyue, G.S., 2019. Mixed convection in a square enclosure with a rotating flat plate, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 807-814.
- Li, G., Zheng, Y., Yang, H. ve Xu, Y., 2016. Numerical investigation of heat transfer and fluid flow around the rectangular flat plane confined by a cylinder under pulsating flow, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9, 4, 1569-1577.
- Li, G.N., Zheng, Y.Q. ve Hu, G.L., 2014. Heat transfer enhancement from a rectangular flat plate with constant heat flux in pulsating flows, *Experimental Heat Transfer*, 27, 2, 198-211.
- Lin, H. ve Shih, Y., 1981. Buoyancy effects on the forced convection along vertically moving surfaces, *Journal Chemical Engineering Communications*, 8, 4-6, 327-340.
- Lin, H.T. ve Haung, S.F., 1994. Flow and heat transfer of plane surface moving in parallel and reversely to the free stream, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37, 333-336.
- Lin, H.T. ve Hoh, H.L., 1997. Mixed convection from an isothermal vertical plate moving in a parallel or reversely to a free stream, *Heat and Mass Transfer*, 32, 441-445.
- Lloyd, J.R. ve Sparrow, E.M., 1970. Combined forced and free convection flow on vertical surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 13, 434-438.
- Mahanthesh, B., Gireesha, B.J. ve Gorla, R.S.R., 2016. Heat and mass transfer effects on the mixed convective flow of chemically reacting nanofluid past a moving/stationary vertical plate, *Alexandria Engineering Journal*, 55, 569-581.
- Merkin, J.H., 1969. The effect of buoyancy forces on the boundary layer over a semi-infinite vertical flat plate in a uniform free stream, *J. Fluid Mech.*, 35, 439-450.
- Mohamed, M.K.A., Noar, N.A.Z., Salleh, M.Z. ve Ishak, A., 2016. Mathematical model of boundary layer flow over a moving plate in a nanofluid with viscous dissipation, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9, 5, 2369-2377.
- Moutsoglou, A. ve Chen, T.S., 1980. Buoyancy effects in a boundary layers on inclined, continuous, moving sheets, *Journal of Heat Transfer*, 102, 371-372.
- Muthucumaraswamy, R. ve Vijayalakshmi, A., 2008. Effects of heat and mass transfer on flow past an oscillating vertical plate with variable temperature. *Int. Jour. of Appl. Math. and Mech.*, 4,1, 59-65.
- Nithyadevi, N., Begum, A.S., Oztop, H.F. ve Al-Salem, K., 2017. Effects of inclination angle and non-uniform heating on mixed convection of a nanofluid filled porous enclosure with active mid-horizontal moving, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 1217-1228.
- Nobari, M.R.H. ve Naderan, H., 2006. A numerical study of flow past a cylinder with cross flow and inline oscillation, *Computers & Fluids*, 35, 4, 393-415.

