



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN:1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferine etkisi

Effect on heat transfer of periodic oscillations of a vertical flat plate

Yazar(lar) (Author(s)): Selma AKÇAY¹, Ünal AKDAĞ²

ORCID¹: 0000-0003-2654-0702

ORCID²: 0000-0002-1149-742

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Akçay S., Akdağ Ü., “Düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1317-1326, (2020).

Erişim linki(To link to this article):<http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.648373

Düşey Düz Bir Levhanın Periyodik Salınımlarının Isı Transferine Etkisi

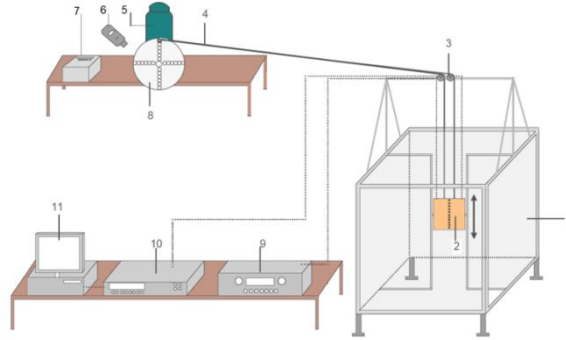
Effect on Heat Transfer of Periodic Oscillations of a Vertical Flat Plate

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Hareketli dikey düz levha / Moving the vertical flat plate
- ❖ Salınım genliği ve frekansı / Oscillation amplitude and frequency
- ❖ Isı transferi / Heat transfer

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferi üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. / In this study, effects on heat transfer of periodic oscillation of a vertical flat plate are experimentally and numerically investigated.



Şekil. Deneysel şematığı / Figure. Experimental schema

Amaç (Aim)

Bu çalışma, düşey bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferine etkisini araştırmak için yapılmıştır. / This study was carried out to investigate the effect on heat transfer of periodic oscillations of a vertical plate.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Periyodik hareketli düşey levha üzerinde ısı geçişi, hem deneysel hem de ANSYS Fluent (18.2) ile sayısal olarak incelenmiştir. / Heat transfer on a periodically moving vertical plate was studied both experimentally and numerically with ANSYS Fluent (18.2).

Özgünlük (Originality)

Salınım hareketinin karmaşık dinamik yapısı nedeniyle ısı transferine etkisi tam anlaşılamamıştır ve yeni araştırmalara ihtiyaç vardır. / Due to the complex dynamics of the oscillatory motion, its effect on heat transfer is not fully understood and new researches are needed.

Bulgular (Findings)

Sonuçlar, tablo ve şekillerle sunulmuştur. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki uyum gösterilmiştir. / Results are presented in the tables and figures. The agreement between the experimental and numerical results is shown.

Sonuç (Conclusion)

Sonuçlar, ısı transferinin salınım genliği ve frekansının artması ile arttığını göstermiştir. / The results are shown the heat transfer increases with the increase in both oscillation amplitude and frequency.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Düşey Düz bir Levhanın Periyodik Salınımlarının Isı Transferine Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Selma AKÇAY^{1*}, Ünal AKDAĞ²

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Müh. ABD, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 18.11.2019 ; Kabul/Accepted : 30.12.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferi üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel sistemi, içinde deneysel modelin hareket ettiği şeffaf bir muhafazayı, modelin salınım hareketini üreten volan-motor sistemini, güç kaynağını, veri toplama sistemini ve bilgisayarı içerir. Deneysel model, üzerine termoelemanlar yerleştirilmiş iki bakır levha ve levhalar arasında yerleştirilmiş Kapton ısıtıcılardan oluşur. Çalışmada, levhanın yüzeyine uygulanan ısı akısı (q''), Womersley sayısı (Wo) ve boyutsuz salınım genliği (Ao) değiştirilmiş ve bu parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca, çalışma deneysel verilere dayalı kontrol hacim tabanlı bir HAD çözücüsü kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Salınım genliği ve frekansının ısı transferine etkisini göstermek için levha yüzeyinde anlık hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar, ısı transferinin salınım parametrelerinden önemli derecede etkilendiğini ve salınım genliği ve frekansının artması ile arttığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Salınım genliği, salınım frekansı, hareketli düşey levha, ısı transferi.

Effect on Heat Transfer of Periodic Oscillations of a Vertical Flat Plate

ABSTRACT

In this study, effects on heat transfer of periodic oscillation of a vertical flat plate are experimentally and numerically investigated. The experimental setup includes a transparent enclosure hosting a moving experimental model, flywheel-motor assembly generating the oscillating movement of the model, power supply, data logger and personal computer. The experimental model comprises two copper plates with attached thermocouples and Kapton heaters placed between the plates. In the study, heat flux applied to surface of the plates (q''), the Womersley number (Wo) and dimensionless oscillation amplitude (Ao) are varied and the effect of these parameters on the heat transfer is analysed. Furthermore, the study is numerically solved using a control-volume based CFD solver based on experimental data. The numerical results are compared with the experimental results. Instantaneous velocity and temperature profiles of the plate are obtained to explain the heat transfer mechanism. The numerical and experimental results are shown heat transfer is significantly affected by oscillation parameters and the heat transfer increases with the increase in both oscillation amplitude and frequency.

Keywords: Oscillation frequency, oscillation amplitude, moving the vertical plate, heat transfer.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal taşınım ısı transferi, enerji verimliliğinin önem kazanmasıyla pek çok bilimsel ve teknolojik alanlarda uygulanan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak günümüzde ısıtma ve soğutma uygulamalarında yalnız doğal taşınımın kullanılması ısı transferinde yetersiz kalmakta ve doğal taşınımın birlikte ısı transferini artıran alternatif yöntemler üzerinde durulmaktadır.

Zorlanmış taşınım, ısı taşınım katsayısının doğal taşınımından çok yüksek olması nedeniyle ısı transferinde sıklıkla tercih edilmektedir. Zorlanmış taşınım ısı transferinde, özellikle akış yatay olduğu zaman, ısıtılmış yüzeyler üzerindeki kaldırma kuvvetleri ihmal

edilmektedir, ancak düşey veya eğimli yüzeylerde kaldırma kuvvetleri akış alanında kuvvetli bir etkiye sahiptir ve bu durumlarda doğal taşınımı ihmal etmek büyük hatalara neden olmaktadır. Özellikle akışkan hızının düşük olduğu ve/veya yüzeyin sıcaklığının yüksek olduğu düşey veya eğimli yüzeylerde ısı transferi uygulamalarında zorlanmış taşınım ve doğal taşınım etkilerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Doğal taşınım ve zorlanmış taşınımın birlikte görülmesi durumu karışık taşınım olarak adlandırılır. Dolayısı ile doğal ve zorlanmış taşınım ısı transferini iyileştiren tüm aktif ve pasif ısı transferi yöntemleri, karışık taşınım ısı transferini de iyileştirebilir. Yüzey alanını artırmak için kanatçık kullanımı, akış içine çeşitli türbülantörlerin ilavesi, elektrik veya manyetik alan uygulamaları, temel akışkan içine nano boyutlu partiküllerin eklenmesi, süperkritik şartlar altında temel akışkanların kullanılması, salınımlı/pulsatif akışlar veya

*Sorumlu Yazar (Corresponding author)
e-posta : selma.352@hotmail.com

hareketli yüzeylerin kullanılması gibi uygulamalar ısı transferini artırmaktadır [1-9].

