

# ÇARPAN OSİLASYONLU JETLERDE OSİLASYON KARAKTERİSTİKLERİNİN VE ÇARPMA MESAFESİNİN AKIŞ VE ISI TRANSFERİNE ETKİLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

**Tolga DEMIRCAN, Hasmet TURKOGLU**

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 06570 Maltepe/ANKARA  
[tolgad@gazi.edu.tr](mailto:tolgad@gazi.edu.tr), [hasmet@gazi.edu.tr](mailto:hasmet@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 04.03.2010; Kabul/Accepted: 14.07.2010)

## ÖZET

Bu çalışmada, birbirine paralel olarak yerleştirilmiş, iki yatay sonsuz levha arasına püskürtülen bir jet ele alınmıştır. Üst levhada bulunan dikdörtgen bir lüleden osilasyonlu bir hava jeti, sıcak alt levhaya çarptırılmıştır. Jetin lüleden çıkış hızı, zamana bağlı olarak sinüs eğrisi şeklinde periyodik olarak değişmektedir. Kontrol hacmi metodu ve SIMPLE algoritması kullanılarak bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Levhalar arası mesafenin lüle genişliğine oranının (H/W), jet hızının salınım genliğinin ve frekansının, akış ve ısı transferine etkileri incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar, levhalar arası mesafe arttıkça, durma noktası Nusselt sayısının azaldığını, ancak H/W oranının 2'den büyük değerlerinde Nusselt sayısındaki değişimin çok az olduğunu göstermiştir. Durma noktası Nusselt sayısının, H/W oranının küçük değerlerinde, kararlı jet Nusselt sayısına çok yakın olduğu; H/W oranının 1,5'den büyük olduğu durumlarda ise osilasyonlu jet Nusselt sayısının, kararlı jet Nusselt sayısından daha büyük olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Çarpan jet; Osilasyon; Laminar akış; Sayısal çözüm.

## NUMERICAL ANALYSIS OF EFFECTS OF THE OSCILLATION CHARACTERISTICS AND THE NOZZLE TO PLATE DISTANCE ON THE FLOW AND HEAT TRANSFER IN OSCILLATING IMPINGING JETS

### ABSTRACT

In this study, a sinusoidally oscillating jet injected through a rectangular slot between two infinite horizontal plates was considered. Bottom plate was kept at constant temperature and the top plate was insulated. The oscillating air jet, issued from a rectangular slot on the top plate was impinged on the bottom hot plate. A computer program was developed by using the control volume technique and SIMPLE algorithm. Using this computer program, flow and heat transfer characteristics of the jet flow were numerically analyzed. The effects of the H/W, oscillation amplitude and oscillation frequency on the flow and heat transfer were investigated. It was observed that the stagnation point Nusselt number decreases with the increasing H/W ratio, but variation in the Nusselt number for H/W greater than 2 is very small. It is also observed that the oscillation of jet has no effect on stagnation Nusselt number when H/W is approximately less than 1.5. However, at the cases when H/W is greater than 1.5 the oscillating increases the Nusselt number with respect to the Nusselt number of a steady jet.

**Keywords:** Impinging jet; Oscillation; Laminar flow; Numerical solution.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

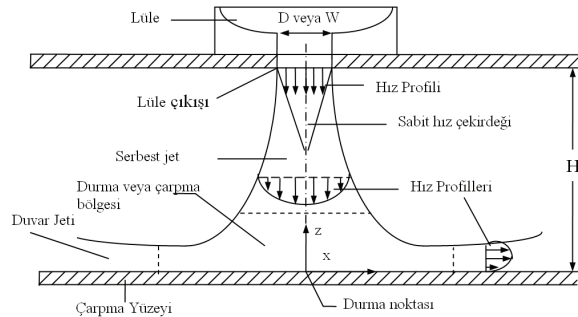
Mühendislik uygulamalarında yüksek sıcaklıklara çıkan elemanların uygun sıcaklıklara kadar soğutulması önemli bir problemdir. Özellikle

teknolojideki gelişmeler, elektronik cihazların kullanımının artmasını ve bu sistemlerin güvenli çalışma sıcaklıklarına soğutulması gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Gün geçtikçe elektronik elemanların boyutları küçülmekte ve birim hacimde

oluşan ısı artmaktadır. Dolayısıyla, daha etkin soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle küçük boyutlu sistemlerin soğutulmasında, büyük soğutma sistemlerinin kullanılması önemli bir sorundur. Çarpan jetler etkili bir soğutma sağladığı için yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir.

Çarpan jet bir lüle veya yarıktan bir akışkanın püskürtülerek hedef bir yüzeye çarptırılması ile elde edilir. Çarpan jetin çalışma prensibi sınır tabakayı kaldırarak veya incelterek ısı transferini artırma esasına dayanır. Dolayısıyla akışkan ile yüzey arasında yüksek yerel ısı transfer katsayısı elde edilerek çarpma yüzeyinde ısı ve kütle aktarımı sağlanır. Çarpan jetler türbin kanatlarının soğutulmasında, elektronik devre elemanlarının soğutulmasında, tekstil, kâğıt, cam, gıda gibi birçok endüstriyel sektörde kurutma, ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılır. Lülelerin şekli, akışkanın lüleden çıkış hızı, sıcaklığı, lüle ile yüzey arasındaki mesafe ve yüzeye çarpma şekli ısı transferine etki eden faktörlerdir.

Dik açı ile çarpan jetlerde jetin eksen çizgisinin hedef yüzey ile kesiştiği noktaya geometrik çarpma noktası denir ve maksimum ısı transferinin meydana geldiği durma noktası ile çakışır. Düz bir yüzeye çarpan jet, serbest jet bölgesi, durma veya çarpma bölgesi ve duvar jeti bölgesi olmak üzere bölümlere ayrılabilir [1]. Bu bölümler Şekil 1'de gösterilmektedir.



**Şekil 1.** Yüzeye çarpan bir jetin şematik görünümü. (Schematic view of a single impinging jet.)

Literatürde çarpan jetlerle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlar, çarpan jetlerin akış ve ısı transferi karakteristikleri ve basınç düşümü ile ilgilidir. Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde, farklı geometrilerde ve farklı çalışma koşullarında çarpan jetlerin incelendiği görülmektedir. Gordon ve Akfırat [2], hava jetlerini deneysel olarak inceleyerek, sadece hıza ve mesafeye bağlı sınır tabakası kalınlığıyla, ısı transferi karakteristiklerinin belirlenemeyeceğini, jetteki türbülansın da önemli olduğunu göstermişlerdir. Miyazaki ve Silberman [3] ise, düz bir yüzeye çarpan, iki boyutlu laminer çarpan jetin akış ve ısı transfer karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, yerel sürtünme katsayısı ve Nusselt sayısının değişimini elde etmişlerdir. Boyutsuz lüle-hedef yüzey arası mesafe  $H=1$

olduğunda maksimum değerine ulaşan sürtünme katsayısının,  $H=\infty$ 'daki değerinden 3.5 kat daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde,  $H=1$  olduğundaki Nusselt sayısının maksimum değerinin,  $H=\infty$ 'daki değerinden yaklaşık olarak 1.7 kat daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Yan ve Saniei [4], dairesel jetlerde, yüzeye çarpma açısının ve jet ile hedef yüzey arasındaki mesafenin yerel taşınım katsayılarına etkilerini incelemişlerdir. Dik çarpmada, jet ile hedef yüzey arasındaki mesafenin azalması ile, akışın simetrik yapısının bozulduğunu belirlemişlerdir. Morris vd. [5], çarpan jetlerin akış alanlarını, FLUENT paket programı yardımıyla sayısal olarak incelemişler ve küçük Reynolds sayılarında, akış alanı içinde üç den fazla sirkülasyon bölgesinin oluştuğu gözlenmiştir. Reynolds sayısı, lüle çapı ve lüle ile hedef yüzey arasındaki mesafenin artırılmasıyla, sirkülasyonların jet ekseninden uzaklaştığını belirlemişlerdir.