- Olanrewaju, F.O. ve Makinde, O.D., 2011. Effects of thermal diffusion and diffusion thermo on chemically reacting MHD boundary layer flow of heat and mass transfer past a moving vertical plate with suction/injection, Arab J. Sci. Eng., 36, 1607–1619.
- Pantokratoras, A., 2004. Opposing mixed convection along vertical isothermal moving bodies, International Journal of Heat and Fluid Flow, 25, 692-696.
- Partha, M.K., Murthy, P. ve Rajasekhar, G.P., 2005. Effect of viscous dissipation on the mixed convection heat transfer from an exponentially stretching surface, Heat Mass Transfer, 41, 360–366.
- Patel, H.R., 2019. Effects of heat generation, thermal radiation, and hall current on MHD casson fluid flow past an oscillating plate in porous medium, Multiphase Science and Technology, 31, 1, 87-107.
- Patil, P.M., Roy, M., Roy S. ve Momoniat, E., 2018, Triple diffusive mixed convection along a vertically moving surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, 117, 287-295.
- Patil, P.M. ve Roy,S., 2010. Unsteady mixed convection flow from a moving vertical plate in a parallel free stream: Influence of heat generation or absorption, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 4749–4756.
- Patil, P.M., Roy, S. ve Chamkha, A.J., 2009. Double diffusive mixed convection flow over a moving vertical plate in the presence of internal heat generation and a chemical reaction, Turkish J. Eng. Environ. Sci., 33, 193–205.
- Patil, P.M., Roy, S. ve Pop, I., 2012. Flow and heat transfer over a moving vertical plate in a parallel free stream: role of internal heat generation or absorption, Chem. Eng. Comm., 199, 658–672.
- Pop, I. ve Gorla, R.S.R., 1990. Second-order boundary layer solution for a continuous moving surface in a non-Newtonian fluid, Int. J. Eng. Sci., 28, 313–322.
- Pradhan, B., Das, S.S., Paul, A.K. ve Dash R.C., 2017. Unsteady free convection flow of a viscous incompressible polar fluid past a semi infinite vertical porous moving plate, International Journal of Applied Engineering Research, 12, 21, 10958-10963.
- Prasad, K.K. ve Ramanathan, V, 1972. Heat transfer by free convection from a longitudinally vibrating vertical plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, 15, 6, 1213-1223.
- Raju, R.S., Reddy, G.J., Rao, J.A., Rashidi, M.M. ve Gorla, R.S.R., 2016. Analytical and numerical study of unsteady MHD free convection flow over an exponentially moving vertical plate with heat absorption, International Journal of Thermal Sciences, 107, 303-315.

- Ramachandran, N., Chen, T.S. ve Armaly, B.F., 1987. Mixed convection from vertical and inclined moving sheets in a parallel free stream, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1, 3, 274-281.
- Ramesh, G.K., Chamkha, A.J. ve Gireesha, B.J., 2016. Boundary layer flow past an inclined stationary/moving flat plate with convective boundary condition, *Afrika Matematika*, 27, 1, 87–95.
- Rana, P. ve Bhargava, R., 2011. Numerical study of heat transfer enhancement in mixed convection flow along a vertical plate with heat source/sink utilizing nanofluids, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 16, 4318–4334.
- Revenkar, S., 2000. Free convection effect on the flow past an impulsively started or oscillating infinite vertical plate, *Mech. Res. Comms.* 27, 2, 241-246.
- Saeid, N.H., 2005. Mixed convection flow along a vertical plate subjected to time-periodic surface temperature oscillations, *International Journal of Thermal Sciences*, 44, 531–539.
- Sakiadis, B.C., 1961a. Boundary-layer behaviour on continuous solid surfaces: I. Boundary-layer equations for two-dimensional and axisymmetric flow, *AIChE Journal*, 7, 26-28.
- Sakiadis, B.C., 1961b. Boundary-layer behaviour on continuous solid surfaces: II. The boundary-layer on a continuous flat surface, *AIChE Journal*, 7, 221-225.
- Salem, A.M., El-Aziz, M.A., Abo-Eldahab, E.M. ve Abd-Elfatah, I., 2010. Effect of variable density on hydromagnetic mixed convection flow of a non-Newtonian fluid past a moving vertical plate, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 15, 1485–1493.
- Sarhan, A.R., Karim, M.R., Kadhim, Z.K. ve Naser J., 2019. Experimental investigation on the effect of vertical vibration on thermal performances of rectangular flat plate, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 101, 231-240.
- Satish, N. ve Venkatasubbaiah, K., 2016. Conjugate heat transfer analysis of turbulent forced convection of moving plate in a channel flow, *Applied Thermal Engineering*, 100, 987–998.
- Sawant, S.M. ve Rao, C.G., 2010. Combined conduction-mixed convection on surface radiation from a uniformly heated vertical plate, *Chem. Eng. Comm.*, 197, 881–899.
- Seth, G.S., Kumbhakar, B. ve Sharma, R., 2016. Unsteady MHD free convection flow with Hall effect of a radiating and heat absorbing fluid past a moving vertical plate with variable ramped temperature, *Journal of the Egyptian Mathematical Society*, 24, 471–478.
- Shah, N.A., Ahmed, N., Elnaqeeb, T. ve Rashidi, M.M., 2019. Magnetohydrodynamic free convection flows with thermal memory over a moving vertical plate in porous medium, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 5, 1, 150-161.