Salınlı/hareketli yüzeyler üzerinde hız ve sıcaklık dağılımları yüzeydeki ısı transfer hızını etkileyebilir. Hareketli yüzeyler üzerinde sınır tabaka içindeki kaldırma etkileri yatay yüzeyler için [10-11], eğik yüzeyler için [12-14], düşey yüzeyler için [15-18] pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalardan, salınlı akışların, yüksek ısı ve kütle transferine neden olduğu bilinmektedir. Salınım hareketi ya sabit bir cisim etrafındaki akışkanın titreşimi ile ya da durgun bir ortamdaki katı yüzeyin titreşimi ile elde edilmektedir. Her ikisinde de aynı amaca ulaşılmasına rağmen, sabit bir cisim etrafındaki akışkan titreşimi için daha fazla enerji gerekmektedir. Salınlı akışlar, yüksek performanslı kompakt ısı değiştiricilerinde, pistonlu motorlarda, pulsatif yakıcılarda, kimyasal reaktörlerde, stirling motorlarında, kriyojenik soğutucularda, uzay endüstrisinde ve askeri alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [19-23].

Prasad ve Ramanathan [24], elektrikle ısıtılmış dikey bir levhadan doğal taşınım ısı transferi üzerinde, boyuna harmonik salınımların etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, farklı salınım genliği (0-25 inch), salınım frekansı (10-20 cps) ve levha sıcaklığı (100-200 °F) için sınır tabakada sıcaklık profillerini Mach-Zehnder interferometer ile ölçmüşlerdir. Isı transferinin salınım parametrelerine bağlı olarak arttığını ve en yüksek ısı transferinin %33 olarak elde edildiğini bildirmişlerdir. Zhang vd. [25], periyodik salınlı, ısıtılmış dikey bir levhadan doğal taşınım ısı transferini laminer akış şartlarında incelemişler ve sonuçlarını literatürdeki teorik çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca, levha salınımlarının sabit levhaya göre ısı transferini önemli derecede iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Goma ve Taweel, [26] sabit sıcaklığa sahip düşey yüzeylerde doğal ve zorlanmış taşınım ısı transferi üzerinde salınımların etkisini analitik olarak incelemişler ve yüzey salınımlarının ısı transferinin iyileşmesinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Saeid [27], düşey bir levha yüzeyinden zamana bağlı, karışık taşınım üzerinde sıcaklığın periyodik salınımlarının etkisini implicit sonlu fark metodu ile incelemiştir. Düşey levhada, sıcaklığın farklı genlik ve frekanslarında, yardımcı ve zıt yöndeki akışın ısı transferini ve sürtünme katsayısını laminer akış rejiminde $Pr=0.72$ ve $Pr=7.0$ için araştırmıştır. Çalışma sonucunda sabit Pr ve Ri sayıları için yüzey sıcaklık salınımlarının genliğinin veya frekansının artması ile çevrim ortalamalı Nu sayısının azaldığını bildirmiştir.

Nobari ve Naderan, [28] farklı salınım frekansı ve genliğine sahip iki boyutlu dairesel bir silindir etrafındaki akışı, sonlu eleman metodu kullanarak incelemişlerdir. Akış alanında cismin hareketini tariflemek için Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE) şeması kullanarak silindir hareketinin çapraz akış ve düz salınım için iki farklı durumunu araştırmışlardır. Sayısal sonuçların deneysel

verilerle karşılaştırmasını yaparak, simülasyonların $Re=300$ 'e kadar geçerli olduğunu belirterek akış görüntüleme yöntemi ile silindir salınımlarının akış alanı ve vorteks şekli üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Ayrıca, sonuçları literatürde yer alan deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Ramesh vd. [29], taşınım sınır şartları ile eğimli sabit/hareketli düz bir levhanın geçen akış ve ısı transferinde sınır tabaka için matematiksel bir model sunmuşlardır. Akış ve ısı transferi üzerinde levhanın eğim açısının, Pr , yerel Gr ve Biot sayılarının etkilerini analiz etmişler, çalışmalarının sonucunda, sabit levhanın sıcaklığının, hareketli levhanın sıcaklığından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Li vd. [30], sabit ısı akısına sahip dikdörtgen düşey düz bir düzlemden ısı transferini ve etrafındaki akışkan akışını, laminer pulsatif akış şartlarında sayısal olarak inceleyerek elde ettikleri sonuçları, yaptıkları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Sonuçta, pulsatif parametrelerin akış ve ısı transferini önemli derecede etkilediğini ve düşük pulsatif genliklerde sıcaklık değişimlerinin tek tepe noktası oluşturduğunu, yüksek pulsatif genliklerde ise sıcaklığın çoklu tepe modlarında dalgalandığını göstermişlerdir. Krishna ve Jyothi [31], gözenekli bir ortam içerisinde bulunan salınlı levhanın üniform manyetik alan etkisi altında, ısı ve kütle transferini teorik olarak incelemişler ve salınım 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. [32], analitik çalışmalarında, tam çözümler için Laplace ve sonlu Hankel dönüşümlerini uygulayarak düşey yönde salınlı bir silindirde, doğal taşınım sonucu gerçekleşen ısı transferini incelemişler ve silindirin kosinüs ve sinüs salınımlarına karşılık gelen hız ve sıcaklık dağılımlarını elde etmişlerdir. Sonuç olarak Pr sayısının artması ile sıcaklık değerlerinin düştüğünü ve Nu sayısının arttığını, zamanın çok küçük değerlerinde taşınım ısı transferi baskın iken, büyük değerlerinde iletim yoluyla ısı transferinin daha baskın olduğunu, ayrıca akışkan hızının Gr sayısı ile arttığını, Pr sayısı ile azaldığını bildirmişlerdir.

Ghiasi vd. [33], döner salınlı, dairesel silindirden tutturulmuş bir ayırma plakasında laminer sıkıştırılmaz akış için ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Parametrik çalışmalarında salınım frekansı, ayırıcı plaka uzunluğu ve Re sayısını değiştirerek bu parametrelerin akış ve ısı transferine etkilerini incelemişlerdir. Farklı frekanslarda salınımların 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, sürüklemenin azaltılması ve ısı transferi artışında hem olumlu hem de olumsuz etkilere sahip olabileceğini gözlemlenmiştir.

Sarhan vd. [34], yatay ve farklı açılarda eğimli düz bir alüminyum levhanın ısı performansı üzerinde, düşey düzlemden sinüzoidal titreşimlerin etkilerini deneysel olarak incelemişler ve çalışmalarında titreşim genliğini

(1.5-7.5 mm), titreşim frekansını (0-16 Hz) ve oryantasyon açısını (30°, 45° ve 60°) değiştirmişlerdir. Sonuçta, ortalama ısı transferi katsayısının, plakanın yatay olduğu durumlarda çok daha yüksek olduğunu, oryantasyon açısı arttıkça azaldığını bildirmişler ve salınım frekansındaki artışın, ortalama ısı transfer katsayısında bir artışa yol açtığını ve maksimum artışın, yatay konumda ve yüksek frekanslarda elde edildiğini belirtmişlerdir. Lee vd. [35], kare şeklinde kapalı bir muhafaza içerisinde, dönen düz bir levhadan ve ısı kaldırma kuvvetlerinden meydana gelen karışık taşınım ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Hesaplamalarını, Pr sayısını sabit ($Pr=0.71$) tutarak farklı Rayleigh sayısı ve rotasyonel Re sayısı için gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, ısı transferi için kritik bir Ra sayısı olduğunu ($Ra=0.13 \times 10^6$) ve bu değerin 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.