Chirac ve Ortega [6] düzlemsel bir levha üzerine çarpan jetin ısı transferine etkisini, kararlı ve kararsız durumlar için sayısal olarak incelemişlerdir. Reynolds sayısı 250–750 ve Prandtl sayısı 0.7 için sabit çarpma mesafesi-jet genişliği oranı  $H/W=5$  için çalışmışlardır. Reynolds sayısı 585 ile 650 arasında kararlı rejimden, kararsız rejime geçiş bölgesi olarak bulmuşlardır. Kararlı rejimde Reynolds sayısının yükselmesi ile Nusselt sayısının da arttığını gözlemlemişlerdir. Reynolds 750'de akışın tamamen kararsız hale geldiğini belirlemişler ve kararlı hale göre daha büyük ortalama ısı transfer katsayısı oluştuğunu belirlemişlerdir. Chung vd. [7] kararsız rejim için çarpan jetlerdeki momentum ve ısı transferi karakteristiklerini incelemişlerdir. Anlık akış ve sıcaklık alanlarının detaylı analizini yapmışlardır. Kararsızlığın, akış alanında oluşan birincil vortisitlerden oluştuğunu ve bu vortisitlerin yerinin durma noktasındaki Nusselt sayısını önemli oranda etkilediğini belirtmişlerdir. Camcı ve Herr [8], kendi kendine salınımlı jetlerle ilgili çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda, eksenine normal yönde periyodik salınımlı jetler incelenmiştir. Durma noktası çizgisinde, Nusselt sayısının artışının %70 civarında olduğunu belirlemişlerdir. Salınımlı, taşınım ve difüzyonu önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir. Sahoo ve Sharif [9], sabit ısı akışı uygulanmış bir yüzeyin çarpan jet yardımı ile soğutulmasındaki akış ve ısı transfer karakteristiklerini nümerik olarak incelemişlerdir. Verilen Richardson sayısında, ısı akışı uygulanan yüzeydeki ortalama Nusselt sayısının, jet çıkışındaki Reynolds sayısının artışıyla arttığını belirlemişlerdir. Fakat verilen Reynolds sayısında, ortalama Nusselt sayısının, Richardson sayısı ile değişim göstermediğini gözlemlemişlerdir.

Zhou ve Lee [10], çarpan dikdörtgenel jetlerdeki zorlanmış ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, Reynolds sayısının, lüle ile çarpma noktası arasındaki

mesafenin ve türbülans yoğunluğunun, gerçekleşen ısı transferi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Demircan ve Türkoğlu [11] sabit çarpma mesafesi için, sınırlandırılmış bir çarpma jette, osilasyonun akış ve ısı transferine etkisini sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısı 100-700, salınım genliği  $0,1V_0-0,5V_0$  ve salınım frekansı 1-10 Hz aralığında çalışmışlardır. Salınım frekansı ve genliğinin artırılması ile durma noktası Nusselt sayısının, salınımsız jet Nusselt sayısına göre arttığını gözlemlemişlerdir. Çalışılan genlikler için, salınım frekansının artmasına paralel olarak periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısının değerinin arttığını fakat salınım frekansı 6 Hz'den sonra periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısının değerinin yaklaşık olarak aynı kaldığını belirtmişlerdir. Lee vd. [12], farklı kanal yükseklikleri için, sınırlandırılmış çarpma jetlerdeki ısı transferini ve akış karakteristiklerini sonlu hacimler metodunu kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Kritik Reynolds sayısı'nın kanal yüksekliğine ve Reynolds sayısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Reynolds sayısı'nın, kritik Reynolds sayısı'nın üstünde olduğu durumlarda kararsız ve asimetric bir akışın oluştuğu gözlenmiştir. Reynolds sayısının ve kanal yüksekliğinin artışıyla, zaman ve alan ortalama yüzey sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Sharif ve Banerjee [13], hareket eden bir plaka üzerine uygulanan bir çarpma jetin ısı transferine etkisini k-ε türbülans modelini kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Plaka hızının, akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Reynolds sayısının artması ile yüzey sürtünme katsayısı azalırken, plaka boyunca hesaplanan ortalama Nusselt sayısında artış gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir.

Literatürde bulunan çalışmalar genelde zamandan bağımsız çarpma jetlerle ilgilidir. Hızı zamanla değişen (osilasyonlu ve pulsatif) jetlerle ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatürdeki bu eksikliği gidermek amacıyla, bu çalışmada osilasyonlu bir çarpma jetin ısı transferine etkileri analiz edilmiştir. Sinüzoidal olarak değişen jet giriş hızının genliğinin, frekansının ve Reynolds sayısının akış ve ısı transferi karakteristiklerine nasıl etkideği, farklı H/W oranları için araştırılmıştır. Bu amaç için kontrol hacmi metodu ve SIMPLE algoritması kullanılarak bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

## 2. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMULASYON (DESCRIPTION OF THE PROBLEM AND THE MATHEMATICAL FORMULATION)

Bu çalışmada, birbirine paralel olarak yerleştirilmiş, iki yatay sonsuz levha ele alınmıştır. Üstteki levha yalıtılmış, alttaki levha ise sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Üst levhanın ortasında bulunan dikdörtgen kesitli bir lüleden salınımlı olarak püskürtülen bir jet, sıcak alt levhaya çarpmaktadır. Jet akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Jet çıkış hızı,

zamana bağlı sinüs eğrisi şeklinde salınımlıdır, ancak verilen bir anda lüle kesitinde üniformdur. Jetin lüleden çıkış hızı  $V_{in}(t)=V_0+AV_0\sin\omega t$  fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Burada,  $V_0$  ortalama jet hızı ve "A" ise salınım genliğini ortalama hızın belirlenen bir oranına eşit olmasını sağlayan bir katsayıdır. Akışın z yönünden bağımsız ve incelenen hız aralığında laminer olduğu kabul edilmiştir. Akış alanı içerisinde sıcaklık değişiminin küçük olmasından dolayı, akışkanın yoğunluğu, viskozitesi ve ısı iletim katsayısının değişimi ihmal edilmiştir. Bunlara göre, problemin temel denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

