

66384

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞEY LEVHALARDA ISI İLETKENLİĞİ
DÜŞÜK YATAY KANATLARIN
DOĞAL ISI TAŞINIMINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Nedim TÜRKMEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Şubat 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Mayıs 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Osman F. GENÇELİ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hasan HEPERKAN

Prof. Dr. Salim ÖZÇELEBİ

Prof. Dr. Taner ÖZKAYNAK

Doç. Dr. Taner DERBENTLİ

25/6/97
30.6.97
25.6.97
01.7.97
25/6/97

MAYIS 1997

ÖNSÖZ

Sunulan bu çalışmada, ısı geçişini olumsuz etkileyen kanatlar incelenmiştir. Endüstriyel uygulamalarda istenmeyerek de olsa ortaya çıkan bu tür kanatlı yüzeylerdeki ısı taşınım katsayılarının genel dağılımı tasarım açısından önemli olmaktadır. Özellikle elektronik endüstrisinde çok raslanan bir problem, bu türden yüzeylerde ortaya çıkan ısının uzaklaştırılmasıdır.

Isı geçişi ile ilgili literatürde, kanatlı yapılar çoğunlukla ısı geçişini artırıcı olarak bilinirler ve bu türden kanatlı yapıların en uygun tasarımı için modeller sunulmaktadır. Burada yapılan çalışmada ise kanatların olumsuz etkileri ön plana çıkarılmak istenmiştir.

Bana, bu çalışmayı yapma fırsatı veren ve çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Osman F. GENÇELİ'ye, deneysel ve teorik bilgileriye bana destek olan sayın Yrd. Doç. Dr. İ. Yalçın URALCAN'a ve Isı Tekniği Birimi çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul, Şubat 1997

Nedim TÜRKMEN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 MATEMATİK MODEL VE PHOENICS CFD PROGRAMI İLE SAYISAL ÇÖZÜM	
2.1 Matematik Model	4
2.2 PHOENICS CFD Programı	4
2.3 PHOENICS'in Genel Yapısı	4
2.4 PHOENICS Tarafından Çözülen Genel Transport Denklemleri	6
2.5 PHOENICS CFD Programının Matematik Modele Uygulanması	6
BÖLÜM 3 DENEY TESİSATI VE DENEYLERİN YAPILIŞI	
3.1 Deney Tesisatı	7
3.2 Deneylerin Yapılışı	8

BÖLÜM 4	HOLOGRAFİK İNTERFEROMETRİ	
	UYGULAMALARINDA SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEME	
4.1	Giriş	11
4.2	Holografinin Prensibi	12
4.3	Girişimlerin Değerlendirilmesi	13
4.4	Holografi Tesisatı	15
4.5	Sayısal Görüntü İşleme	15
BÖLÜM 5	DENEY SONUÇLARI VE PHOENICS CFD PROGRAMI	
	İLE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	
5.1	Deney Sonuçları ve PHOENICS CFD Programı ile Yapılan Hesaplar	18
5.2	Sonuçların Değerlendirilmesi	37
5.3	Belirsizlik Hesabı	39
	SONUÇ VE ÖNERİLER	41
	KAYNAKLAR	43
	EKLER	45
	ÖZGEÇMİŞ	54

SEMBOL LİSTESİ

A	: kanat aralılığının kanat yüksekliğine oranı, D/H
D	: kanat aralığı, m
e	: kanat kalınlığı, m
Gr	: Grashof sayısı, $g. \beta. T_{ort} H^3 / \nu^2$
g	: yerçekimi ivmesi, m/s^2
H	: kanat yüksekliği, m
$h_{deneysel}$	: deneyden elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı, W/m^2K
$h_{sayısal}$	: sayısal çözümden elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı, W/m^2K
h	: ısı taşınım katsayısı, W/m^2K
I	: elektrik direncinden geçen akım, amper
k	: havanın ısı iletim katsayısı, W/mK
L	: bakır plakanın yüksekliği, m
Nu_H	: kanat yüksekliğine göre hesaplanmış ortalama Nusselt sayısı, $h \cdot H/k$
n	: kırılma indisi
Pr	: Prandtl sayısı
Ra_H	: kanat yüksekliğine göre hesaplanmış Rayleigh sayısı, $g. \beta. T_{ort} H^3 / \nu^2 \cdot Pr$
S	: dalga boyunun katları
T	: sıcaklık, $^{\circ}C$
T_c	: cidar sıcaklığı, $^{\circ}C$
T_o	: ortam sıcaklığı, $^{\circ}C$
T_{ort}	: cidar sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki fark, $^{\circ}C$
V_c	: termoelemandan ölçülen potansiyel farkı, volt
U	: elektrik direncine uygulanan potansiyel farkı, volt
u_j	: j doğrultusundaki hız, m/s
x	: kanat yüksekliği boyunca x- ekseni, m
y	: levha boyunca y- ekseni, m

β : ısı genleşme katsayısı, 1/K

ρ : yoğunluk, kg/m³

ν : kinematik viskozite, m²/s

λ : ışığın dalga boyu, m



Şekil 5.12	D55 deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=1$)	30
Şekil 5.13	Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi ($A=0.5$)	31
Şekil 5.14	D21 deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=0.5$)	32
Şekil 5.15	Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi ($A=0.5$)	33
Şekil 5.16	D16 deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=0.5$)	34
Şekil 5.17	Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi ($A=0.25$)	35
Şekil 5.18	D25 deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=0.25$)	36
Şekil 5.19	$Ra_H - Nu_H$ değişimi	38

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1	Termoeleman kalibrasyon ölçümleri	8
Tablo 3.2	Deney parametreleri ve gösterilişleri	9
Tablo 5.1	D52 deneyinden ölçülen değerler ($A=4$)	19
Tablo 5.2	D12 deneyinden ölçülen değerler ($A=2$)	21
Tablo 5.3	D51 deneyinden ölçülen değerler ($A=2$)	23
Tablo 5.4	D22 deneyinden ölçülen değerler ($A=1$)	25
Tablo 5.5	D11 deneyinden ölçülen değerler ($A=1$)	27
Tablo 5.6	D55 deneyinden ölçülen değerler ($A=1$)	29
Tablo 5.7	D21 deneyinden ölçülen değerler ($A=0.5$)	31
Tablo 5.8	D15 deneyinden ölçülen değerler ($A=0.5$)	33
Tablo 5.9	D25 deneyinden ölçülen değerler ($A=0.25$)	35
Tablo 5.10	Deneylerde ölçülen değerlerdeki belirsizlikler	40
Tablo 5.11	Ölçülen değerler kullanılarak hesaplanan büyüklüklerdeki belirsizlikler	40

ÖZET

Düşey levhalarda ısı iletkenliği düşük yatay kanatların doğal ısı taşınımına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneyler; 20x20x1.2 cm boyutlarındaki bakır plaka üzerine yatay olarak yerleştirilmiş pleksiglas kanatlardan oluşan deney parçası üzerinde holografik interferometri yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bakır plaka elektrik direnci ile ısıtılmış ve sabit yüzey sıcaklığı elde edilmiştir. Kanat yüksekliği ve kanat aralığı parametre alınarak dokuz farklı geometride deneyler yapılmıştır.

Holografik interferometri ile elde edilen görüntüler video kamera ile kaydedilmiş ve bir görüntü kartı ile bilgisayara aktarılmıştır. Bu görüntüler; hazırlanan bir program ile değerlendirilerek yüzeydeki ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır.

Sayısal çözüm için PHEONICS CFD paket programı kullanılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Deneysel olarak belirlenen boyutsuz ısı geçişi parametreleri arasında, en küçük kareler yöntemi kullanılarak bir bağıntısı elde edilmiştir.