Salınlı akışlar ve hareketli yüzeyler ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalarda, genelde ısı transferinin iyileştiği yönünde görüşler bildirilmekle birlikte aksi yönde görüşlerde mevcuttur [33, 36]. Ayrıca bu konuda deneysel çalışmalar oldukça azdır. Periyodik salınım hareketinin dinamiğinin karmaşık olması nedeniyle ısı transferi üzerindeki etkisi tam olarak anlaşılabilmiştir. 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 parametreleri belirlemek için yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, sabit ısı akısına sahip düşey bir levhanın yüzeyinde karışık taşınım ısı transferi üzerinde periyodik salınımların etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

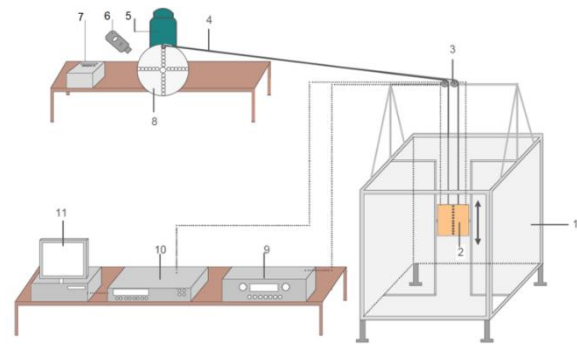
2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada kullanılan deney sistemi Şekil 1'de verilmiştir. İçerisinde, deneysel modelin salınım hareketini yaptığı $800 \times 800 \times 800$ mm³ ölçülerinde alüminyum profilden oluşan bir muhafaza tasarlanmıştır. Bu muhafazanın alt ve üst kısmı açık, diğer yan yüzeyleri kapalıdır. Muhafazanın amacı, deneysel modele baca etkisi oluşturmak ve dışardan gelen hava akımlarını önlemektir. Deneysel modelin, düşey yönde hareketini sağlamak için muhafaza içerisine kılavuz raylar monte edilmiş ve alüminyum çerçevenin üzerine askı sistemi oluşturulup 4 adet makara yerleştirilmiştir.

Deneysel model, $210 \times 210 \times 1.5$ mm³ ölçülerinde iki adet düz bakır levha, levhaların üzerine belirli aralıklarla monte edilen termoelemanlar ve levhalar arasına yerleştirilen Kapton ısıtıcılardan oluşmuştur. Modelin alt kısmına $210 \times 15 \times 4$ mm³ ölçülerinde üçgen şeklinde ahşap uç yerleştirilmiştir. Deneysel modelin detayları Şekil 2'de şematik olarak verilmiştir.



a



b

Şekil 1. a-Deney sistemi (Experimental setup), b-Deney şematığı (Experimental schema)

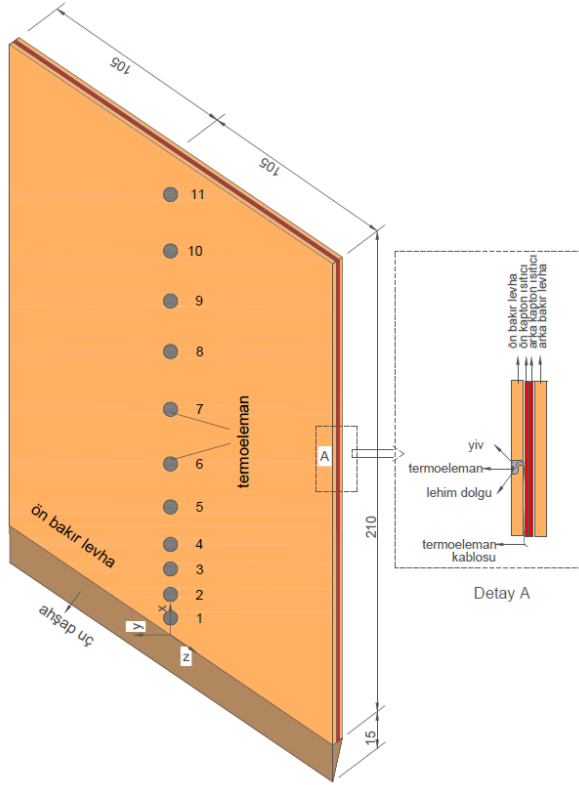
(1- Şeffaf muhafaza, 2- Deneysel model, 3- Makara sistemi, 4- Askı sistemi, 5- DC motor, 6- Takometre, 7- Hız ayar ünitesi, 8-Volan, 9- Güç kaynağı, 10-Veri toplama sistemi, 11- Bilgisayar.)

Yüzey sıcaklığını ölçmek için bakır levhalar üzerine, orta eksen boyunca, düşey yönde, tek sıra halinde, belli aralıklarla K-tipi termoelemanlar yerleştirilmiştir. Ön bakır levhada 11, arka bakır levhada ise 3 adet termoeleman bulunmaktadır. Ortam sıcaklığını ölçmek için 2 adet termoeleman kullanılmıştır. Termoeleman kabloları, deneysel modelin yan kısımlarından dışarı çıkarılmış ve veri toplama sistemine bağlanmıştır.

Yüzey sıcaklığını ölçmek için bakır levhalar üzerine, orta eksen boyunca, düşey yönde, tek sıra halinde, belli aralıklarla K-tipi termoelemanlar yerleştirilmiştir. Ön bakır levhada 11, arka bakır levhada ise 3 adet termoeleman bulunmaktadır. Ortam sıcaklığını ölçmek için 2 adet termoeleman kullanılmıştır. Termoeleman kabloları, deneysel modelin yan kısımlarından dışarı çıkarılmış ve veri toplama sistemine bağlanmıştır.

Kapton ısıtıcılardan çıkan güç kabloları ise güç kaynağına bağlanmıştır. Hesaplamalarda, ön bakır levhada bulunan 11 adet termoelemanın alınan sıcaklık değerleri değerlendirmeye alınmış, arka bakır levhadaki termoelemanlar ise kontrol amacıyla kullanılmıştır. Veri toplama sisteminden alınan sıcaklık verileri bilgisayara aktarılmış ve bu veriler ısı transferi hesaplamalarında kullanılmıştır. Deneysel modelin üst kısmına açılan iki ayrı delikten rijit bir ip geçirilmiş ve bu ipler

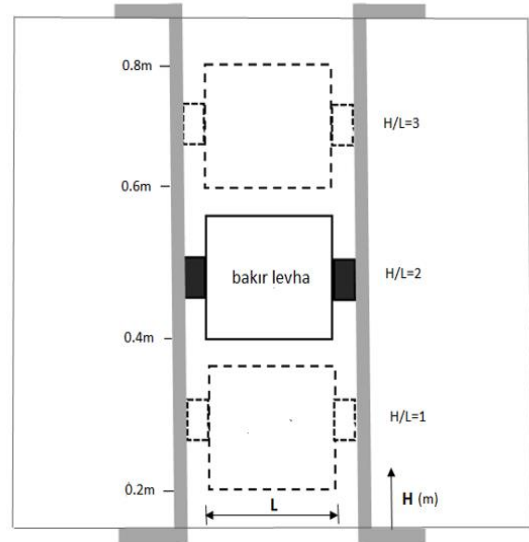
makaralardan geçirilerek belli mesafeden sonra birleştirilmiş ve volana bağlanmıştır. Modelin periyodik salınım hareketinde kullanılan volan, 2.4 kW bir DC motor tarafından tahrik edilmektedir. Volan üzerinde açılmış deliklerden salınımın genliği ve motor hız ayar ünitesinden salınımın frekansı ayarlanmaktadır.