### Süreklilik denklemi (Continuity equation)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

### x – yönü momentum denklemi (Momentum equation in x – direction)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

### y – yönü momentum denklemi (Momentum equation in y – direction)

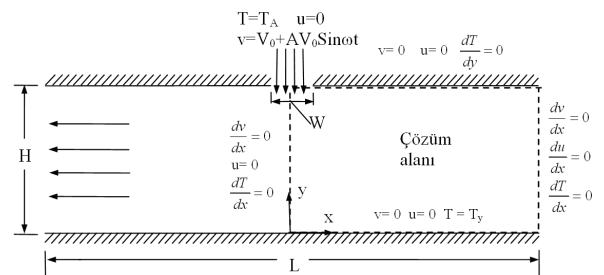
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

### Enerji denklemi (Energy equation)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

### Sınır Şartları (Boundary conditions)

Akışkan, lüle çıkışında sabit  $T_A$  sıcaklığında ve hızının düşey bileşeni,  $V_{in}(t)=V_0+AV_0\sin\omega t$  formülü ile belirlenmiştir. Kanal çıkış düzleminde hız ve sıcaklık değişimlerinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu kabul edilebilir. Akışın lüle düşey orta düzlemine göre simetric olduğu varsayılmıştır. Üst levha yalıtılmış, alt levha ise sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Bu kabullere göre, problemin sınır şartları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çözüm alanı ve sınır şartları (Solution domain and boundary conditions.)

### Nusselt Sayısının Hesaplanması (Calculation of Nusselt Number)

Nusselt sayısının tanımlanmasında, karakteristik uzunluk olarak lüle hidrolik çapı  $D_h=2W$  kullanılmıştır. Akış ve hız alanı zamanla periyodik olarak değişmektedir. Alt levha üzerindeki ısı transferini karakterize edebilmek için farklı Nusselt sayılarının hesaplanması gerekir. Yukarıdaki denklemlerin çözümü sonunda elde edilen sıcaklık dağılımından yararlanılarak anlık yerel, anlık alan ortalama, periyot ve yüzey ortalama, anlık durma noktası ve periyot ortalama durma noktası Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Anlık yerel Nusselt sayısı aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Nu_x = \frac{hD_h}{k} = \frac{h2W}{k} = - \left( \frac{2W}{(T_y - T_A)} \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (5)$$

Anlık yerel Nusselt sayısının levha yüzeyinde integre edilip, toplam yüzey alanına bölünmesi ile, sıcak alt levha üzerindeki anlık alan ortalama Nusselt sayısı aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\bar{Nu}_A = \frac{1}{A} \int_A Nu_x dA \quad (6)$$

Anlık alan ortalama Nusselt sayısının, salınım periyodu boyunca ortalaması alınır, periyot boyunca alan ve zaman ortalama Nusselt sayısı elde edilir.

$$\bar{Nu} = \frac{1}{\tau} \int_{\tau} \frac{1}{A} \int_A Nu_x dA dt \quad (7)$$

Anlık yerel Nusselt sayısının durma (çarpma) noktasındaki değeri, anlık durma noktası Nusselt sayısı ( $Nu_{max}$ ) olarak tanımlanır.

$$Nu_{max} = Nu_x \Big|_{x=0} \quad (8)$$

Anlık durma noktası Nusselt sayısının periyot boyunca ortalaması alınır ise, periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısı  $(\bar{Nu})_{max}$  elde edilir.

$$(\bar{Nu})_{max} = \frac{1}{\tau} \int_{\tau} Nu_{max} dt \quad (9)$$

### 3. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ (NUMERICAL SOLUTION METHOD)

Problemin matematiksel olarak modellenmesi sonucunda elde edilen süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini sayısal olarak çözmek için, problem alanı sonlu sayıda kontrol hacmine bölünerek, diferansiyel denklemler bu kontrol hacimlerinde integre edilmiş ve cebirsel denklemlere dönüştürülmüştür. Konveksiyon terimlerinin

ayrıklaştırılması için hibrid metot kullanılmıştır. Zamana bağımlı terimler kapalı (implicit) metot kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Cebirsel denklemlerin çözümü için ise Gauss-Seidel iterasyon tekniği kullanılmıştır. SIMPLE algoritması kullanılarak [14], FORTRAN programlama dilinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu program yardımıyla, çözüm alanı içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiş ve alt levha yüzeyinde Nusselt sayısı hesaplanmıştır.

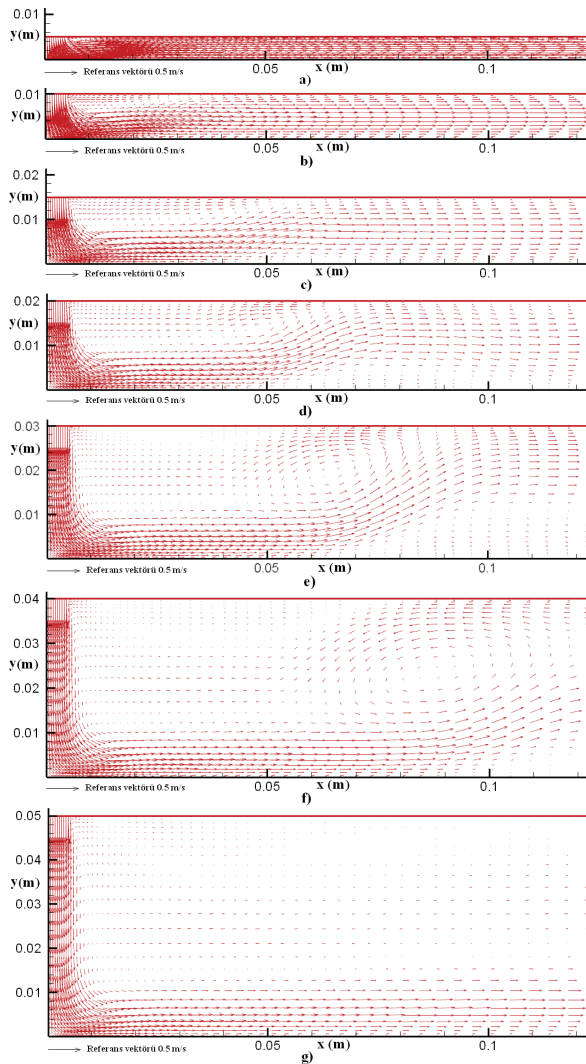
Kullanılan ağ sistemi, düşey yönde, alt ve üst levhalar yakınında sık; yatay yönde ise, eksen yakınında sık ve çıkış bölgesine doğru seyrekleşen bir yapıda oluşturulmuştur. Periyot boyunca ortalama Nusselt sayısı ve periyot boyunca durma noktası Nusselt sayısı baz alınarak, değişik H/W oranlarındaki geometriler için optimum ağ boyutları belirlenmiştir. Deneme simülasyonları sonunda optimum zaman adımı ise  $\Delta t=1 \times 10^{-3} \tau$  olarak belirlenmiştir. Akış zamanla periyodik olarak değişen bir akıştır. Bundan dolayı, hesaplamalar, periyodik kararlı şartlara ulaşıncaya kadar tekrarlanmıştır. Birbirini takip eden iki periyotta elde edilen Nusselt sayıları arasındaki fark ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunda hesaplamalar durdurulmuştur. Sayısal metot ve geliştirilen programın doğruluğunu test etmek için, geliştirilen program kullanılarak elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlar [15] ile Demircan ve Türkoğlu [11] tarafından daha önce yayınlanmış olan makalede karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, geliştirilen programla elde edilen sonuçların yeterli doğrulukta olduğunu göstermiştir.