INFLUENCE OF HORIZONTAL FINS WITH LOW THERMAL CONDUCTIVITY ON NATURAL CONVECTIVE HEAT TRANSFER FROM VERTICAL SURFACES

SUMMARY

Natural convective heat transfer from extended surfaces has received a fair amount of attention and has remained as one of the most challenging topics in the expanding realm of thermo-fluid sciences and engineering. Besides its fundamental importance in understanding many aspects of buoyancy-driven flows, this geometry also has various applications, from flow around structural elements in heated buildings to solar thermal receiver systems or to cooling of electronic packages. Topics of related studies in the open literature include some basic problems, for instance, natural convection in rectangular enclosures or in open cavities, and some more complicated problems, such as, repeated horizontal ribs, dispersed pins or dense protrusions on a vertical surface. Numerical methods have been employed to solve these problems for various boundary conditions, as well as experimental studies.

In almost all of these studies, height and width of the roughness elements were small compared to spacings between these elements. Namely, the spacing-to-protuberance height ratio (the aspect ratio) was considered much larger than unity.

In the present study, natural convective heat transfer from a vertical plate with uniform base temperature and having transverse rectangular fins of low thermal conductivity has been investigated for a wide range of the spacing-to-fin height ratio. Values of the aspect ratio employed were, 4, 2, 1, $\frac{1}{2}$ and $\frac{1}{4}$. Both experimental and numerical techniques were used in the analysis.

In the experimental study, a 24 mm thick and 200 mm high copper plate was used as the vertical base plate. It was heated electrically through a plane electric heater placed at the vertical midplane of the copper plate. Plexiglas with a thermal conductivity of ≈ 0.134 W/mK was used for the horizontal fins with rectangular cross-section. These fins were attached to both sides of the vertical base plate, thus ensuring symmetry at both sides. Fin height and spacing were varied to yield different aspect ratios. The base temperature was also varied as a second parameter. Air at atmospheric conditions was used as the ambient fluid.

Temperature of the base plate was measured at six points, using Chromel-Alumel (K-type) thermocouples embedded at locations, 40 mm from edges and 2 mm from the vertical base surface. A holographic interferometer was employed as well, to visualize the temperature distribution in the boundary layer. Holographic images of the thermal field were recorded using a video camera. These records were loaded on a PC using a video frame grabber. A software for digital processing of these images has been developed and used for the analysis, instead of the conventional manual methods of image processing. Use of this software not only sped up the process but also made “real time analysis” available.

Although the most reliable information about a physical process is obtained through experiments, the predictive tools such as CFD can play more valuable role if the process under consideration can be realistically modelled into soluble mathematical relations. The mass, momentum, and energy conservation equations are exact representation of mass and energy transfer. But, there is no analytical solution for as they stand because of the non-linearity of equations, and in the case of natural convection the coupling of equations. Several numerical methods have been developed to numerically solve the conservation equations. The method followed in CFD is to discretise the governing partial differential equations into set of linear algebraic equations that can be solved by iterative numerical techniques. The most common discretisation method used in CFD is the finite-volume method. The finite-difference and finite-element methods are also frequently used. The commercial CFD code PHOENICS used in this study employs finite-volume discretisation.

PHOENICS is an acronym standing for **Parabolic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical-Integration Code Series**. PHOENICS is a finite-volume based general purpose CFD program for the solution of one or two phase, steady or unsteady fluid flow and heat transfer problems either reacting or non-reacting flows in one, two or three dimensional geometries of cartesian, polar or body-fitted coordinates.

PHOENICS has three main components. These are the preprocessor called **SATELLITE**, the main processor called **EARTH**, and the post processor called **PHOTON**. PHOENICS has three stand-alone components called **GUIDE**, **AUTOPLOT**, and **PINTO**.

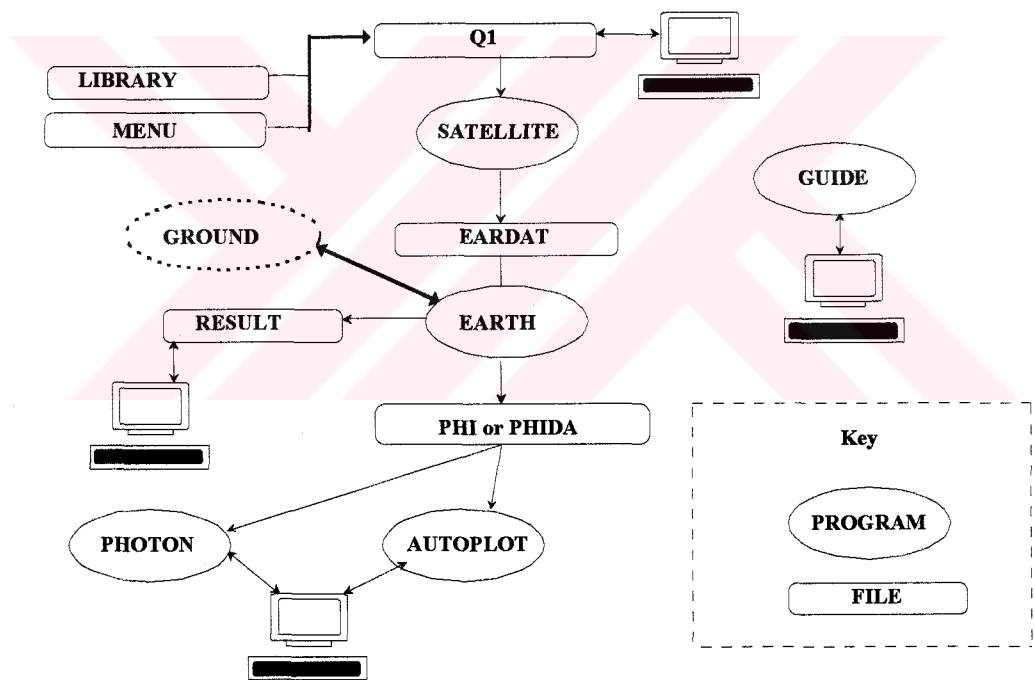


Figure 1. The layout of PHOENICS code.

SATELLITE receives instructions from the user either via the input file called **Q1** or during an interactive session through the input device, and creates a data file called **EARDAT** that **EARTH** can understand and executes. The main processor **EARTH** contains the main flow simulation code. It processes the instruction supplied by the satellite via **EARDAT** and produces two files, namely **RESULT** and either

PHIDA or **PHI**. The **RESULT** is a text file with crude graphics for the inspection of user. **PHIDA** or **PHI** are binary and ASCII files respectively, and are the input files containing the results and geometry information of the calculation domain for the post processing. The post-processor **PHOTON** visualizes the solution data provided by either of the **PHI** or **PHIDA**. The stand-alone component **GUIDE** provides information about PHOENICS, how to run it and CFD in general. **AUTO PLOT** facilitates the plotting of graphs either from PHOENICS data or of other origin. **PINTO** is the code that lets the transfer of PHOENICS data from one grid to another of different fineness. A schematic diagram of the components of PHOENICS and their relationship is given in the above figure.

Both **EARTH** and **SATELLITE** provide an option for additional **FORTRAN** coding of the user. That allows the user to build in the extra modelling and property equations that are not provided as standard by the PHOENICS. These coding frameworks are called **GROUND** and **SATLIT** for earth and satellite respectively.