Şekil 2. Deneysel model (Experimental model)

Deneyleerin uygulanmasında, ilk önce sabit ısı akısına sahip deneysel model, şeffaf muhafazanın içerisinde düşey olarak üç ayrı konumda sabit bırakılmıştır. Bu konumlar, H/L ile tariflenmiştir (Şekil 3). Burada H, muhafazanın altından ölçülen düşey mesafeyi, L ise levha uzunluğunu göstermektedir. Deneysel model, şeffaf muhafaza içinde üç farklı konumunda (H/L=1, 2, 3) sabit bırakılmış ve her H/L konumda levha yüzeyinden alınan sıcaklıklar kaydedilmiştir. Daha sonra sabit levhadan elde edilen sıcaklıklara göre doğal taşınım ile ısı transferi hesaplanmış ve H/L=2 ile elde edilen değer, salınımlı levhanın ısı transferinde referans olarak kullanılmıştır.

Periyodik salınım hareketi için deneysel model, şeffaf muhafaza içerisinde H/L=2 konumunda bırakılmış, volan üzerinden salınım genliği, motor hız ünitesinden salınım frekansı ayarlanmış ve levhaya verilen sabit ısı akısı güç kaynağından ayarlanmıştır. Böylece deneysel model, şeffaf muhafaza içinde, belirlenen sabit ısı akısında, belirli genlik ve frekansta periyodik olarak salınım hareketine belirli bir süre (t=2700s) devam etmiştir. Bu süre sonunda, termoelemanlardan alınan sıcaklık verilerine göre karışık taşınım ile ısı transferi hesaplanmıştır.



Şekil 3. Deneysel modelin muhafaza içindeki H/L konumları (H/L positions of experimental model in enclosure)

Bu çalışmada, ısı transferini etkileyen boyutsuz sayılar aşağıda verilmiştir:

$$Nu = f(Pr, Gr, Re_w, A_o)$$

Deneysel modelin salınım genliği ve salınım frekansını tariflemek için boyutsuz salınım genliği (A_o) ve Womersley sayısı (Wo) kullanılmıştır:

kullanılmıştır:

$$Wo = L \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (1)$$

$$A_o = \frac{x_m}{L} \quad (2)$$

burada, ω , ν , x_m , L parametreleri sırasıyla açılma hızı (rad/s), kinematik viskoziteyi (m^2/s), volanın genişliğini (m), levha uzunluğunu (m) göstermektedir. Deneyleer, üç farklı ısı akısında (q'' : 250 W/m², 500 W/m² ve 625 W/m²), dört farklı boyutsuz salınım genliğinde (A_o : 0.4, 0.75, 1.1, 1.4) ve beş farklı Wo sayısında (Wo : 65, 92, 113, 131, 146) yapılmıştır.

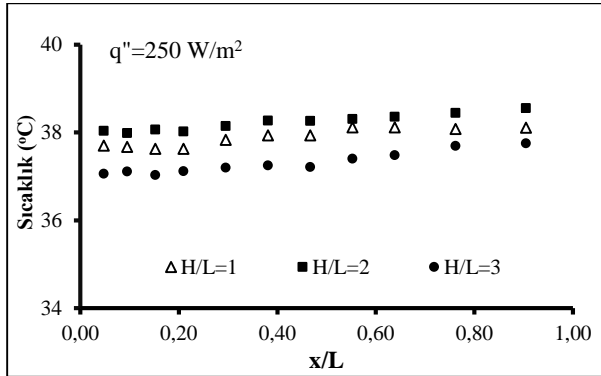
Sabit ısı akısına sahip düşey levhanın periyodik salınım hareketinden dolayı levha üzerinde periyodik akış meydana gelmekte ve alınan sıcaklık değerleri zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, her bir termoelemanından alınan sıcaklık verileri zamana bağlı olarak ayrı ayrı kaydedilmiştir. Ortalama sıcaklıklar, her bir termoelemanından alınan anlık sıcaklıkların zaman ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Zaman aralıkları eşit olduğu için ortalama sıcaklıklar Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır.

$$T_{w,x} = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{i=1}^N T_{w,i} \Delta t \quad (3)$$

burada, N toplam veri sayısı, Δt zaman aralığı, T_w yüzeyin anlık sıcaklıklarını göstermektedir. Ortalama levha yüzey sıcaklığı ise her termoelemanından alınan ortalama sıcaklıkların aritmetik ortalaması ile bulunmuştur (Eşitlik 4).

$$\bar{T}_w = \frac{T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + \dots + T_{wn}}{n} \quad (4)$$

$q''=250 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında, deneysel modelin, şeffaf muhafaza içindeki farklı H/L sabit konumlarında levha yüzey sıcaklıkları Şekil 4'te verilmiştir. Yüzey sıcaklıkları, H/L=3 konumunda en düşük, H/L=2 konumunda en yüksek olarak bulunmuştur. Referans olarak alınan doğal taşınım ile ısı transferi hesaplamalarında H/L=2 konumu kullanılmıştır.



Şekil 4. Deneysel modelin farklı H/L konumları için yüzey sıcaklıkları (Surface temperatures for different H/L positions of the experimental model) ($q''=250 \text{ W/m}^2$)

Şekil 5 ile $q''=625 \text{ W/m}^2$ için, farklı salınım genliği ve frekans ile yüzey sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Düşük genlikte, Wo sayısının yüzey sıcaklıkları üzerindeki etkisi çok azdır, yüksek genliklerde ise salınım frekansının etkisi daha net gözlemlenmiştir. Yüksek genliklerde, levha yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın arttığı ve Wo sayısının artması ile yüzey sıcaklıklarının düştüğü görülmektedir.

Bu çalışmada, hem sabit düşey levha üzerindeki doğal taşınım ile ısı transferi hem de periyodik salınımlı düşey levha üzerindeki karışık taşınım ile ısı transferi hesaplanmıştır. Isı transferi için kullanılan Nu sayısı Eşitlik 5 ile verilmiştir.

$$Nu(x, t) = \frac{h(x, t)L}{k_f} \quad (5)$$

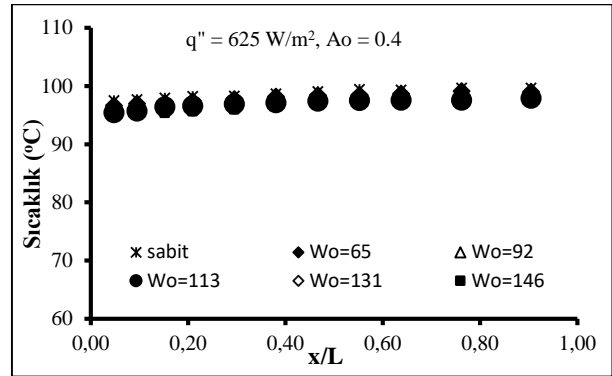
Periyodik akışta, çevrim ortalamalı Nu sayısı ise Eşitlik 6'da verilmiştir.