### 4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, lüleden çıkış hızı periyodik olarak değişen ve sıcak bir yüzeye çarpan jetin akış ve ısı transferi karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Problem, Reynolds sayısı 300, 500 ve 700 için, levhalar arasındaki mesafenin lüle genişliğine oranının (H/W) 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 ve 5.0 değerleri için sayısal olarak incelenmiştir. Bu çözümler,  $0.0V_0$  (sabit jet hızı),  $0.2V_0$ ,  $0.4V_0$  ve  $0.6V_0$  jet çıkış hızı genlikleri için tekrarlanmıştır. Jet hızının salınım frekansı  $f=6$  Hz olarak sabit alınmıştır. Demircan ve Türkoğlu [11] yaptıkları çalışmada, osilasyonlu bir çarpan jette, diğer tüm parametreler sabit tutulurken, salınım frekansının değerinin artırılmasına paralel olarak periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısının, frekans 6 Hz'e kadar arttığını, bu değerden sonra ise Nusselt sayısında önemli bir değişim olmadığını gözlemlemişlerdir. Bu nedenle yapılan analizlerde frekans 6 Hz olarak sabit alınmıştır.

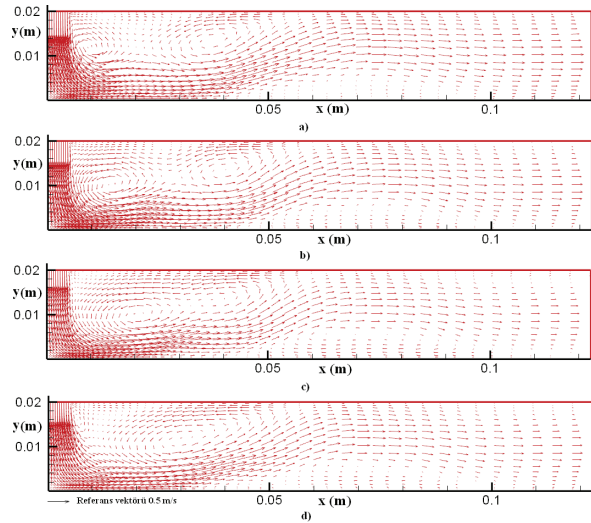
Şekil 3'de, kararlı jet ( $0.0V_0$ ) durumunda, sırasıyla H/W oranının 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4 ve 5 olduğu durumlar için hız vektör dağılımları verilmiştir. Düşey olarak püskürtülen jet düşey yönde ilerledikçe, hız profili

değişmektedir. Akışkanın hızı, alt levhaya çarptığı nokta olan durma noktasında sıfır olmaktadır. Daha sonra, akışkan levhaya paralel olarak akmakta ve duvar jetini oluşturmaktadır. Akışkan levhalara paralel olarak akarken, Şekil 3a, b, c, d, e ve f'de görüldüğü gibi, hem alt hem de üst levha yüzeylerinde akış ayrılması olmakta ve sirkülasyonlar oluşmaktadır. Oluşan sirkülasyonların yerleri ve büyüklükleri H/W oranı değerine bağlı olarak değişmektedir. H/W oranı arttıkça, alt ve üst levha üzerindeki sirkülasyonlar çıkışa doğru kaymakta ve büyümektedir. Şekil 3g'de görüldüğü gibi, levhalar arası mesafe çok arttığında (H/W=5), sirkülasyon bölgeleri kaybolmakta ve çarpma noktasından biraz sonra, akış düz levha üzerindeki akış haline dönüşmektedir. Ancak, üst levhaya yakın bölgede düşük hızlı bir ters akış oluşmaktadır.



**Şekil 3.** Kararlı rejimde,  $Re=500$  için farklı H/W değerlerinde hız vektörleri dağılımı. a)  $H/W=0.5$ , b)  $H/W=1$ , c)  $H/W=1.5$ , d)  $H/W=2$ , e)  $H/W=3$ , f)  $H/W=4$ , g)  $H/W=5$  (The velocity vector distributions at different H/W values for steady jet of  $Re=500$ . a)  $H/W=0.5$ , b)  $H/W=1$ , c)  $H/W=1.5$ , d)  $H/W=2$ , e)  $H/W=3$ , f)  $H/W=4$ , g)  $H/W=5$ .)

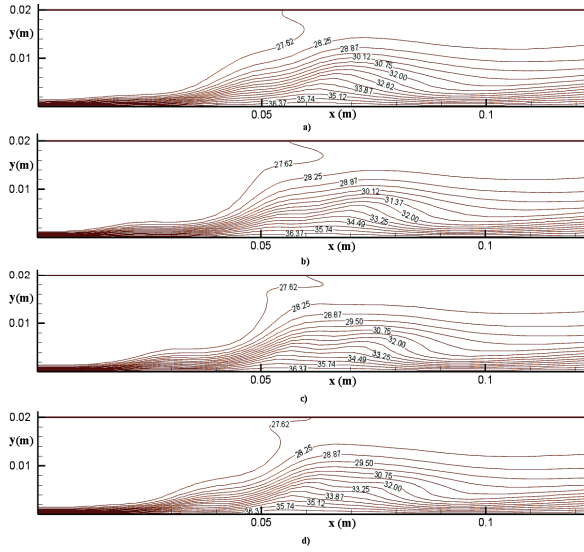
Şekil 4'te, Reynolds sayısı 700, H/W oranı 2, salınım genliği  $0.2V_0$  ve salınım frekansı 6Hz için, salınım periyodunun farklı anlarındaki hız vektörlerinin dağılımları verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, akış alanı hız dağılımının zaman ile değiştiği görülmektedir. Bunun sebebi, periyodun farklı anlarında jet çıkış hızının zamanla değişimidir. Şekil 4a, b ve c'de görüldüğü gibi, lüle çıkışına yakın bölgede iki farklı sirkülasyon ve alt duvar üzerinde bir sirkülasyon oluşmaktadır. Zamanın ilerlemesiyle, lüleye yakın bölgede oluşan sirkülasyonun büyüdüğü ve diğer sirkülasyon ile birleştiği görülmektedir. Salınım periyodunun sonunda (Şekil 4d), üst bölgedeki sirkülasyonların birleştiği ve lüle çıkışında yeni bir sirkülasyonun oluşmaya başladığı görülmektedir. Alt levha üzerindeki sirkülasyonun da zamanla hem yeri hem de büyüklüğü değişmektedir. Bunlar, göstermektedir ki, osilasyonlu jet kullanılmasında amaçlandığı gibi, akış alanını sürekli yenilenmektedir. Akış alanının sürekli yenilenmesinin sonucu olarak ısı transferinin artması beklenen bir sonuçtur.