The general transport equation solved by PHOENICS, in cartesian tensor notation has the following form.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi \quad (1)$$

This equation represents transport of mass when ϕ is replaced by 1, and conservation of the variable replacing variable ϕ is replaced with. The terms of this differential equations are known as **transient**, **convective**, **diffusive**, and **source** terms from left to right respectively. Γ_ϕ is the diffusion coefficient of variable ϕ .

Any analytic solution of the general transport equation would contain continuous information on the variable ϕ in space and time within the calculation domain. Since analytical solution is impossible, numerical solutions are sought for. The practice in the numerical solution of differential equations is to replace the

continuous information that would be contained in the exact solution with discrete values. That is achieved by transforming the differential equations into algebraic equations involving the unknown values of the variable ϕ at discrete points in the calculation domain. Thus the distribution of variable ϕ within the calculation domain is discretised. If the number of discrete points in space and time within the calculation domain are infinitely large the numerical solution will be the same as the exact solution. There are different ways of discretisation. The method used in PHOENICS is the finite volume discretisation.

Holographic pictures have proved the existence of air cells with low velocities near the corners below and above the fins. These cells result in the reduction of the convective heat transfer coefficient. Results of the experiments have proved that as the aspect ratio (A) decreases, i.e. the interfin cavity gets deeper, these air cells grow up, forming insulating layers of air in these cavities. As a consequence, the convective heat transfer coefficient also decreases. Thus, fins with low thermal conductivity are not suitable for use at surfaces which need to be cooled effectively, as in the case of the cooling of electronic equipment. However, in case of surfaces on which reduction of natural convective heat transfer is desired, as for a solar receiver, high fins with low thermal conductivity can be effectively used.

The convective heat transfer coefficients calculated by PHOENICS are approximately 10-40 % smaller than those obtained experimentally. The reason for this fact may be that in the numerical calculations, the influence of thermal radiation from the fins on natural convection from the base plate has not been considered.

A best-fit regression of experimental data in the ranges, $10^3 < Ra_H < 10^5$ and $0.25 < A < 4$, has provided the correlation

$$Nu_H = 0.155 \cdot Ra_H^{0.29} \cdot A^{0.27} \quad (2)$$

where

$$Nu_H = \frac{\bar{h} \cdot H}{k} \quad (3)$$

and

$$Ra_H = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot H^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (4)$$

are the Nusselt and Rayleigh numbers, respectively. The uncertainty analysis for this equation has yielded an overall uncertainty of $\pm 10 \%$, which is acceptable when compared with similar experimental work existing in the literature.

Influence of the variation of the thermal conductivity of fin material and radiative properties of fin surfaces on natural convective heat transfer from the base plate need to be investigated further in future studies.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kanatlı yüzeyler, ısı geçişinin en çok incelenen konularından biri olmuştur. Bu incelemelerde çoğunlukla kanatlı yüzeylerin, ısı geçişini artırması veya iyileştirmesi göz önüne alınmıştır. Bu nedenle kanatlı yüzeyler oluşturulurken seçilen geometriler ve malzemeler de ısı geçişini artırıcı yönde olmuştur. Bu tarz kanatlı yüzeyler, endüstrinin bir çok uygulama alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve bilimsel çalışmaların neticesi olarak yüksek kanat etkenliğine ve kanat verimine ulaşılmıştır. Fakat bazı teknolojik uygulamalarda istemeyerek de olsa ortaya çıkan kanatlı yüzeyler, gerek hava akışını engelleyici geometrik yapıları ve gerekse ısı iletkenliklerinin düşük olması nedenleriyle ısı geçişini olumsuz yönde etkileyebilmektedirler. Özellikle elektronik endüstrisinde zorunlu olarak ortaya çıkan bu tür kanatlı yüzeylerin ısı geçişine etkileri de, sistemin tasarımı ve güvenilirlik açılarından son derece önemli olmaktadır. Düşey levhalarda ısı iletkenliği düşük yatay kanatlı yapıların başlangıçta temel bir ısı geçişi problemi olarak çok az ilgi görmesine karşılık; özellikle elektronik sistemlerin tasarımında ortaya çıkmaları ve ilk bakışta ısı geçişini olumsuz etkileyeceğinin düşünülmesi, son zamanlarda bu konunun ilgi odağı haline gelmesine neden olmuştur.

Belirli bir maksimum çalışma sıcaklığı olan elektronik elemanlar, elektriksel dirençleri nedeniyle ısı üretirler ve çalıştıkları ortamın şartlarına bağlı olarak sıcaklıkları yükselir. Üretilen ısı kolaylıkla çevreye aktarılamaz ve, maksimum sıcaklığa ulaşılması halinde elemanın yanması söz konusu olur. Her ne kadar bu tür sistemler, bir fan ile zorlanmış ısı taşınımına maruz bırakılsalar da, fan sisteminde meydana gelecek arıza durumunda sistem tamamen doğal taşınımına maruz kalacaktır. Bu gibi durumlarda elektronik elemanların ulaşacağı maksimum sıcaklığın bilinmesi ve bu değerin maksimum çalışma sıcaklığından daha düşük olması için tasarımda değiştirilebilecek parametrelerin saptanması gerekebilir.

Düşey levhalarda ısı iletkenliği düşük yatay kanatların doğal ısı geçişine etkisinin olumsuz olması hali, bu kanatların yalıtım amaçlı veya sıcaklığın yükselmesi istenilen özel tasarımlarda kullanılıp kullanılmayacağını da gündeme getirmektedir. Optimum parametrelerin elde edilmesi ile oluşturulacak yalıtılmış yüzeyler, ısı yalıtımı gerektiren uygulamalarda bir alternatif teşkil edecektir.

Çeşitli geometrilerde pürüzlülüğe sahip düşey yüzeylerdeki doğal ısı taşınımı bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Fuji ve arkadaşları [1] düşey silindirin dış yüzeyine yerleştirilmiş ve silindirin malzemesinden olan yatay dikdörtgen kesitli kanat, yatay dikdörtgen kesitli pim veya yüzeyde yoğun olarak yayılı konik çıkıntılar şeklindeki pürüzlülüklerin doğal ısı taşınımına etkilerini yağ ve suda yaptıkları deneylerle incelemişlerdir.

Ortega ve Meffat [2] , düşey yüzeylere monte edilmiş elektronik elemanlardan oluşan modellerini doğal ısı taşınımı açısından incelemişlerdir.

Kishinaki ve arkadaşları [3] , iç bükey ve dış bükey kısımları ayrı ayrı ısıtılan dalgalı düşey yüzeylerdeki doğal ısı taşınımını deneysel olarak araştırmışlardır. Misumi ve Kitama [4] , ısı iletkenliği düşük yatay bir plaka ile bölünmüş düşey yüzey üzerinde deneyler yapmışlar ve ısı taşınımına etkisini incelemişlerdir.

Hung ve Shiau [5] , düşey yüzeydeki dikdörtgen kanatçığın, sürekli halde doğal ısı taşınımına etkisini incelemişlerdir. Aynı araştırmacılar benzer modelin geçici haldeki davranışını da araştırmışlardır [6] .

Bhavrani ve Bergles [7] , kademeli düşey yüzey ve yatay kanatlı düşey yüzeyi, kanatların düşük ve yüksek ısı iletkenliğini de gözönüne alarak deneysel olarak incelemişlerdir. Chan ve Tien [8] , düşey yüzeydeki yatay açık kanalı modelleyerek laminar hal için CFD programı geliştirmiş ve ısı geçişini sayısal olarak incelemişlerdir. Benzer geometri için Davitson [9] , türbülanslı halde $k - \epsilon$ modelini uygulamıştır.