$$Nu_m = \frac{1}{\tau L} \int_0^L \int_0^\tau Nu(x, t) dt dx \quad (6)$$

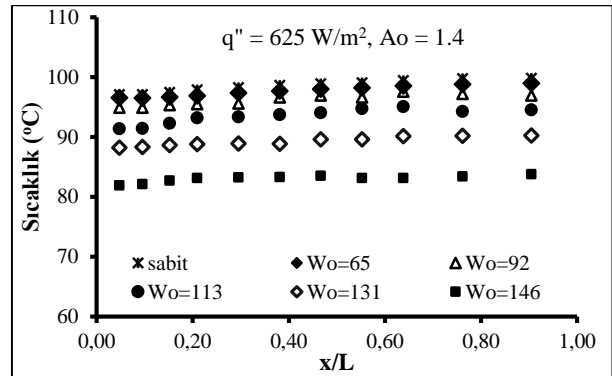
burada, τ periyodik akışın çevrim zamanı, L (m) ise levha uzunluğudur. Hesaplamalarda kullanılan ortalama Nu sayısı Eşitlik 7 ile tariflenmiştir;

$$Nu_m = \frac{q''L}{k_f(\bar{T}_w - T_\infty)} \quad (7)$$

burada, h ($\text{W/m}^2\text{K}$) ısı taşınım katsayısı, k (W/mK) akışkanın ısı iletim katsayısı, T_w ($^\circ\text{C}$) yüzeyin ortalama sıcaklığı, ve T_∞ ($^\circ\text{C}$) ise ortam sıcaklığıdır. Kapton ısıtıcı tarafından yüzeye uygulanan sabit ısı akısı ise q'' (W/m^2) olarak tariflenmiştir.



a



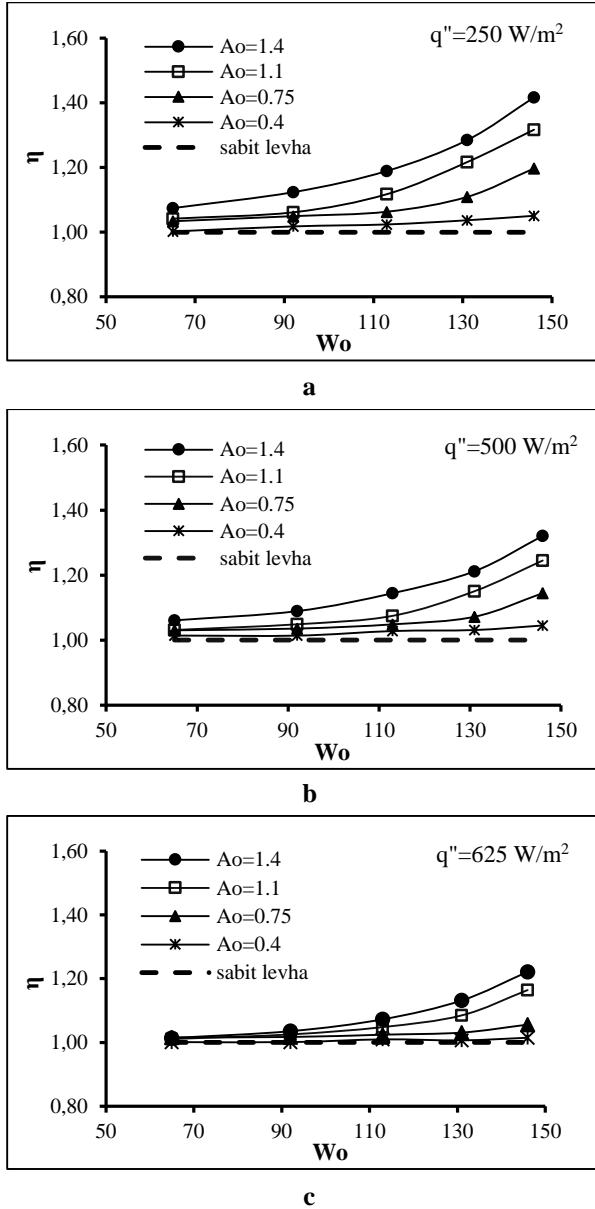
b

Şekil 5. Salınım frekansı ile levha yüzey sıcaklıklarının değişimi, (Variation of the plate surface temperatures with oscillation frequency) a- $Ao=0.4$, b- $Ao=1.4$ ($q''=625 \text{ W/m}^2$)

Periyodik salınımlı düşey levha üzerinde karışık taşınım için elde edilen Nu sayısının (Nu_m), H/L=2 konumunda sabit bırakılan düşey levha üzerinde doğal taşınım için hesaplanan Nu sayısına (Nu_s) oranı ısı transferi performansı (η) olarak tariflenmiş ve Eşitlik 8'de verilmiştir. Isı transferi performansının 1'den büyük olması, sabit levha üzerinde doğal taşınım ile ısı transferine göre, salınımlı levha üzerinde karışık taşınım ısı transferindeki iyileşmeyi göstermektedir.

$$\eta = \frac{Nu_m}{Nu_s} \quad (8)$$

Şekil 6'da farklı ısı akılarında, değişen genlik ve frekansların ısı transferi performansına etkileri verilmiştir. Tüm ısı akılarında artan genlik ve frekansla birlikte ısı transferi performansının da arttığı görülmektedir. Düşük ısı akılarında bu artışın daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, artan ısı akılarında doğal taşınım ile Nu sayısının artmasından kaynaklanmaktadır. En yüksek ısı transferi performansı, $q''=250 \text{ W/m}^2$ için yüksek genlikte ($Ao = 1.4$) ve yüksek frekansta ($Wo = 146$) elde edilmiştir. Deneysel çalışmada, Holman [37] tarafından geliştirilen "Belirsizlik Analizi" yöntemi ile deneylerdeki toplam belirsizlik hesaplanmış ve ortalama toplam belirsizlik % 4.23 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6. Farklı ısı akıları için değişen genlik ve frekansla ısı transfer performansının değişimi (Variation of heat transfer performance with varying amplitude and frequency for different heat fluxes), a-q''=250 W/m², b-q''=500 W/m², c-q''=625 W/m²

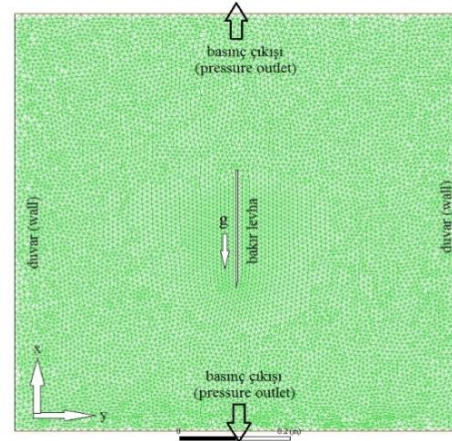
3. SAYISAL ÇALIŞMA (NUMERICAL STUDY)

Bu bölümde, düşey yönde periyodik hareketli düz levha üzerinde karışık taşınım ile oluşan ısı geçişi, deneysel parametreler esas alınarak sayısal olarak incelenmiştir. Simülasyonlarda, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analiz yöntemine göre çözüm yapan ANSYS FLUENT 18.2 ticari yazılımı kullanılmıştır. Bu programda, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sonlu hacimler yöntemi ile ayrıştırılmaktadır [38]. Sayısal çözüm alanının çizilmesi ve hücrelere bölünmesi (mesh) Workbench programı ile yapılmıştır. Sayısal model için şeffaf muhafaza 800×800 mm² 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 7'de verilmiştir.