**Şekil 4.** Reynolds sayısı 700, H/W oranı 2, salınım genliği  $0.2V_0$  ve salınım frekansı 6Hz için, salınım periyodunun farklı anlarındaki hız vektörlerinin dağılımları. a)  $t=0.0\tau$ , b)  $t=0.25\tau$ , c)  $t=0.5\tau$  ve d)  $t=0.75\tau$  (The velocity vector distribution at different instants of oscillation period for  $Re=700$ ,  $H/W=2$ , oscillation amplitude of  $0.2V_0$  and frequency of 6Hz. a)  $t=0.0\tau$ , b)  $t=0.25\tau$ , c)  $t=0.5\tau$  ve d)  $t=0.75\tau$ .)

Şekil 5'de Reynolds sayısı 700, H/W oranı 2, salınım genliği  $0.2V_0$  ve salınım frekansı 6Hz için, salınım periyodunun farklı anlarındaki eş sıcaklık eğrileri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, periyodun tüm anlarında, ısıl sınır tabaka benzer yapıdadır. Isıl sınır tabaka, jetin levhaya çarptığı noktada en küçük değerini almaktadır. Periyodun farklı anlarında, jet hızının farklı olması ve alt levha üzerinde oluşan sirkülasyonların yerlerinin farklı olması, sınır tabaka kalınlığının, periyot boyunca değişmesine sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak, periyot boyunca

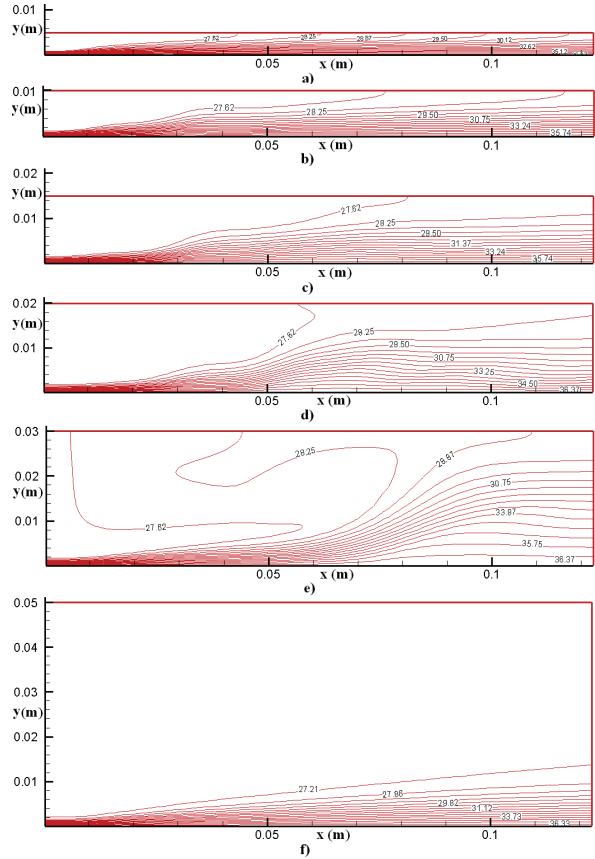
levha yüzeyindeki ısı transferi (Nusselt sayısı) değişmektedir.



**Şekil 5.** Reynolds sayısı 700, H/W oranı 2, salınım genliği  $0.2V_0$  ve salınım frekansı 6Hz için, salınım periyodunun farklı anlarındaki eş sıcaklık çizgileri. a)  $t=0.0\tau$ , b)  $t=0.25\tau$ , c)  $t=0.5\tau$  ve d)  $t=0.75\tau$  (Temperature contours at different instants of oscillation period for  $Re=700$ ,  $H/W=2$ , oscillation amplitude of  $0.2V_0$  and frequency of 6Hz. a)  $t=0.0\tau$ , b)  $t=0.25\tau$ , c)  $t=0.5\tau$  ve d)  $t=0.75\tau$ .)

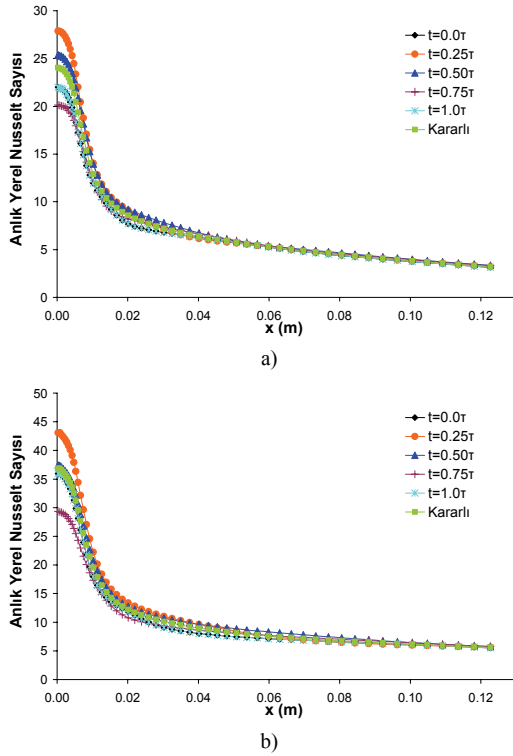
Şekil 6'da, Reynolds sayısı 500, salınım genliği  $0.2V_0$  ve frekans 6 Hz olduğu durumda, sırasıyla H/W oranı 0.5, 1, 1.5, 2, 3 ve 5 için, salınım periyodunun  $t=0.25\tau$  anındaki eş sıcaklık eğrileri verilmiştir. Bu şekiller incelenirse, tüm H/W oranlarında benzer olarak, durma noktasında ısıl sınır tabakasının kalınlığı minimum iken, bu kalınlık levha boyunca çıkışa doğru artmaktadır. Bundan dolayı, jetin çarptığı noktada (durma noktasında) maksimum ısı transferi gerçekleşmekte ve ısı transferi levha boyunca çıkışa doğru azalmaktadır. H/W oranının artmasıyla levhalar arası mesafe arttığı için, jet alt levhaya ulaşmaya kadar momentumunu daha çok kaybetmekte ve bunun sonucu olarak H/W oranı arttıkça, durma noktasında sınır tabaka kalınlığı artmakta ve Nusselt sayısı azalmaktadır.

H/W oranı 3 olduğu duruma kadar, akış alanı içerisindeki sıcaklık dağılımında artan bir farklılaşma olmaktadır. Bu farklı eş sıcaklık bölgeleri oluşumu, H/W oranının 3 olduğu durumda net olarak gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, bu geometride akış alanı içerisinde oluşan sirkülasyonlu yapının ve yüzeyden ayrılma ve kopmaların daha belirgin olmasındandır. H/W oranı 5 olduğunda ise, duvar boyunca herhangi bir sirkülasyon oluşmadığı için düzgün bir eş sıcaklık eğrisi dağılımı oluşmakta ve ısıl sınır tabaka kalınlığı durma noktasından sonra, lineere yakın bir değişim göstermektedir.