Sunulan bu doktora çalışmasında, düşey levhalarda ısı iletkenliği düşük yatay kanatların doğal ısı taşınımına etkisi, holografik interferometri yöntemi ile deneysel olarak incelenmiş ve sayısal çözüm ile karşılaştırması yapılmıştır.

Bir video kamera ile kaydedilen holografik görüntülerin değerlendirilmesi için, bir bilgisayarla görüntü işleme programı geliştirilmiştir. Klasik değerlendirme yönteminde, kağıda basılan holografik görüntülerden sıcaklık dağılımlarının ve ısı taşınım katsayılarının belirlenmesi uzun ve yorucu el işlemleri ile yapılırken; bu çalışmada geliştirilen bilgisayar programı ile, bu değerlendirmenin çok hızlı, gerçek zamanlı ve daha sistematik olarak gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur.

Yapılan deneysel çalışma sonuçlarının doğruluğu ve geliştirilen görüntü işleme programının güvenilirliği, aynı şartlar için problemin, Phoenix CFD Paket Programı ile sayısal olarak çözülmesi ile kontrol edilmiştir.

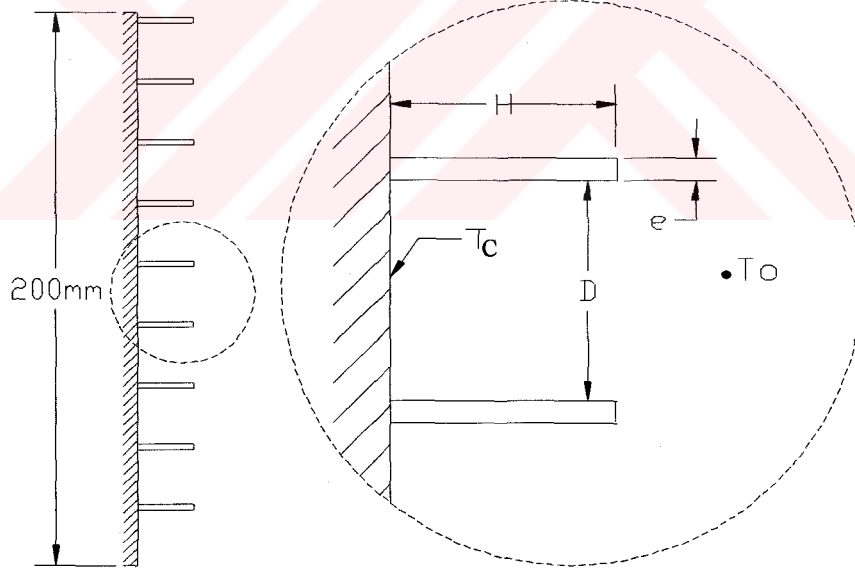
Deneysel incelemede, sabit yüzey sıcaklığında ısıtılan bakır plakalar üzerine düşük ısı iletkenliğine sahip pleksiglas kanatlar yatay olarak yerleştirilmiş ve dokuz farklı geometri üzerinde yaklaşık 90 adet deney yapılmıştır. Deneysel ve sayısal incelemelerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve kanat yüksekliğini ve kanatlar arası mesafeyi de göz önüne alan bir ısı geçişi ifadesi elde edilmiştir.

BÖLÜM 2

MATEMATİK MODEL VE PHOENICS CFD PROGRAMI İLE SAYISAL ÇÖZÜM

2.1. Matematik Model

Düşey levhalarda ısı iletkenliği düşük yatay kanatların doğal ısı taşınımına etkisini incelemek üzere Şekil 2.1' de verilen model ele alınmıştır. T_c sabit sıcaklığındaki düşey bir yüzey üzerine H yüksekliğinde ve e kalınlığında yatay kanatlar D aralıklarıyla yerleştirilmiştir. Sabit sıcaklıktaki yüzey 200 mm yüksekliğe sahiptir.



Şekil 2.1. Matematik modelin şematik resmi.

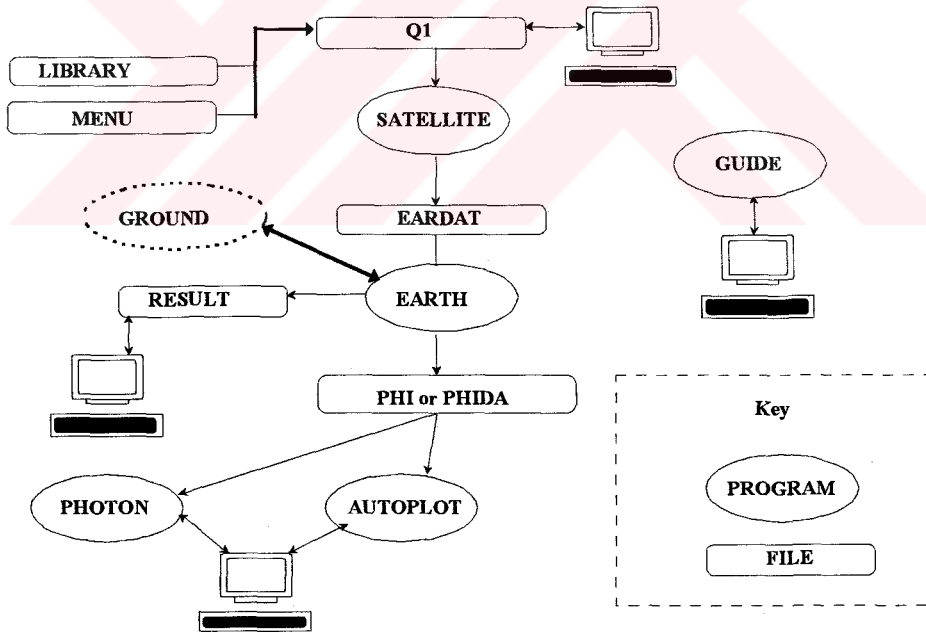
Modelin sayısal çözümlemesinde D ve H değerleri değiştirilmiş ve deneylerdeki şartlar için çözümler yapılmıştır.

2.2. PHOENICS CFD Programı

PHOENICS; *Parabolic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical-Integration Code Series* ifadesinin kısaltmasıdır. Sonlu-hacim yöntemini kullanmaktadır. Program; tek veya iki fazlı, sürekli veya geçici hallerdeki, kimyasal reaksiyon içeren veya içermeyen akış ve ısı geçişi problemlerini; bir, iki veya üç boyutlu kartezyen, polar veya cisim uyumlu (body-fitted) koordinat sistemlerinde çözebilmektedir.

2.3. PHOENICS'in Genel Yapısı

PHOENICS, üç ana kısımdan oluşmaktadır : **SATELLITE**, **EARTH**, **PHOTON**. Ayrıca kendi başlarına çalışabilen ve adları **GUIDE**, **AUTO PLOT** ve **PINTO** olan üç ayrı programı vardır. Programın genel akış şeması Şekil 2.2' de verilmiştir.



Şekil 2.2. PHOENICS CFD Programının genel akış şeması.

SATELLITE, çözümleme ile ilgili giriş bilgilerini **Q1** dosyasından veya grafik ortamda kullanıcıdan alır ve **EARTH** ana programına **EARDAT** isimli veri dosyası hazırlayarak bu programı başlatır. **EARTH**, çözümlemeyi yapar ve kullanıcı

tarafından herhangi bir grafik programıyla kullanılabilen **RESULT** text dosyasını oluşturur. Ayrıca, **PHOTON** ve **AUTO PLOT** programları tarafından kullanılarak çözümle ilgili sonuçları görsel hale getirmek üzere, **PHIDA** veya **PHI** formunda dosyalar üretir. **GUIDE** ise, **PHOENICS** hakkında bilgi verir.