Grid bağımsızlığını sağlamak, optimum hücre sayısı ve büyüklüğünü tespit etmek amacıyla farklı eleman sayılarında testler uygulanmış ve elde edilen Nu sayıları karşılaştırılmıştır. Bu nedenle, H/L=2 konumunda q''=250 W/m² için sabit düşey levha yüzeyinden doğal taşınım ile elde edilen Nu sayıları hesaplanmıştır. Sayısal modelde 9847, 11699, 13756, 18643, 19857, 21453 eleman (ağ) sayıları için hesaplanan Nu sayıları sırasıyla 108.55, 110.78, 114.65, 115.31, 116.82, 117.23 olarak elde edilmiştir. 18643 eleman sayısından sonra Nu sayısındaki değişimin %1.5'den az olduğu için bu çalışmada sabit levha için 18643 eleman sayısı (ağ) tercih edilmiştir. Çözüm metodunda zamana bağlı problemlerde daha hassas sonuç verdiği için PISO algoritması tercih edilmiştir.

Basınç, momentum ve enerji denklemlerinin ayrıştırılmasında Second Order Upwind şema kullanılmıştır.



Şekil 7. Sayısal model ağ yapısı ve sınır şartları (Numerical model mesh structure and boundary condition)

Yakınsama kriteri olarak enerji eşitliklerinde 10⁻⁸, momentum eşitliklerinde 10⁻⁶ ve süreklilik denkleminde 10⁻³ kullanılmıştır. Çözümlere doğal taşınım etkilerini de dahil etmek için akışkan yoğunluğunu sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlayan Boussinesq yaklaşımı seçilmiştir.

Sayısal çalışmada, bakır levhanın düşey yönde periyodik hareketini tariflemek için zamana bağlı hız profili Eşitlik 9 ile verilmiştir.

$$u_w = A_0 \sin(\omega t) \quad (9)$$

Hava tabakası içerisindeki bakır levhanın periyodik hareketi için programda, hareketli ağ (dynamic mesh) bölümü aktif hale getirilmiştir. Hareketli mesh modeli, sürekli yenilenen ağ yapısından dolayı daima zaman bağlı çözüm gerektirmektedir. Bu modelde, Smoothing

metod için Spring/Laplace yöntemi, Remeshing metodunda ise Local Cell yöntemi kullanılmıştır. Cismin periyodik hareketi sırasında deforme olan bölgelerdeki mevcut ağ yapısı, belirlenen parametreler doğrultusunda sürekli olarak yenilenmiştir.

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

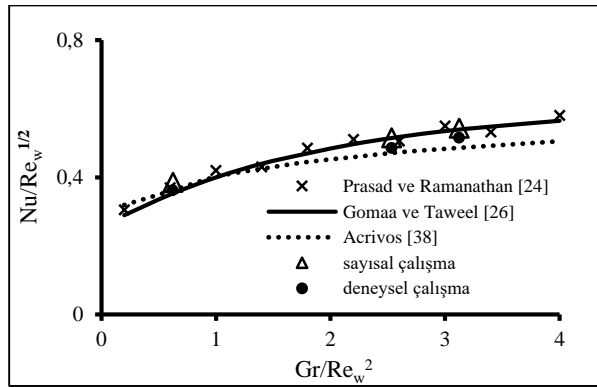
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_\infty) \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

Çözüm sonuçlarını değerlendirmek için 0.01 zaman adımında, 2700 s süreye ulaşana kadar iterasyonlar devam etmiştir. Levhanın periyodik hareketinden dolayı yüzeyde periyodik akış meydana gelmektedir, çözümlerin değerlendirilmesinde bir periyodu içeren zaman dilimi kullanılmıştır. Bir çevrim, açısal hız, frekans ve faz açısı cinsinden $\varphi = \omega t = 2\pi ft = 360^\circ$ olarak tariflenmiştir. Sayısal çalışmada, çeşitli salınım parametrelerine bağlı olarak bir çevrim boyunca elde edilen anlık sıcaklık değerleri ile anlık hız ve sıcaklık görüntüleri sunulmuştur.

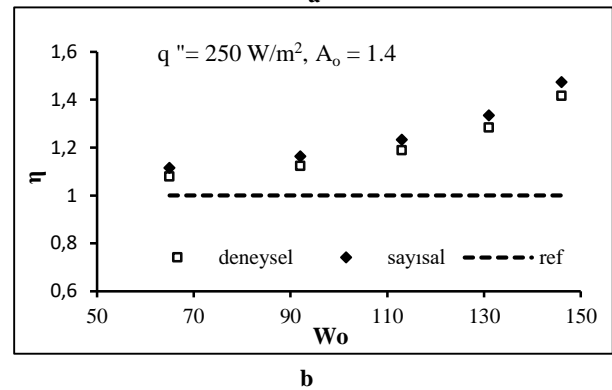
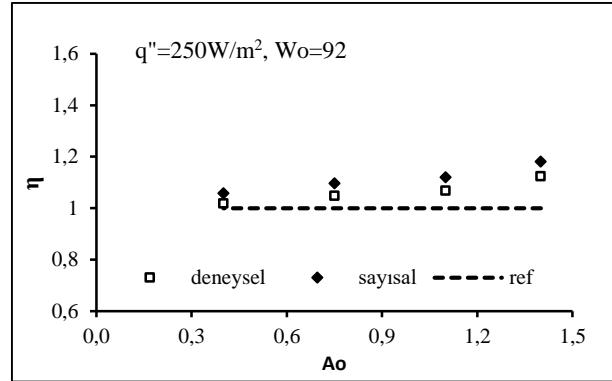
4. SONUÇ VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSION)



Şekil 8. Diğ er çalışmalar ile deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırması (Comparison of the numerical and experimental results with those of other studies)

Bu çalışmada elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar, Acrivos [38] yaklaşımı, Goma ve Taweel [26] tarafından yapılan teorik çalışma sonuçları ve Prasad ve Ramanathan [24] tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada en düşük Re_w değeri ($Re_w=4000$) sabit tutularak üç farklı Gr sayısı için $Nu/Re_w^{1/2}$ değeri hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların, literatür sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 8'de verilmiştir. Sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

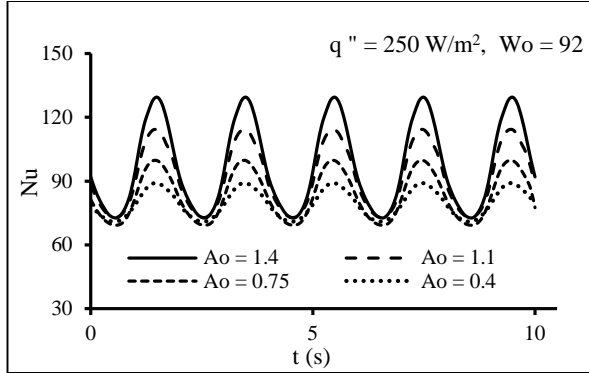
Şekil 9'da $q''=250 \text{ W/m}^2$ için farklı genlik ve frekanslarda deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sabit levha üzerinde doğal taşınım ısı transferi (Nu_s) referans olarak düşünülmüş ve kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Her iki sonuçlarda, artan genlik ve frekansla ısı transferi performansı artmaktadır.