**Şekil 6.** Reynolds sayısı 500, salınım genliği  $0.2V_0$ , salınım frekansı 6 Hz ve salınım periyodunun  $t=0.25\tau$  anındaki, farklı H/W oranları için eş sıcaklık çizgileri. a)  $H/W=0.5$ , b)  $H/W=1$ , c)  $H/W=1.5$ , d)  $H/W=2$ , e)  $H/W=3$ , f)  $H/W=5$  (Temperature contours at different H/W ratios for  $Re=500$ , oscillation amplitude of  $0.2V_0$ , frequency of 6Hz and  $t=0.25\tau$  a)  $H/W=0.5$ , b)  $H/W=1$ , c)  $H/W=1.5$ , d)  $H/W=2$ , e)  $H/W=3$ , f)  $H/W=5$ .)

Şekil 7'de,  $H/W=0.5$ , salınım genliği  $0.4V_0$  ve frekans 6 Hz için, anlık yerel Nusselt sayısının alt levha boyunca değişimi periyodun farklı anlarında, Reynolds sayısı 300 ve 700 için verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, her iki Reynolds sayısında da benzer olarak, periyodun farklı anlarındaki Nusselt sayısı eğrileri, genel olarak birbirine benzer formdadır. Ancak, periyodun farklı anlarında, durma noktasına yakın noktalarda, Nusselt sayısı değerleri farklılık gösterirken, durma noktasından uzaklaştıkça Nusselt sayısının değerleri, birbirine yaklaşmakta ve belli bir mesafeden sonra hemen hemen kararlı rejimdeki değer ile aynı olmaktadır. Maksimum Nusselt sayısının değeri, periyodun tüm anlarında farklı değerlerdedir ve periyodun bazı anlarında kararlı jet Nusselt sayısının altında, bazı anlarda ise üstündedir. En yüksek durma noktası Nusselt sayısı, her iki Reynolds sayısında da benzer olarak  $t=0.25\tau$  anında, en düşük Nusselt sayısı ise  $t=0.75\tau$  anında oluşmuştur. Bunun sebebinin, lüleden sinüzoidal olarak enjekte edilen jet akışkanının hızının,  $t=0.25\tau$  anında maksimum,  $t=0.75\tau$  anında ise minimum olmasıdır.

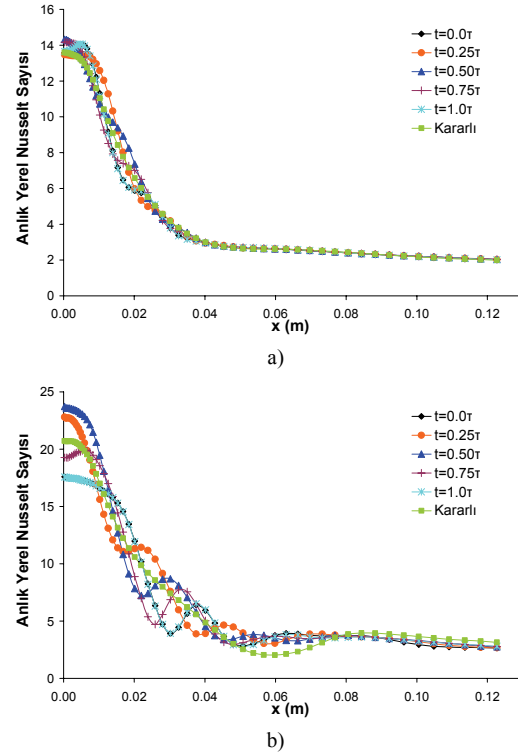


**Şekil 7.**  $H/W=0.5$ , salınım genliği  $0.4V_0$  ve frekans 6 Hz için, anlık yerel Nusselt sayısının alt levha boyunca değişimi. a)  $Re=300$ , b)  $Re=700$  (Variation of instantaneous local Nusselt number along the bottom plate for  $H/W=0.5$ , oscillation amplitude of  $0.4V_0$  and oscillation frequency of 6 Hz. a)  $Re=300$ , b)  $Re=700$ .)

Şekil 8'de,  $H/W=1.5$ , salınım genliği  $0.4V_0$  ve frekans 6 Hz için, anlık yerel Nusselt sayısının alt levha boyunca değişimi, Reynolds sayısı 300 ve 700 değerleri için görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, her iki Reynolds sayısında da, jetin çarptığı nokta olan  $x=0$ 'da Nusselt sayısının değeri  $t=0.5\tau$  anında maksimum olarak gerçekleşmiştir. Nusselt sayılarının değişimi, her iki Reynolds sayısında birbirlerinden farklı bir davranış göstermektedir. Bunun nedeninin hız farklılıklarından dolayı, levha üzerinde oluşan sirkülasyon bölgelerinin büyüklüğünün ve yerlerinin farklı olmasıdır. Başka bir deyişle, Reynolds sayısının değişimi ile sirkülasyonların yapısı, yeri, büyüklüğü ve bunların sonucu olarak sıcaklık dağılımı değişmektedir. Bu değişimler, akış karakteristiklerini ve dolayısıyla ısı transferini etkilemektedir. Şekil 8b incelenirse, Reynolds sayısı 700 için, Reynolds sayısı 300 durumundan farklı olarak, yatay doğrultuda yüzey boyunca, akışta oluşan bu sirkülasyonlardan dolayı Nusselt sayısı eğrilerinde ikincil maksimum noktalar oluşmaktadır.

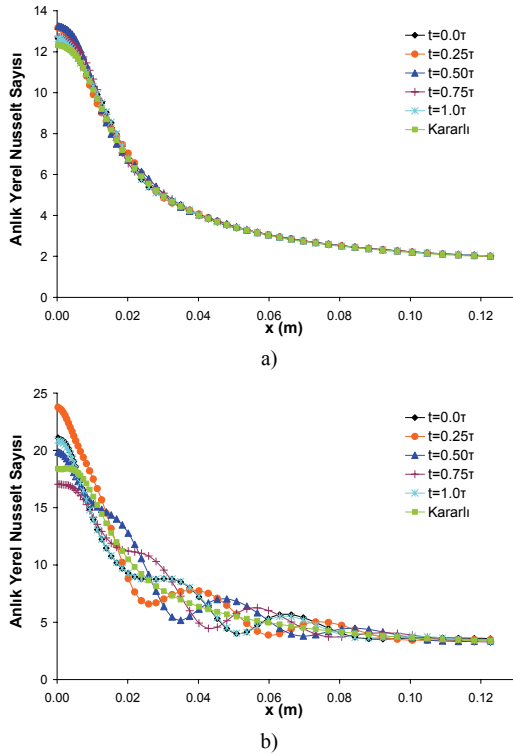
Benzer olarak,  $H/W=5$ , salınım genliği  $0.4V_0$  ve frekans 6 Hz için, Reynolds sayısı 300 ve 700 durumlarındaki anlık yerel Nusselt sayısının alt levha boyunca değişimi, periyodun farklı anları için Şekil 9'da verilmiştir. Her iki Reynolds sayısında da, maksimum Nusselt sayısı, durma noktasında gerçekleşmiştir ve periyodun farklı anları için

birbirinden farklı değerler almıştır.  $H/W=5$  için, Reynolds sayısı 300 ve 700 olduğunda levha boyunca anlık Nusselt sayısı değişimleri birbirinden farklıdır. Reynolds 300 için,  $H/W=5$  olduğu durumda tüm eğriler kararlı rejim eğrisine çok benzerdir ve  $x$  yönü boyunca ikincil bir tepe noktası oluşumu gözlemlenmemiştir. Reynolds sayısı 700 için ise,  $H/W=1.5$ 'de olduğu gibi, tüm eğrilerde ikincil hatta üçüncül maksimum noktalar oluştuğu gözlenmiştir.