- Si, X., Li, H., Zheng, L., Shen, Y. ve Zhang, X., 2017. A mixed convection flow and heat transfer of pseudo-plastic power law nanofluids past a stretching vertical plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 105, 350–358.
- Singh, P.J. ve Roy, S., 2008. Unsteady mixed convection from a rotating vertical slender cylinder in an axial flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 51, 1423–1430.
- Souza, J.A., Vargas, J.V.C. ve Bianchi, M.V.A., 2003. Friction and heat transfer for inclined surfaces in relative motion to an air stream under buoyancy effect, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24, 713–725.
- Sparrow, E.M. ve Abraham, J.P., 2005. Universal solutions for the stream wise variation of the temperature of a moving sheet in the presence of a moving fluid, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 3047–3056.
- Sparrow, E.M., Eichhorn, R. ve Gregg, J.L., 1959. Combined forced and free convection in boundary layer flows, *Phys. Fluids*, 2, 319–328.
- Strobel, F.A. ve Chen, T.S., 1980. Buoyancy effects on heat and mass transfer in boundary layers adjacent to inclined, continuous, moving sheets, *Numerical Heat Transfer*, 3, 461–481.
- Subhashini, S.V. ve Sumathi, R., 2014. Dual solutions of a mixed convection flow of nanofluids over a moving vertical plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 117–124.
- Sun, H., Li, R., Chénier, E., Lauriat, G. ve Padet, J., 2012. Optimal plate spacing for mixed convection from an array of vertical isothermal plates, *International Journal of Thermal Sciences*, 55, 16–30.
- Tadmor, Z. ve Klein, I., 1970. *Engineering Principles of Plasticating Extrusion*, Polymer Science and Engineering Series. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Taji, S.G., Parishwad, G.V. ve Sane, N.K., 2014. Enhanced performance of horizontal rectangular fin array heat sink using assisting mode of mixed convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 250–259.
- Takhar, H.S., Chamkha, A.J. ve Nath, G., 2001. Effect of buoyancy forces on the flow and heat transfer over a continuous moving vertical or inclined surface, *Int. J. Thermal Sci.*, 40, 825–833.
- Tsou, F.K., Sparrow, E.M. ve Goldstein, R.J., 1967. Flow and heat transfer in the boundary layer on a continuous moving surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10, 2, 219–235.
- Uddin, J., Khan, W.A. ve Ismail, A.I., 2015. Similarity solution of double diffusive free convective flow over a moving vertical flat plate with convective boundary condition, *Ain Shams Engineering Journal*, 6, 1105–1112.
- Venkatasubbaiah, K. ve Sengupta, T.K., 2009. Mixed convection flow past a vertical plate: Stability analysis and its direct simulation, *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 461–474.

- Waheed, M.A., 2009. Mixed convective heat transfer in rectangular enclosures driven by a continuously moving horizontal plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5055–5063.
- Wilks, G., 1974,. The flow of a uniform stream over a semi-infinite vertical flat plate with uniform surface heat flux, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17, 743–753.
- Xu, H. ve Pop,I., 2012. Fully developed mixed convection flow in a vertical channel filled with nanofluids, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 39, 8, 1086–1092.
- Yamala, M. ve Rao, C.G., 2017. Simulation studies on buoyancy-aided conjugate mixed convection with radiation from a vertical plate with multiple non-identical heat sources, *Journal Heat Transfer Engineering*, 38, 10, 948-962.
- Zhang, H., 2008. A study of the boundary layer on a continuous moving surface in power law fluids, University of Science and Technology Beijing, China.
- Zhang, X.R., Maruyama, S. ve Sakai, S., 2004. Numerical Investigation of laminar natural convection on a heated vertical plate subjected to a periodic oscillation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47, 4439-4448.