Değişik çözüm modellerinin FORTRAN kodu kullanılarak belirli ölçülerde **PHOENICS**'e dahil edilmesi mümkündür. **PHOENICS** bu yönüyle kullanıcı tarafından geliştirilebilir.

2.4. PHOENICS Tarafından Çözülen Genel Transport Denklemi

Kartezyen tansör gösterimi ile genel transport denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi \quad (2.1)$$

şeklinde verilmektedir. Bu denklemde $\phi = 1$ alındığında kütle korunumu denklemi elde edilir. ϕ 'nin diğer değerleri için ise, o değer korunumu ile ilgili transport denklemi elde edilmektedir.

Genel transport denklemi; sırasıyla, zamana bağlı terim, taşınım terimi, yayılım terimi ve kaynak teriminden oluşmaktadır. Γ_ϕ ise, yayılım katsayısını ifade etmektedir.

2.5. PHOENICS CFD Programının Matematik Modele Uygulanması

PHOENICS, korunum denklemlerini sonlu hacim yöntemini kullanarak ayrıklaştırır ve elde edilen lineer denklem takımlarını çözer.

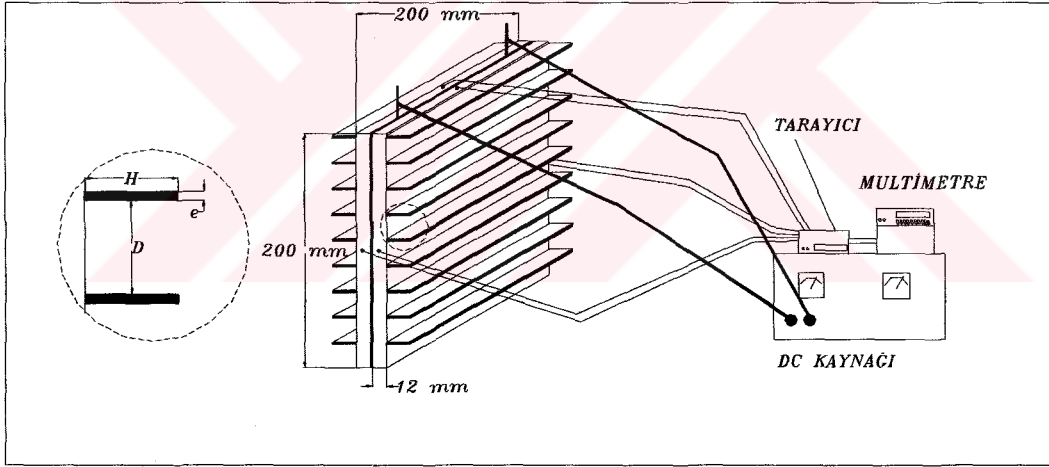
Modelin geometrisi **PHOENICS** programına girildikten sonra laminar hal için çözümler yapılmıştır. Deneyde olduğu gibi, kanat malzemesi pleksiglas ($k = 0.134$ W/mK), ortam ise hava kabul edilerek çözüm yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5'de deneysel sonuçlarla birlikte verilmiştir.

BÖLÜM 3

DENEY TESİSATI VE DENEYLERİN YAPILIŞI

3.1. Deney Tesisatı

Düşey levhalarda ısı iletkenliği düşük yatay kanatların doğal ısı taşımına etkisini modellemek üzere Şekil 3.1 de verilen deney tesisatı kurulmuştur. T_c sabit sıcaklığındaki düşey bir yüzey üzerine H yüksekliğinde ve e kalınlığında yatay kanatlar D aralıklarıyla yerleştirilmiştir. Kanat malzemesi olarak, düşük ısı iletkenliğine sahip (0.136 W/mK) 2 mm kalınlığında siyah *Pleksiglas* kullanılmıştır.



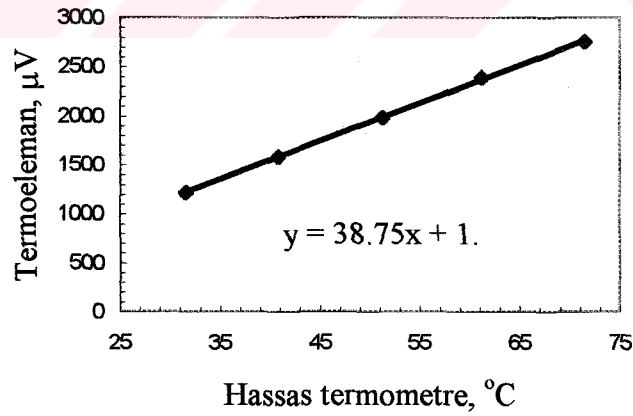
Şekil 3.1. Deney tesisatı.

Deney parçası 12 mm kalınlığında ve 200x200 mm boyutlarında iki bakır plaka arasına yerleştirilen elektrikli ısıtıcıdan meydana gelmiştir. Bakır plakaların 12 mm kalınlığında seçilmesi ile sabit yüzey sıcaklığının elde edilmesi amaçlanmıştır. Elektrikli ısıtıcı, besleme gerilimi ve besleme akımının ayarlanabildiği bir *Doğru Akım Kaynağı* ile beslenmiştir. Isıtıcı gücü, elektriksel gerilimin ve akımın, sırasıyla 0.01V ve 0.01 A hassasiyetli sayısal multimetreler ile ölçülmesiyle belirlenmiştir. Ortam sıcaklığı, 0.1 °C hassasiyetli bir termometre ile ölçülmüştür. Yüzey sıcaklığı

T_c , bakır plakaların üç kenarına açılan deliklere yerleştirilen 6 adet Kromel-Alumel (K tipi) termoeleman çifti ile ölçülmüştür. Termoelemanların referans sıcaklığı olarak ortam sıcaklığı alınmıştır. Termoelemanlar, bakır plakanın kenarlarından 4 cm ve yüzeyinden 2 mm derinliğe yerleştirilmiştir. Bu termoelemanlar deneylere başlamadan önce sıcaklık ayarlı etüvde $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyetli civalı termometrelerle kalibre edilmiştir. Elde edilen kalibrasyon ölçümleri Tablo 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir. Deney tesisatının fotoğrafı Şekil 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Termoelemanların kalibrasyon ölçümleri.

Termoelemanın ölçtüğü gerilim μV						Referans Termometre $^{\circ}\text{C}$
1	2	3	4	5	6	
1215	1220	1210	1213	1225	1218	31.6
1583	1595	1568	1585	1597	1593	40.8
1980	1989	1975	1977	1998	1986	51.2
2385	2396	2379	2382	2402	2390	61.2
2751	2769	2745	2750	2775	2760	71.5



Şekil 3.2. Termoelemanların kalibrasyon eğrisi.

3.2. Deneylerin Yapılışı

Deneylerde, kanatlar arası mesafe D ve kanat boyu H parametre olarak kullanılmıştır. Kanat kalınlıkları ise 2 mm değerinde sabittir. Deney parametreleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Deney parametreleri ve deneylerin gösterimleri

	Kanat Yüksekliği, H		
Kanat Aralığı, D	5 mm	10 mm	20 mm
5 mm	D55	D15	D25
10 mm	D51	D11	D21
20 mm	D52	D12	D22

Tablo 3.2’de görüldüğü gibi kanat yüksekliğinin (H) ve kanat aralığının (D) üçer farklı değerleri için deneyler yapılmıştır. Böylelikle değişik 9 adet deney geometrisi elde edilmiştir.

Deneylerde kullanılan diğer bir parametre ise T_c yüzey sıcaklığıdır. Her bir geometri için ortalama 10 farklı yüzey sıcaklığında deneyler yapılmıştır. Böylelikle yaklaşık 90 deney yapılmıştır.