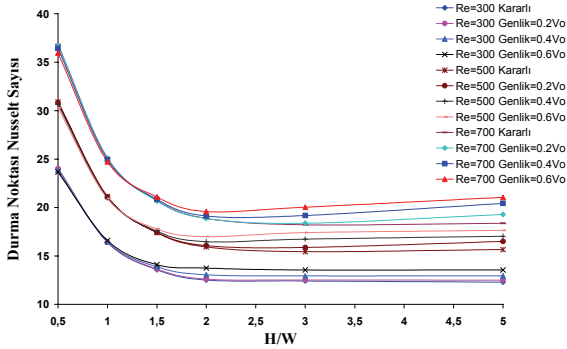


**Şekil 8.**  $H/W=1.5$ , salınım genliği  $0.4V_0$  ve frekans 6 Hz için, anlık yerel Nusselt sayısının alt levha boyunca değişimi. a)  $Re=300$ , b)  $Re=700$  (Variation of instantaneous local Nusselt number along the bottom plate for  $H/W=1.5$ , oscillation amplitude of  $0.4V_0$  and oscillation frequency of 6 Hz. a)  $Re=300$ , b)  $Re=700$ .)

Şekil 10'da, Reynolds sayısı 300, 500 ve 700 için kararlı jet (sabit jet hızı) durumunda ve osilasyon frekansı 6 Hz'de sabit tutulurken, periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısının  $(\overline{Nu}_{max})$ ,  $H/W$  ile değişimi farklı genlikler için verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, tüm Reynolds sayılarında, hem sabit jet hızı ve hem de osilasyonlu jet hızı durumlarında, incelenen bütün salınım genliklerinde, periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısı, Reynolds sayısı arttıkça artmakta, buna karşılık  $H/W$  oranının artması ile belirgin bir azalma göstermektedir. Bu azalma yaklaşık olarak  $H/W$  oranının 2 olduğu değere kadar devam etmektedir. Bu değerden sonra  $\overline{Nu}_{max}$ 'ın değerinde önemli bir değişim olmamaktadır. Ancak, Reynolds sayısı 700 için osilasyonlu jet durumunda,  $H/W$  oranının 2 değerinin üzerine artırıldığında, Nusselt sayısında küçük bir artış gözlenmektedir.



**Şekil 9.**  $H/W=5$ , salınım genliği  $0.4V_0$  ve frekans 6 Hz için, anlık yerel Nusselt sayısının alt levha boyunca değişimi. a)  $Re=300$ , b)  $Re=700$  (Variation of instantaneous local Nusselt number along the bottom plate for  $H/W=5$ , oscillation amplitude of  $0.4V_0$  and oscillation frequency of 6 Hz. a)  $Re=300$ , b)  $Re=700$ .)



**Şekil 10.** Reynolds sayısı 300, 500 ve 700 için, kararlı rejim ve frekans 6 Hz'de, farklı genlikler için, periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısının ( $\overline{Nu}_{max}$ ),  $H/W$  ile değişimi (The variation of the time averaged stagnation point Nusselt number with the  $H/W$  ratio at different oscillation amplitudes, steady jet and frequency of 6 Hz for Reynolds numbers of 300, 500 and 700.)

Sabit jet hızı durumunda  $H/W=0,5$  değerinde, jet Reynolds sayısı, 300 değerinden 700 değerine yükseltildiğinde, durma noktası Nusselt sayısı 24,04'den, 36,83'e yükselmektedir. Dolayısıyla durma noktası Nusselt sayısının değeri yaklaşık olarak %50 artmaktadır. Bu artış diğer tüm  $H/W$  değerlerinde de görülmektedir. Reynolds sayısının 300, 500 ve 700 olduğu durumlarda,  $H/W$  oranı 0,5'den 2,0'ye yükseltildiğinde, durma noktası

Nusselt sayısı sırasıyla %49,5, %48,4 ve %48,8 azalmaktadır. Çarpma jetlerin daha çok yerel soğutma (ısı transferini artırmak) için kullanıldığı göz önüne alınırsa, etkin bir soğutma gerçekleştirebilmek için, incelenen Reynolds sayısı aralığında,  $H/W$  oranının 2'den daha küçük olması gerektiği görülmektedir.

İncelenen tüm Reynolds sayılarında, diğer tüm parametreler sabit tutulurken, jetin salınım genliğinin yükseltilmesi ile  $\overline{Nu}_{max}$ 'ın değerinin,  $H/W$ 'nin 1,5 den küçük değerleri için kararlı rejimdeki değeri ile hemen hemen aynı olduğu gözlemlenmiştir. Fakat  $H/W$  oranı 1,5'den büyük olduğunda, salınım genliğinin artmasıyla  $\overline{Nu}_{max}$ 'ın değeri, kararlı jet Nusselt sayısına göre artış göstermektedir. İncelenen tüm Reynolds sayıları ve tüm genliklerde benzer durum gözlemlenmiştir. Dolayısıyla  $H/W$  oranının 1,5 den küçük değerleri için salınım genliğinin ısı transferine herhangi bir olumlu etkisinin olmadığı, fakat  $H/W$  oranı 1,5'den büyük olduğunda, salınım genliğinin artışının ısı transferini artırdığı söylenebilir.

## 5. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, birbirine paralel olarak yerleştirilmiş, iki yatay levha ele alınmıştır. Üstteki levha yalıtılmış, alttaki levha ise sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Üst levhanın ortasında bulunan dikdörtgen bir lüleden, zamanla hızı sinüzoidal olarak değişen bir hava jeti sıcak alt levhaya çarpıtılmıştır. Salınım frekansının 6 Hz değerinde, Reynolds sayısının, levhalar arası mesafenin lüle genişliğine oranının ( $H/W$ ) ve jetin salınım genliğinin, akış ve ısı transferine etkileri, kontrol hacmi metoduna dayanan ve SIMPLE algoritması kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla sayısal olarak incelenmiştir.