Şekil 9. Deneysel ve sayısal ısı transfer performansının karşılaştırması (Comparison of the experimental and numerical heat transfer performance)

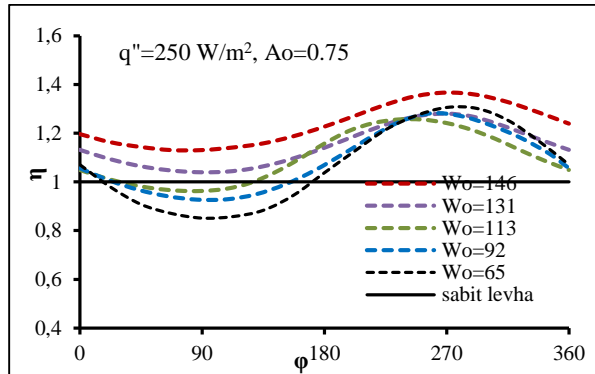
Şekil 10'da $q''=250 \text{ W/m}^2$ ısı akışı ve $Wo=92$ için farklı salınım genlikleri ile anlık Nu sayılarının değişimi gösterilmiştir. Her salınım genliğinde, Nu sayısının sinüsoidal olarak değiştiği ve salınım genliği arttıkça sinüsoidal eğrinin genliğinin de arttığı görülmektedir. Düşük genliklerde, levha daha küçük mesafede salınım

yaptığı için yüzey sıcaklıkları dolayısı ile Nu sayıları daha küçük aralıkta dalgalanmaktadır.



Şekil 10. Farklı salınım genlikleri için zamanla Nu sayısının değişimi (Variation of Nu number with time for different oscillation amplitudes)

Şekil 11'de salınımlı levhanın, sabit genlik ($Ao=0.75$) ve sabit ısı akısında ($q''=250 \text{ W/m}^2$), salınım frekansı ile bir çevrim boyunca ısı transferi performansındaki değişim verilmiştir. Yüksek frekanslarda 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 dalgalanmaktadır.

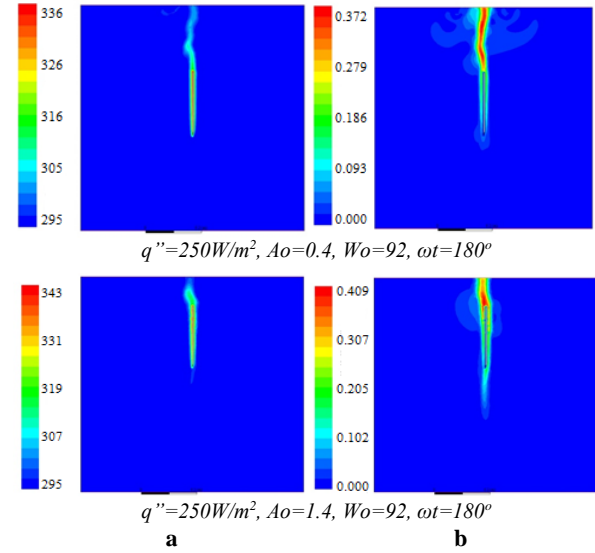


Şekil 11. Bir çevrim boyunca salınım frekansı ile ısı transferi performansının değişimi (Variation of heat transfer performance with oscillation frequency over a cycle)

Sayısal çalışmada, farklı salınım parametrelerine bağlı olarak levha üzerinde meydana gelen anlık hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 12 ile $q''=250 \text{ W/m}^2$, $\omega t=180^\circ$ ve $Wo=92$ için farklı salınım genliklerinde hız ve sıcaklık görüntüleri verilmiştir. Şekillerden, levha yüzeyindeki hız ve sıcaklık dağılımlarının salınım genliğinden oldukça etkilendiği anlaşılmaktadır. Yüksek genliklerde, levha daha büyük mesafelerde salındığı için

yüzey sıcaklığının daha yüksek olduğu ve levha etrafının daha yoğun hava tabakasıyla kaplı olduğu görülmektedir.

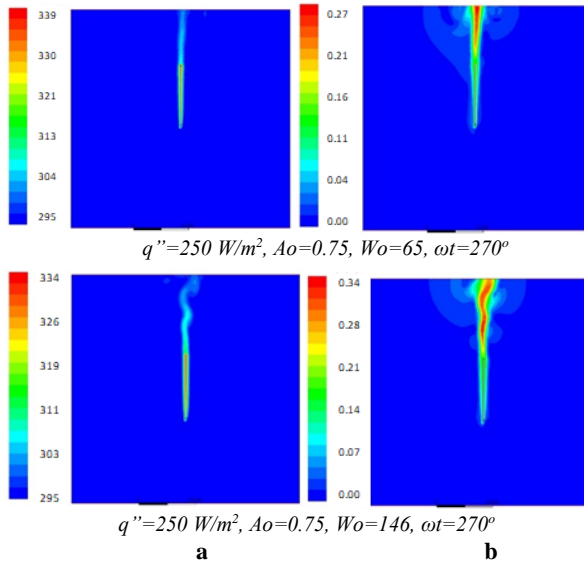
Şekil 13'te, $q''=250 \text{ W/m}^2$, $Ao=0.75$ ve $\omega t = 270^\circ$ ile farklı salınım frekansları için levha yüzeyinde elde edilen hız ve sıcaklık görüntüleri verilmiştir.



Şekil 12. Farklı genlikler için, sıcaklık (a) ve hız (b) görüntüleri, (For different amplitudes, temperature (a) and velocity (b) contours) $q'' = 250 \text{ W/m}^2$, $Wo = 92$, $\omega t = 180^\circ$

Şekillerden, levha yüzeyindeki sıcaklık ve hız dağılımlarının salınım frekansından önemli ölçüde etkilendiği ve yüksek frekansta, levhanın üst kısmındaki sıcak hava tabakasının daha yoğun olduğu görülmektedir. Yüzeydeki hız ve ısıl sınır tabakalarının deformasyonu ve yenilenmesi, salınım frekansındaki artış nedeniyle daha kısa sürede gerçekleşmekte, bu da levha yüzeyinin soğuk hava tabakası ile daha sık temasını sağlayarak yüzeyin daha hızlı soğumasına yardımcı

olmaktadır. Yüksek frekansta levha yüzey sıcaklığının düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 13. Farklı frekanslar için sıcaklık (a) ve hız (b) görüntüleri (The temperature (a), The velocity contours (b) for different Wo number)

Yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonuçları, düşey levhanın periyodik salınımlarının ısı transferini sabit levhaya göre önemli derecede iyileştirdiğini göstermiştir.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma ile sabit ısı akısına sahip düşey düz bir levhanın periyodik salınımlarının ısı transferine etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, değişen ısı akılarında, farklı salınım parametrelerinde levha yüzeyindeki anlık ve ortalama sıcaklıklar elde edilmiş ve ısı transferi performansı hesaplanmıştır. Sayısal çalışmalar için deneysel veriler kullanılarak HAD tabanlı ANSYS Fluent 18.2 programı ile simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlar sonucunda levha yüzeyinden ortama geçen karışık taşınım ile ısı transferi miktarı hesaplanmış ve sonuçlar literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca levha yüzeyinde farklı salınım parametreleri için anlık hız ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir.