Bu deneylerin ilerideki bölümlerde kullanılacak kısa gösterimleri de Tablo 3.2’de verilmiştir. Buna göre, D harfinden sonra gelen ilk rakam, kanat yüksekliğini, ikinci rakam kanat aralığını göstermektedir. Yüzey sıcaklığı (T_c) ile ortam sıcaklığı (T_o) arasındaki fark ise, kısa gösterimin sonuna eklenmiştir. Örneğin, 10 mm kanat yüksekliği, 20 mm kanat aralığı ve 30 °C sıcaklık farkının gösterimi, $D12_30$ şeklinde olmaktadır.

Yapılan deneylerde amaç ısı geçişini incelemek olduğu için, plaka ve kanat cidarlarındaki ısı taşınım katsayılarının bulunması hedeflenmiştir. Bunun için *Holografik İnterferometri Yöntemi* kullanılmıştır. Bu yöntemin detaylı açıklaması bir sonraki bölümde verilmiştir.

BÖLÜM 4

HOLOGRAFİK İNTERFEROMETRİ UYGULAMALARINDA SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEME

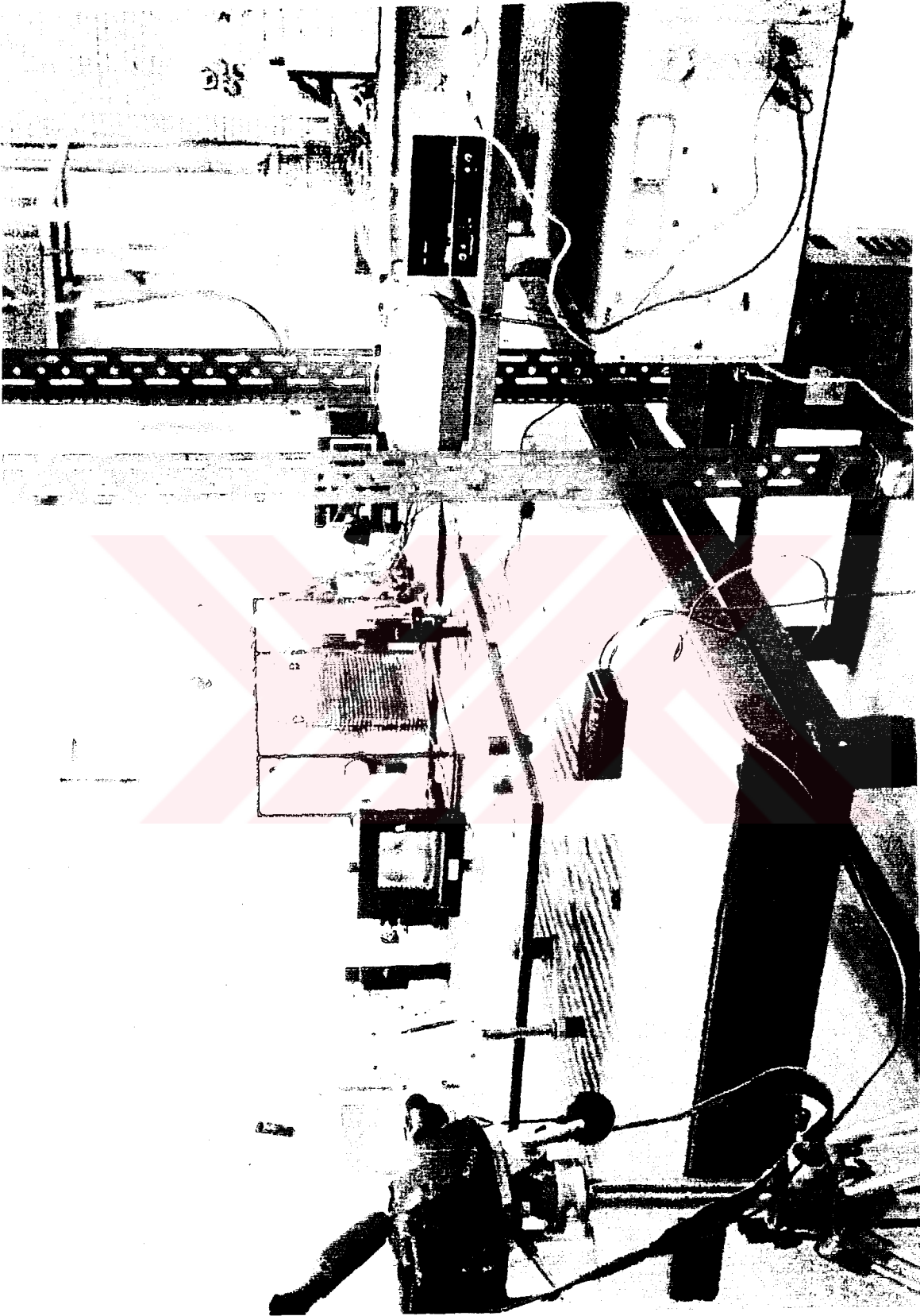
Optik bir yöntem olması nedeniyle holografik interferometri, akışı etkilemeden ve tek bir görüntü ile bütün deney bölgesinin belirli bir anda değerlendirilebilmesini sağlar. Bu nedenle, sıcaklık, derişiklik ve gerilme alanlarının bulunması gibi iki veya üç boyutlu değerlendirmelerde en çok kullanılan yöntemlerden biridir.

Klasik holografik interferometri uygulamalarında değerlendirilmek istenilen fiziksel büyüklüğe ait görüntü, bir fotoğraf filmi üzerine kaydedilir ve ancak banyo işlemlerinden sonra değerlendirme yapılabilir. Bu nedenle olayın gerçek zamanlı (real time) analizi mümkün olmadığı gibi hassas bir değerlendirme için ilave cihazlara ve hesaplamalara gerek vardır.

Bu çalışmada, klasik yöntemden farklı olarak görüntü, bir kamera ve video kartı yardımıyla bilgisayara aktarılmakta, hazırlanan bir yazılım vasıtasıyla gerekli değerlendirmeler çok kısa sürede yapılmakta ve böylelikle olayın gerçek zamanlı analizi mümkün olmaktadır. Sayısal görüntü işleme (Digital Image Processing) olarak da adlandırılan bu yöntem, sunulan çalışmadaki ısı geçişi problemine uygulanmıştır.

4.1. Giriş

Holografi, cisimlerden gelen ışık dalgalarının bir holografik ortamda kaydedilmesinden sonra hiçbir kayba uğramadan tekrar belirlenmesini sağlayan bir tekniktir. Bu tekniğin prensipleri ilk kez 1948 yılında D. Gabor tarafından ortaya atılmış ve 1960 yıllarında laserin icadıyla da büyük gelişme göstermiştir [10] . İlk



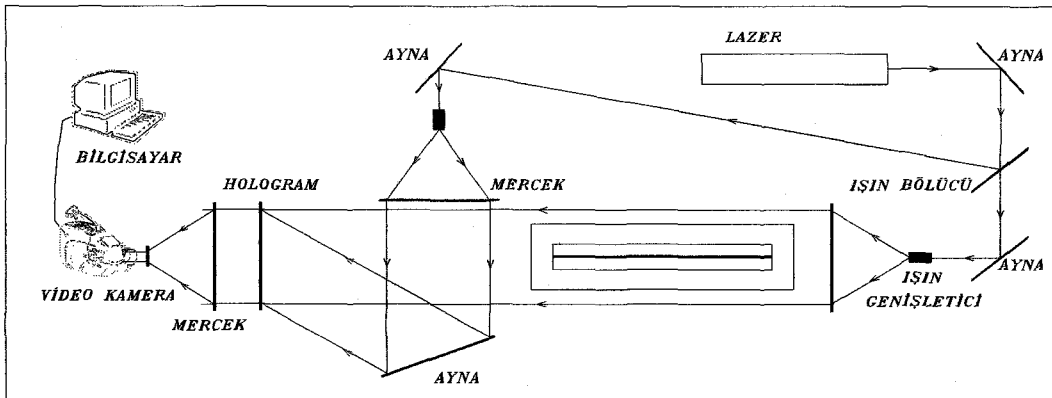
Şekil 3.3 Deney tesisatının görüntüsü.

yıllarda holografi sadece üç boyutlu görüntü sağlayan teknik bir yöntem olarak ilgi çekmiştir. Fakat daha sonraları holografinin ölçme tekniğine uygulanması ile; birçok mühendislik dalında yer değiştirme, deformasyon, titreşim analizleri, gerilim ölçmeleri, tahribatsız deneyler, ısı ve kütle geçişi ölçümleri başarı ile yapılabilmektedir.