EKLER

EK A. Deneysel Parametreler

EK B. Boyut Analizi

EK C. Hata Analizi



EK A. Deneysel parametreler

Çizelge A1. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler

Ra=1.17×10 ⁷	ω (rad/s)	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π	$5\pi/2$
	Wo	65	92	113	131	146
$x_m=280$	$A_0=1.4$	Deney-1	Deney-2	Deney-3	Deney-4	Deney-5
$x_m=220$	$A_0=1.1$	Deney-6	Deney-7	Deney-8	Deney-9	Deney-10
$x_m=150$	$A_0=0.75$	Deney-11	Deney-12	Deney-13	Deney-14	Deney-15
$x_m=80$	$A_0=0.4$	Deney-16	Deney-17	Deney-18	Deney-19	Deney-20

Ra=2.94×10 ⁷	ω (rad/s)	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π	$5\pi/2$
	Wo	65	92	113	131	146
$x_m=280$	$A_0=1.4$	Deney-21	Deney-22	Deney-23	Deney-24	Deney-25
$x_m=220$	$A_0=1.1$	Deney-26	Deney-27	Deney-28	Deney-29	Deney-30
$x_m=150$	$A_0=0.75$	Deney-31	Deney-32	Deney-33	Deney-34	Deney-35
$x_m=80$	$A_0=0.4$	Deney-36	Deney-37	Deney-38	Deney-39	Deney-40

Ra=3.6×10 ⁷	ω (rad/s)	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π	$5\pi/2$
	Wo	65	92	113	131	146
$x_m=280$	$A_0=1.4$	Deney-41	Deney-42	Deney-43	Deney-44	Deney-45
$x_m=220$	$A_0=1.1$	Deney-46	Deney-47	Deney-48	Deney-49	Deney-50
$x_m=150$	$A_0=0.75$	Deney-51	Deney-52	Deney-53	Deney-54	Deney-55
$x_m=80$	$A_0=0.4$	Deney-56	Deney-57	Deney-58	Deney-59	Deney-60

EK B. Boyut Analizi

Düşey periyodik salınlı levha içindeneylerde ısı geçişine etki eden temel fiziksel büyüklükler eşitlik B1.1 ile aşağıda verilmiştir.

$$h = f(\omega, x_m, L, \rho, T_\infty, T_w, \beta, \mu, c_p, k_f, g) \quad (\text{B 1.1})$$

Bu fiziksel büyüklükler kullanılarak önce boyut matrisi oluşturulmuştur. Literatürde, boyut analizi hesabını yapmak için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada yaygın bir yöntem olması nedeniyle sistematik yöntem ile boyut analizi hesabı tercih edilmiştir.

Çizelge B1. Boyut matrisi

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}
	h	ω	c_p	x_m	g	ΔT	β	L	k_f	μ	ρ
M	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
L	0	0	2	1	1	0	0	1	1	-1	-3
T	-3	-1	-2	0	-2	0	0	0	-3	-1	0
θ	-1	0	-1	0	0	1	-1	0	-1	0	0
Birim	W/m ² -K	1/s	J/kg-K	m	m/s ²	K	1/K	m	W/m-K	N-s/m ²	kg/m ³
Boyut	MT ⁻³ θ ⁻¹	T ⁻¹	L ² T ⁻² θ ⁻¹	L	LT ⁻²	θ	θ ⁻¹	L	MLT ⁻³ θ ⁻¹	ML ⁻¹ T ⁻¹	ML ⁻³

Yukarıda verilen matrisin rankı $r = 4$, değişken parametrelerin sayısı ise $n = 11$ 'dir.

Bu problemde, 7 adet bağımsız boyutsuz çarpan elde edilmesi gerekmektedir.