Sonuçlarda, sabit ısı akısına sahip periyodik salınımlı düşey levha için elde edilen ısı transferi miktarının, sabit düşey levha için elde edilen ısı transferi miktarından daha yüksek olduğu, salınım genliği ve frekansının artması ile ısı transferi performansının arttığı gösterilmiştir. Isı transferi performansının, yüzeye uygulanan ısı akısından ve salınım parametrelerinden oldukça etkilendiği görülmüştür. Levha yüzeyine uygulanan ısı akısı arttıkça, doğal taşınım etkilerinin artması nedeniyle ısı transferi performansının düşük ısı akılarına göre daha az arttığı gözlenmiştir. En yüksek ısı transferi performansı düşük ısı akısında ($q''=250 \text{ W/m}^2$), yüksek salınım genliği ($Ao=1.4$) ve yüksek salınım frekansında ($Wo=146$)

yaklaşık 1.43 olarak elde edilmiştir. Çalışma, deneysel limitler dahilinde gerçekleştirilmiştir. Levha yüzeyine uygulanacak daha yüksek ısı akılarında ve daha yüksek salınım parametrelerinde ısı transferinin ne yönde değişeceği araştırılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chida K., and Katto Y., "Conjugate heat transfer of continuously moving surfaces", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19: 461–470, (1976).
- [2] Chamkha, A. J., Takhar, H. S., and Nath, G., "Mixed convection flow over a vertical plate with localized heating (cooling), magnetic field and suction (injection)", *Heat and Mass Transfer*, 40: 835–841, (2004).
- [3] Cortell, R., "Flow and heat transfer in moving fluid over a moving flat surface", *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 21: 435–446, (2007).
- [4] Zhang, H., "A Study of the Boundary Layer on a Continuous Moving Surface in Power Law Fluids", *University of Science and Technology Beijing*, China, (2008).
- [5] Bachok N., Ishak A., and Pop I., "Boundary layer flow of nanofluid over a moving surface in a flowing fluid", *Int. J. Therm. Sci.*, 49:1663–8, (2010).
- [6] Rana P., and Bhargava R., "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, (2011).
- [7] Dogan M., and Sivrioglu M., "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, (2012).
- [8] Taji S.G., Parishwad G.V., and Sane N.K., "Enhanced performance of horizontal rectangular fin array heat sink using assisting mode of mixed convection", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 72: 250–259, (2014).
- [9] Khonakdar D.R., and Raveshi M.R., "Mixed convection on a vertical plate in supercritical fluids byselecting the best equation of state", *J. of Supercritical Fluids*, 107: 549–559, (2016).
- [10] Chen T.S., and Strobel, F.A., "Buoyancy effects on heat and mass transfer in boundary layer on a continuous, moving horizontal plate", *Journal Numerical Heat Transfer*, 3: (1), 115-130, (1980).
- [11] Calmidi V.V., and Mahajan R.L., "Mixed convection over a heated horizontal surface in a partial enclosure", *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, 19: 358-367, (1998).
- [12] Moutsoglou A., and Chen T.S., "Buoyancy effects in a boundary layers on inclined, continuous, moving sheets", *Journal of Heat Transfer*, 102: 371-372, (1980).

- [13] Chamkha A.J., Takhar H.S., and Nath G., "Effect of buoyancy force on the flow and heat transfer over a continuous moving vertical or inclined surface", *Int. Journal of Thermal Sciences*, 40: 825-833, (2001).
- [14] Souza J.A., Vargas J.V.C., and Bianchi M.V.A., "Friction and heat transfer for inclined surfaces in relative motion to an air stream under buoyancy effect", *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, 24: 713-725, (2003).
- [15] Ramachandran N., Chen T.S., and Armaly B.F., "Mixed convection from vertical and inclined moving sheets in a parallel free stream", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1(3): 274-281, (1987).
- [16] Lin H.T., and Hoh H.L., "Mixed convection from an isothermal vertical plate moving in a parallel or reversely to a free stream", *Heat and Mass Transfer*, 32: 441-445, (1997).
- [17] Pantokratoras A., "Opposing mixed convection along vertical isothermal moving bodies", *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, 25: 692-696, (2004).
- [18] Subhashini S.V., and Sumathi R., "Dual solutions of a mixed convection flow of nanofluids over a moving vertical plate", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 71: 117-124, (2014).
- [19] Khalid A., Khan I., and Shafic. S., "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, (2017).
- [20] Pradhan B., Das S.S., Paul A.K., and Dash R.C., "Unsteady Free Convection Flow of a Viscous Incompressible Polar Fluid past a Semi Infinite Vertical Porous Moving Plate", *Int. Journal of Applied Engineering Research*, 12(21): 10958-10963, (2017).
- [21] Koffi M., Andreopoulos Y., and Jiji L., "Heat transfer enhancement by induced vortices in the vicinity of a rotationally oscillating heated plate", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 112: 862-875, (2017).
- [22] Ashafa S., Ahmed A.A., and Sakir A.A., "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): 30-35, (2017).
- [23] Ellahi R., Alamri S.Z., Basit A., and Majeed A., "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, (2018).
- [24] Prasad K.K., and Ramanathan V., "Heat transfer by free convection from a longitudinally vibrating vertical plate", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15: 1213-1223, (1972).
- [25] Zhang X.R., Maruyama S., and Sakai S., "Numerical Investigation of laminar natural convection on a heated vertical plate subjected to a periodic oscillation", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47: 4439-4448, (2004).
- [26] Goma H., and Al Taweel A.M., "Effect of oscillatory motion on heat transfer at vertical flat surfaces", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 48: 1494-1504, (2005).
- [27] Saeid, N.W., "Mixed convection flow along a vertical plate subjected to time-periodic surface temperature oscillations", *Int. J. Therm. Sci.*, 44: 531-539, (2005).
- [28] Nobari M.R.H., and Naderan H., "A numerical study of flow past a cylinder with cross flow and inline oscillation", *Computers & Fluids*, 35(4): 393-415, (2006).
- [29] Ramesh G.K., Chamkha A.J., and Giresha B.J., "Boundary layer flow past an inclined stationary/moving flat plate with convective boundary condition", *Afrika Matematika*, 27(1): 87-95, (2016).
- [30] Li G.N., Zheng Y.Q., and Hu G.L., "Heat transfer enhancement from a rectangular flat plate with constant heat flux in pulsating flows", *Experimental Heat Transfer*, 27(2): 198-211, (2014).
- [31] Krishna M.V., and Jyothi, K., "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, (2018).
- [32] Khan I., Shah N.A., Tassaddiq A., Mustapha N., and Kechi S.A., "Natural Convection heat transfer in an oscillating vertical plate", *PLoS ONE*, 13(1):1-14, (2018).
- [33] Ghiasi A., Razavi S.E., Rouboa A. and Mahian O., "Numerical study on flow over a confined oscillating cylinder with a splitter plate", *Int. Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 29(5): 1629-1646, (2019)
- [34] Sarhan A.R., Karim M.R., Kadhim Z.K., and Naser J., "Experimental investigation on the effect of vertical vibration on thermal performances of rectangular flat plate", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 101: 231-240, (2019).
- [35] Lee S., Chiou J., and Cyue G., "Mixed convection in a square enclosure with a rotating flat plate", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 131: 807-814, (2019).
- [36] Kim Y.J., "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, (2000).
- [37] Holman, J.P., *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York, (2001).
- [38] ANSYS Inc., *ANSYS Fluent user's guide*, (2018).
- [39] Acrivos A., "Combined laminar free-and forced-convection heat transfer in external flows", *AIChE J.* 4, 285-289, (1958).