Holografik interferometri tekniği, noktasal ölçme yerine bir alanın veya hacmin tümünün aynı anda değerlendirilebilmesini ve ölçme sırasında olayın tedirgin edilmemesini sağlaması nedeniyle diğer ölçme yöntemlerine tercih edilmektedir.

4.2. Holografinin Prensipleri

Holografik interferometride, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi iki veya daha fazla ışık dalgası bir ışın bölücüde ikiye ayrıldıktan sonra farklı yolları takip ederek bir film üzerine düşürülür. Işın bölücüden sonra, cisim ışını, uzaysal filtre edilip genişletildikten sonra cismin içinden geçerek fotografik filme gelir. Işın bölücüden çıkan ve referans ışını olarak adlandırılan ikinci ışık dalgası ise, yine filtre edilip genişletildikten sonra fotografik ortama düşürülür. Aynı uyumlu ışık kaynağından (bir laserden) çıkan cisim ve referans ışınları fotografik ortamda üstüste geldiğinde girişimler meydana gelir. Bu girişimler fotografik ortamda kaydedilir ve banyo işleminden sonra elde edilen fotoğrafa hologram denir.



Şekil 4.1. Holografik interferometri tesisatı.

Hologram, sonradan ilk referans ışınına benzer bir ışınla aydınlatılırsa, mikroskopik model değişik ızgara sabitli bir kırılma ızgarası gibi rol oynar. Hologramdan geçen ışın doğrultusu yeniden belirleme ışını ile aynı olan sıfıncı mertebeden ışın dalgası ile iki adet birinci mertebeden ışın dalgası ihtiva eder. Bu işleme yeniden belirleme denir.

Yeniden belirleme esnasında daha önceden kaydedilmiş tüm görüntüler aynı anda ortaya çıkar. Eğer aynı cismin farklı şartlardaki iki durumu bir ortama kaydedilmiş ise, yeniden belirlemede ikisi de görülür ve iki farklı şart arasındaki şekil değişimleri deney parçasında bir girişim meydana getirir. Bu girişim çizgilerinin değerlendirilmesi ile şekil değişimine neden olan sıcaklık, derişiklik, gerilme gibi etkenler ölçülebilir [11].

4.3. Girişimlerin Değerlendirilmesi

Girişim çizgisi sayısı ile sıcaklık arasındaki ilişki Mach-Zehnder interferogramındaki ilişkiye çok yakındır. Bu konuda detaylı bilgi Hauf ve Grigull tarafından verilmiştir [12]. Burada sadece sonuç denklemleri verilecektir. Bu denklemler elde edilirken ortamın kırılma indisi $n = n(x,y)$ şeklinde iki boyutlu kabul edilmiştir. Ayrıca z doğrultusunda ışığın yol alması doğrusal kabul edilmektedir. Buna göre dalga boyunun katları S ile ifade edilirse;

$$S(x,y) = \frac{1}{\lambda} \int_0^L (n_c - n(x,y)) dz \quad (4.1)$$

bağıntısı verilebilir. Burada;

$S(x,y)$: x,y noktasındaki dalga boyunun katlarını,

λ : kullanılan ışığın dalga boyunu,

$n(x,y)$: x,y noktasında ortamın kırılma indisini,

L : deney ortamının z doğrultusundaki kalınlığını,

n_c : hologram kaydedildiği anda, ortamın kırılma indisini

göstermektedir.

Kırılma indisi ile sıcaklık arasındaki bağıntı Gladstone-Dale bağıntısıyla ideal gaz hali için verilmiştir. Bu bağıntı Hauf ve Grigull [12] tarafından;

$$n(x, y) - 1 = C_D / T(x, y) \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada C_D saydam ortamın basıncı ve özelliklerine bağlı bir sabittir ve kuru hava için 1.0×10^5 Pa basınçta 0.0796 K olarak alınabilir. (4.1) ve (4.2) denklemlerinden;

$$\frac{S(x, y)\lambda}{LC_D} = \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T(x, y)} \quad (4.3)$$

Burada sıcaklık dağılımının T_o 'a bağlı olarak bulunabileceği görülmektedir. T_o ortam sıcaklığı olarak alınabilir. Eğer i 'inci dalga boyunun katları S_i ve $i+1$ 'incinin de S_{i+1} ile gösterilirse;

$$(S_{i+1} - S_i) \frac{\lambda}{LC_D} = \frac{1}{T_i(x, y)} - \frac{1}{T_{i+1}(x, y)}; \quad i = 1..n \quad (4.4)$$

$S_{i+1} - S_i = 1$ olduğu düşünülürse;

$$T_i(x, y) = T_{i+1}(x, y) \left(1 + \frac{\lambda}{LC_D} T_{i+1}(x, y) \right)^{-1} \quad (4.5)$$

şeklinde sıcaklık dağılımını ifade eden bağıntı elde edilmiş olur. Bu bağıntıdan sıcaklık dağılımının elde edilebilmesi için ortam sıcaklığının veya cidar sıcaklığının ($i=1$ veya $i=n$) bilinmesi gerekmektedir. Burada son sıcaklık değeri olan cidar sıcaklığı termoelemanlarla ölçülmektedir. Buna göre geriye iterasyonla diğer sıcaklıklar (4.5) bağıntısından elde edilir [13]. Yapılan deneyde HeNe laseri ışık kaynağı olarak kullanılmış ve $L=0.22$ m, $\lambda = 632.8 \times 10^{-9}$ m alınmıştır.