Herhangi bir boyutsuz çarpım;

$$\pi = M^0 L^0 T^0 \theta^0 = h^{k_1} \omega^{k_2} c_p^{k_3} x_m^{k_4} g^{k_5} \Delta T^{k_6} \beta^{k_7} L^{k_8} k_f^{k_9} \mu^{k_{10}} \rho^{k_{11}} \quad (\text{B 1.2})$$

Eşitlik (B 1.2) de verildiği gibi yazılarak, eşitliğin her iki tarafındaki temel boyutların üsleri birbirine eşitlenir.

$$M \text{ 'nin üsleri için, } k_1 + k_9 + k_{10} + k_{11} = 0$$

$$L \text{ 'nin üsleri için, } 2k_3 + k_4 + k_5 + k_8 + k_9 + k_{10} - 3k_{11} = 0$$

$$T \text{ 'nin üsleri için, } -3k_1 - k_2 - 2k_3 - 2k_5 - 3k_9 - k_{10} = 0$$

$$\theta \text{ 'nin üsleri için, } -k_1 - k_3 + k_6 - k_7 - k_9 = 0$$

şeklinde homojen ve lineer bir denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminde, her zaman temel büyüklük sayısı kadar denklem olacaktır. Oysa k değerlerinin sayısı, değişken sayısı kadardır ve denklem sayısından fazladır. Bu durumda çözüm yöntemi gereği bazı k değerlerinin bilindiği kabul edilerek diğer k değerleri bunların cinsinden bulunmuştur. Problemden $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ değerleri keyfi olarak seçilir ve diğer k değerleri bunların cinsinden elde edilirse, bilinen k değerleri, bilinmeyen k değerleri cinsinden ifade edilir ve toplam on bir adet denklem takımı elde edilir. Sayısal değerleri elde etmek için bilinen k değerlerine (0) ve (1) gibi basit değerler verilir ve denklem takımı çözülür, elde edilen k değerlerinden çözümler matrisi oluşturulur. Bu durumda, komple boyutsuz çarpım serisi aşağıdaki şekilde bulunur.

π_1 =Nusselt sayısı

$$\pi_1 = \frac{hL}{k_f} = Nu \quad (B 1.3)$$

π_2 =Kinetik Reynolds sayısı

$$\pi_2 = \frac{\rho\omega L^2}{\mu} = Re_\omega \quad (B 1.4)$$

π_3 =Prandtl sayısı

$$\pi_3 = \frac{\mu c_p}{k_f} = Pr \quad (B 1.5)$$

π_4 =Boyutsuz genlik

$$\pi_4 = \frac{x_m}{L} = A_o \quad (B 1.6)$$

π_5 =5. Boyutsuz sayı

$$\pi_5 = \frac{gL^3\rho^2}{\mu^2} \quad (B 1.7)$$

π_6 =6. Boyutsuz sayı

$$\pi_6 = \frac{k_f\Delta TL^2\rho^2}{\mu^3} \quad (B 1.8)$$

$\pi_7=7$. Boyutsuz sayı

$$\pi_7 = \frac{\beta \mu^3}{k_f L^2 \rho^2} \quad (\text{B 1.9})$$

$\pi_5 \times \pi_6 \times \pi_7$ = Grashof sayısı

$$\pi_5 \times \pi_6 \times \pi_7 = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\vartheta^2} = Gr \quad (\text{B 1.10})$$