Yapılan simülasyonlar sonucunda, maksimum ısı transferinin, çarpma (durma) noktasında olduğu ve levha boyunca azaldığı görülmüştür. Jetin hızının, dolayısıyla Reynolds sayısının yükseltilmesi, zorlanmış konveksiyonla olan ısı transferi miktarını arttırmamasından dolayı levha üzerindeki her noktada ısı transferinin artışına sebep olmuştur. Jet hızının osilasyonlu olmasından dolayı, akış alanı içerisinde yerleri ve büyüklükleri periyot boyunca değişen sirkülasyonlar ve alt levha yüzeyinden ayrılmalar gözlemlenmiştir. Her bir periyot boyunca, akışın genel karakteristiklerinin değişmesi, alt levha yüzeyinde gerçekleşen ısı transferini etkilemiştir.

Reynolds sayısı 300 ve 500 durumu için, diğer tüm parametreler sabit tutulurken,  $H/W$  oranı artırıldığında periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısının ( $\overline{Nu}_{max}$ ) değeri,  $H/W$  oranı 2 olana kadar azalmakta ve bu değerden sonra,  $H/W$  oranının artması ile  $\overline{Nu}_{max}$ 'ın değerinde önemli bir değişim



olmamaktadır. Reynolds sayısı 700 olduğunda ise, benzer olarak, H/W oranı artırıldığında ( $Nu_{max}$ ) değeri, H/W oranı 2 olana kadar azalmakta fakat bu değerden sonra, H/W oranının artması ile  $Nu_{max}$ 'ın değerinde olumlu yönde küçük bir artış olduğu gözlenmiştir.

İncelenen tüm Reynolds sayılarında, H/W oranının yaklaşık 1,5 değerine kadar, jet salınım genliğinin, periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısını etkilemediği görülmüştür. H/W oranının 1,5'den daha büyük değerlerinde, salınım genliğinin artmasıyla durma noktası Nusselt sayısı, kararlı rejim durma noktası Nusselt sayısına göre küçük bir artış göstermektedir.

Sonuç olarak, H/W oranının küçük olduğu durumlarda, ısı transferinin daha etkili olduğu söylenebilir. Fakat bu küçük H/W oranlarında, osilasyonun ısı transferine etkisi yok denecek kadar azdır. H/W oranının artmasına paralel olarak, ısı transferinin azalmasına rağmen, osilasyon genliğinin artışı ile, ısı transferinde küçük bir artış olmaktadır. Dolayısıyla çarpan jetler kullanılarak ısı transferini yerel olarak artırabilmek için, optimum bir H/W oranının ve salınım genliğinin belirlenmesi önemlidir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu makale Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi tarafından desteklenen 06/2003-04 numaralı "Yüzele Çarpan Osilasyonlu Jetlerin Yüzey Isı Transferine Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi," isimli proje kapsamında hazırlanmıştır.

#### SEMBOLLER (SYMBOLS)

A	Salınım genliği
$C_p$	Sabit basınçta Özgül ısı, J/kgK
$D_h$	Hidrolik çap, m
f	Salınım frekansı, Hz
h	Isı taşınım katsayısı, W/m <sup>2</sup> K
H	Lüle ile levha arası mesafe, m
k	Isı iletim katsayısı, W/mK
L	Levha uzunluğu, m
$Nu_{max}$	Anlık durma noktası Nusselt sayısı
$Nu_x$	Anlık yerel Nusselt sayısı
$Nu$	Periyot boyunca alan ve zaman ortalama Nusselt sayısı
$Nu_A$	Anlık alan ortalama Nusselt sayısı
$Nu_{max}$	Periyot boyunca zaman ortalama durma noktası Nusselt sayısı
p	Basınç, Pa
Re	Reynolds sayısı ( $Re=V_0 2W/v$ )
$T_A$	Akışkanın giriş sıcaklığı, K
$T_y$	Alt levhanın sıcaklığı, K
$q''$	Isı akışı, W/m <sup>2</sup>
v	y-yönlü hız bileşeni, m/s

u	x-yönlü hız bileşeni, m/s
$V_0$	Sabit jet hızı, m/s
W	Lüle genişliği, m
x	Yatay koordinat, m
y	Dikey koordinat, m
$\Delta t$	Zaman adımı, s
$\alpha$	Isı yayılım katsayısı, m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Akışkan yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	Zaman periyodu, s
$\nu$	Kinematik viskozite, m <sup>2</sup> /s

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Incropera, F.P., DeWitt, D.P., **Introduction to Heat Transfer**, 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., 1996.
2. Gordon, R., Akfirat, J. C., "The role of turbulence in determining the heat-transfer characteristics of impinging jets", **Int. J. Heat Mass Transfer**, 8, 1261-1272, 1965.
3. Miyazaki, H., Silberman, E., "Flow and heat transfer on a flat plate normal to a two-dimensional laminar jet issuing from a nozzle of finite height", **Int. J. Heat Mass Transfer**, 15, 2097-2107, 1972.
4. Yan, X., Saniei, N., "Heat transfer from an obliquely impinging circular air jet to a flat plate", **Int. J. Heat and Fluid Flow**, 18, 591-599, 1997.
5. Morris, G. K., Garimella, S. V. and Fitzgerald, J. A., "Flow-field prediction in submerged and confined jet impingement using the Reynolds stress model", **Journal of Electronic Packaging**, 121, 255-262, 1999.
6. Chiriac, V. A., Ortega A., "A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 45, 6, 1237-1248, 2002.
7. Chung, Y. M, Luo, K. H. and Sandham N. D., "Numerical study of momentum and heat transfer in unsteady impinging jets", **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 23, 5, 592-600, 2002.
8. Camci, C., Herr, F., "Forced convection heat transfer enhancement using a self-oscillating impinging planar jet", **ASME Journal of Heat Transfer**, 124, 770-782, 2002.
9. Sahoo, D., Sharif, M. A. R., "Numerical modelling of slot-jet impingement cooling of a constant heat flux surface confined by a parallel wall", **International Journal of Thermal Sciences**, 43, 9, 877-887, 2004.
10. Zhou, D. W., Lee, S. J., "Forced convective heat transfer with impinging rectangular jets", **Int. J. of Heat and Mass Transfer**, 50, 1916-1926, 2007.
11. Demircan, T., Türkoğlu, H., "Numerical investigation of an oscillating two dimensional

- rectangular impinging air jet”, **Journal of Thermal Science and Technology**, 27, 1, 39-50, 2007.
12. Lee, H. G., Yoon, H. S., Ha, M. Y., “A numerical investigation on the fluid flow and heat transfer in the confined impinging slot jet in the low Reynolds number region for different channel heights”, **Int. J. of Heat and Mass Transfer**, 51, 4055–4068, 2008.
  13. Sharif, M. A. R., Banerjee, A., “Numerical analysis of heat transfer due to confined slot-jet impingement on a moving plate”, **Applied Thermal Engineering**, 29, 532–540, 2008.
  14. Patankar, S. V., **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, McGraw-Hill Book Company, New York, 1980.
  15. Chiriac, V. A., **A numerical investigation of the unsteady flow and heat transfer in a forced and unforced confined laminar impinging jet**, PhD Thesis, The University of Arizona, 1999.