$$Nu = f(Re_\omega, Pr, A_o, Gr) \quad (\text{B 1.11})$$



EK C. Belirsizlik Analizi

Çizelge C1. Deneylerdeki belirsizlik miktarı

Deney No	Wo	ω (rad/sn)	Xm	Ao	q(W/m ²)	WTw	WT _o	W ω	Nu,m	WNu	%belirsizlik
q''=250W/m ²											
deney_1	65	1,571	0,28	1,4	250	0,302	0,250	0,224	8580,905	615,888	7,177
deney_2	90	3,142	0,28	1,4	250	0,302	0,250	0,224	12805,930	468,887	3,661
deney_3	113	4,712	0,28	1,4	250	0,302	0,250	0,224	15918,299	404,901	2,544
deney_4	131	6,283	0,28	1,4	250	0,302	0,250	0,224	21500,055	417,040	1,940
deney_5	146	7,854	0,28	1,4	250	0,302	0,250	0,224	32306,586	500,178	1,548
deney_6	65	1,571	0,22	1,1	250	0,302	0,250	0,224	8083,234	581,626	7,195
deney_7	90	3,142	0,22	1,1	250	0,302	0,250	0,224	12048,970	444,215	3,687
deney_8	113	4,712	0,22	1,1	250	0,302	0,250	0,224	15515,199	394,318	2,541
deney_9	131	6,283	0,22	1,1	250	0,302	0,250	0,224	19548,091	385,558	1,972
deney_10	146	7,854	0,22	1,1	250	0,302	0,250	0,224	24166,746	392,357	1,624
deney_11	65	1,571	0,15	0,75	250	0,302	0,250	0,224	8094,373	582,848	7,201
deney_12	90	3,142	0,15	0,75	250	0,302	0,250	0,224	11805,540	436,937	3,701
deney_13	113	4,712	0,15	0,75	250	0,302	0,250	0,224	14354,375	373,286	2,601
deney_14	131	6,283	0,15	0,75	250	0,302	0,250	0,224	17219,232	353,513	2,053
deney_15	146	7,854	0,15	0,75	250	0,302	0,250	0,224	22219,670	364,327	1,640
deney_16	65	1,571	0,08	0,4	250	0,302	0,250	0,224	8034,363	577,954	7,194
deney_17	90	3,142	0,08	0,4	250	0,302	0,250	0,224	11359,903	420,395	3,701
deney_18	113	4,712	0,08	0,4	250	0,302	0,250	0,224	13837,773	358,286	2,589
deney_19	131	6,283	0,08	0,4	250	0,302	0,250	0,224	16044,178	329,057	2,051
deney_20	146	7,854	0,08	0,4	250	0,302	0,250	0,224	18339,521	314,456	1,715
q''=500W/m ²											
deney_21	65	1,571	0,28	1,4	500	0,302	0,250	0,224	5323,938	405,727	7,621
deney_22	90	3,142	0,28	1,4	500	0,302	0,250	0,224	7679,378	344,468	4,486
deney_23	113	4,712	0,28	1,4	500	0,302	0,250	0,224	9752,017	338,070	3,467
deney_24	131	6,283	0,28	1,4	500	0,302	0,250	0,224	11895,785	353,207	2,969
deney_25	146	7,854	0,28	1,4	500	0,302	0,250	0,224	14919,435	381,601	2,558
deney_26	65	1,571	0,22	1,1	500	0,302	0,250	0,224	5073,101	388,228	7,653
deney_27	90	3,142	0,22	1,1	500	0,302	0,250	0,224	7298,768	329,891	4,520
deney_28	113	4,712	0,22	1,1	500	0,302	0,250	0,224	9164,952	334,951	3,655
deney_29	131	6,283	0,22	1,1	500	0,302	0,250	0,224	11312,671	360,798	3,189
deney_30	146	7,854	0,22	1,1	500	0,302	0,250	0,224	13701,078	380,573	2,778
deney_31	65	1,571	0,15	0,75	500	0,302	0,250	0,224	5104,464	389,752	7,636
deney_32	90	3,142	0,15	0,75	500	0,302	0,250	0,224	7228,849	332,044	4,593
deney_33	113	4,712	0,15	0,75	500	0,302	0,250	0,224	9048,564	330,963	3,658
deney_34	131	6,283	0,15	0,75	500	0,302	0,250	0,224	10629,002	366,875	3,452
deney_35	146	7,854	0,15	0,75	500	0,302	0,250	0,224	12590,253	380,177	3,020
deney_36	65	1,571	0,08	0,4	500	0,302	0,250	0,224	5025,479	389,985	7,760
deney_37	90	3,142	0,08	0,4	500	0,302	0,250	0,224	7128,601	335,458	4,706
deney_38	113	4,712	0,08	0,4	500	0,302	0,250	0,224	8814,486	326,546	3,705
deney_39	131	6,283	0,08	0,4	500	0,302	0,250	0,224	10205,136	346,319	3,394
deney_40	146	7,854	0,08	0,4	500	0,302	0,250	0,224	11577,997	375,678	3,245
q''=625W/m ²											
deney_41	65	1,571	0,28	1,4	625	0,302	0,250	0,224	4492,062	363,615	8,095
deney_42	90	3,142	0,28	1,4	625	0,302	0,250	0,224	6484,652	335,392	5,172
deney_43	113	4,712	0,28	1,4	625	0,302	0,250	0,224	8234,313	358,918	4,359
deney_44	131	6,283	0,28	1,4	625	0,302	0,250	0,224	10042,877	403,087	4,014
deney_45	146	7,854	0,28	1,4	625	0,302	0,250	0,224	12396,223	436,189	3,519
deney_46	65	1,571	0,22	1,1	625	0,302	0,250	0,224	4477,534	363,991	8,129
deney_47	90	3,142	0,22	1,1	625	0,302	0,250	0,224	6424,566	341,480	5,315
deney_48	113	4,712	0,22	1,1	625	0,302	0,250	0,224	7913,055	376,636	4,760
deney_49	131	6,283	0,22	1,1	625	0,302	0,250	0,224	9612,544	398,052	4,141
deney_50	146	7,854	0,22	1,1	625	0,302	0,250	0,224	11530,480	452,577	3,925
deney_51	65	1,571	0,15	0,75	625	0,302	0,250	0,224	4499,188	365,857	8,132
deney_52	90	3,142	0,15	0,75	625	0,302	0,250	0,224	6369,648	339,417	5,329
deney_53	113	4,712	0,15	0,75	625	0,302	0,250	0,224	7856,438	355,287	4,522
deney_54	131	6,283	0,15	0,75	625	0,302	0,250	0,224	9130,787	388,233	4,252
deney_55	146	7,854	0,15	0,75	625	0,302	0,250	0,224	10461,599	414,108	3,958
deney_56	65	1,571	0,08	0,4	625	0,302	0,250	0,224	4395,457	369,946	8,417
deney_57	90	3,142	0,08	0,4	625	0,302	0,250	0,224	6271,113	349,439	5,572
deney_58	113	4,712	0,08	0,4	625	0,302	0,250	0,224	7746,116	378,073	4,881
deney_59	131	6,283	0,08	0,4	625	0,302	0,250	0,224	8917,389	433,107	4,857
deney_60	146	7,854	0,08	0,4	625	0,302	0,250	0,224	10047,402	460,335	4,582
sabit_levha											
deney_61	H/L=2	sabit			250	0,151	0,250		127,249	1,144	0,899
deney_62	H/L=2	sabit			500	0,151	0,250		75,179	2,222	2,955
deney_63	H/L=2	sabit			625	0,151	0,250		67,777	2,603	3,841
deney_64	H/L=1	sabit			500	0,151	0,250		77,306	2,305	2,982
deney_65	H/L=3	sabit			500	0,151	0,250		75,994	2,392	3,148
Toplam belirsizlik (%)										4,25	

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Selma AKÇAY
Adres : Yakut mah. Akmescit cad. Beyza apt. No:37/37
Kocasinan/KAYSERİ
E-posta adresi : selma.352@hotmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği, 1995-2000
Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği ABD. 2012-2015
Doktora : Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği ABD. 2015-

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Nevşehir İl Sağlık Müdürlüğü 2008-2009
2. Kayseri İl Sağlık Müdürlüğü 2009-halen

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Düşey Düz bir Levhanın Periyodik Salınımlarının Isı Transferine Etkisi, Selma AKÇAY, Ünal AKDAĞ, Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi (Aralık, 2019), Kabul edildi
2. Investigation of heat transfer performance using an oscillating vertical flat plate, Selma AKCAY, Unal AKDAG, Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal, (September 2019), Under Review
3. Experimental investigation of mixed convection on an oscillating vertical flat plate, Selma AKCAY, Unal AKDAG, Hakan PALANCIOGLU, International Communications in Heat and Mass Transfer, (May 2019), Under Review

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Salınımlı düşey levhadan ısı transferinin deneysel incelenmesi, Selma AKCAY, Unal AKDAG, Hakan PALANCIOGLU, (25-27 April 2019), 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2019), Antalya, Turkey, sözlü sunum
2. The Investigation of the mixed convection heat transfer on an oscillating vertical plate, Selma AKCAY, Unal AKDAG, (11-14 September 2019), 22nd International Congress on Thermal Science and Technology (ULIBTK 2019), Kocaeli, Turkey, sözlü sunum