4.4. Holografik İnterferometri Tesisatı

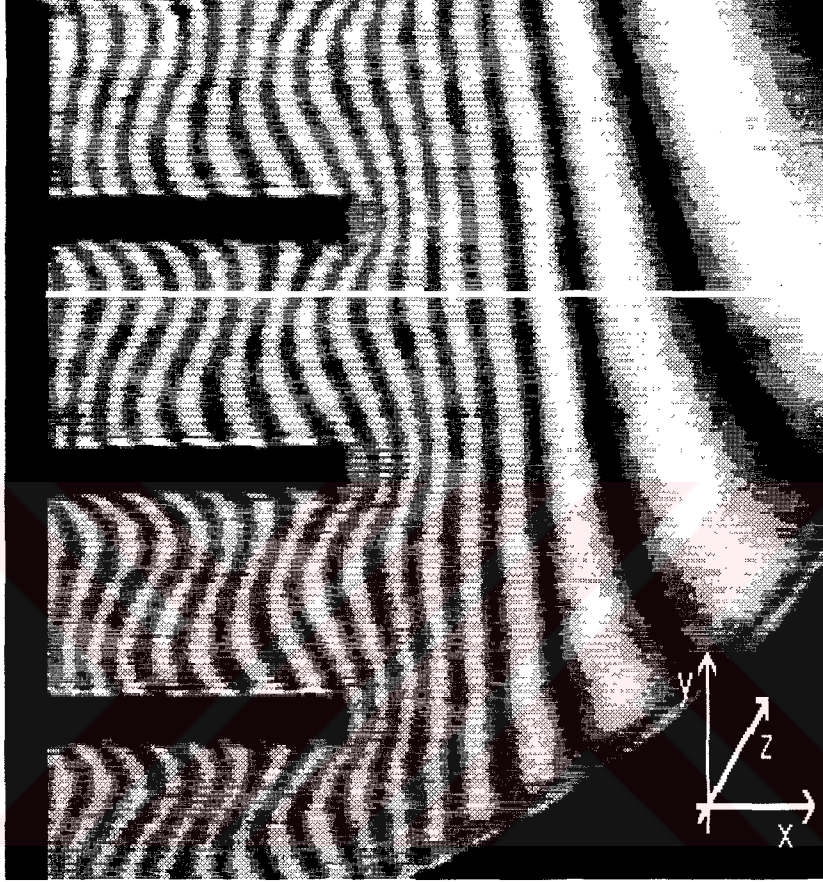
Holografi tesisatı Şekil 4.1’de şematik olarak verilmiştir. Burada standart holografi tesisatına ek olarak bir video kamera ve bilgisayar bağlantısı bulunmaktadır. Standart deneylerden farklı olarak, elde edilen görüntüler, fotografik ortam yerine kameraya veya doğrudan bilgisayara kaydedilmektedir. Gerekirse anında görüntü üzerinde (real time) gerçek zamanda inceleme yapılabilmektedir. Böylelikle standart holografi tesisatında fotoğrafik ortamlarda elde edilen görüntülerin incelenmesi esnasında karşılaşılan değerlendirme güçlükleri ve daha da önemlisi uzun değerlendirme zamanları ortadan kalkmış olmaktadır.

4.5. Sayısal Görüntü İşleme

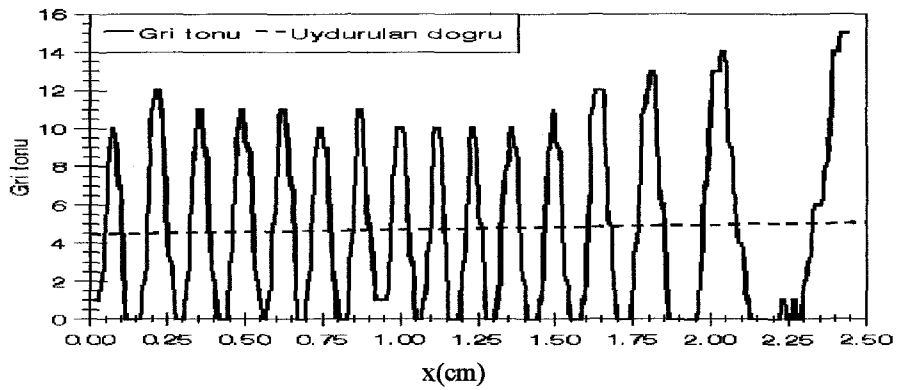
Elektronik alanındaki hızlı gelişmenin bir sonucu olarak istenilen görüntüler bilgisayara sayısal olarak kaydedilebilmekte ve uygun yazılım programları sayesinde üzerinde inceleme yapılabilmektedir. Bu çalışmada, holografi deney tesisatında cisim ışınının farklılaşmasına sebep olan sıcaklık alanı girişim çizgileri meydana getirmekte ve elde edilen görüntü bir kamera ve görüntü kartı (frame grabber card) ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayara ulaşan görüntü 512x256 nokta (pixel) ve 16 gri tonla belirlenmektedir.

Geliştirilen bir yazılım ile bilgisayardaki görüntü, nokta nokta okunarak herhangi bir y noktasında, x -ekseni doğrultusundaki gri tonu değişimleri Şekil 4.2’de görüldüğü gibi grafik haline getirilmektedir. Bilgisayardaki görüntüde siyah-beyaz bantlar halinde görünen girişim çizgilerinin orta noktalarını bulmak için, gri tonuna dönüştürülen grafikte maksimum ve minimum noktalara ait x koordinatlarının bulunması gerekmektedir. Ayrıca maksimum ve minimum noktaların sıra sayıları (dalga boyu katları) yine x koordinatına bağlı olarak bulunmalıdır. Bunun için gri tonu grafiğinde en küçük kareler yöntemine göre bir doğru geçirilmekte ve bu doğrunun gri tonu grafiğini kesim noktaları bulunmaktadır. Ardışık kesim noktalarının arasındaki mesafelerin orta noktaları, elde edilmek istenen maksimum ve minimum noktaların koordinatlarını

vermektedir. (4.5) denklemi kullanılarak sözü geçen y noktasındaki x 'e bağlı sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. Bu işlem bütün y ekseni boyunca yapıldığında $T(x,y)$ sıcaklık dağılımı elde edilecektir.



Şekil 4.2. Deneyde video ile kaydedilen ve eş sıcaklık eğrilerini gösteren holografik görüntü.



Şekil 4.3. Gri tonu değişimi ve değerlendirilmesi.

Isı geçişi problemlerinde sıcaklık dağılımından çok cidardaki ısı taşınım katsayısı veya boyutsuz Nusselt sayısı önemlidir. Isı taşınım katsayısı;

$$h(y) = -\frac{1}{k(T_c - T_o)} \left. \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (4.6)$$

ve Nusselt sayısı;

$$Nu(y) = \frac{h(y)L}{k} \quad (4.7)$$

bağıntılılarıyla elde edilmektedir. Burada T_c , cidar sıcaklığı; k ise ortamın ısı iletim katsayısıdır. $\left. \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \right|_{x=0}$ türevinin sayısal olarak elde edilmesi için, herhangi bir y noktasında elde edilen $T(x)$ sıcaklık dağılımı;

$$T(x) = C_1 + C_2x + C_3x^2 + \dots \quad (4.8)$$

şeklinde bir polinoma dnüşürölür ve C_2 değeri cidardaki türev olarak alınır. Bu polinomun derecesi genellikle maksimum dalga boyu katına (n) eşit olarak alınır.

Bu yöntemle elde edilen ısı taşınım katsayıları, PHOENICS CFD programı ile hesaplanan değerlerle kıyaslamalı olarak bir sonraki bölümde tablolar ve şekiller ile sunulmuştur.

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARI VE PHOENICS CFD PROGRAMI İLE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

5.1. Deney Sonuçları ve PHOENICS CFD Programı ile Yapılan Hesaplar

Bu bölümde, deneysel sonuçlar, aynı şartlarda Phoenix CFD Programı ile elde edilen sayısal çözümlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yapılan deneyler, Tablo 3.2'ye uygun olarak kodlanmıştır ve herbir geometri için,

- değişik yüzey sıcaklıklarında elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar tablo halinde,
- bu yüzey sıcaklığı şartlarından birisi için, deneysel olarak ve sayısal çözüm ile elde edilen, yüzeydeki yerel ısı taşınım katsayısı değişimleri, kanatsız düşey yüzey hali ile karşılaştırmalı olarak grafik halinde,
- bu sıcaklıklar için video ile kaydedilen holografik görüntüler halinde,
- sayısal çözümden elde edilen akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri Ek - A 'da grafikler halinde,

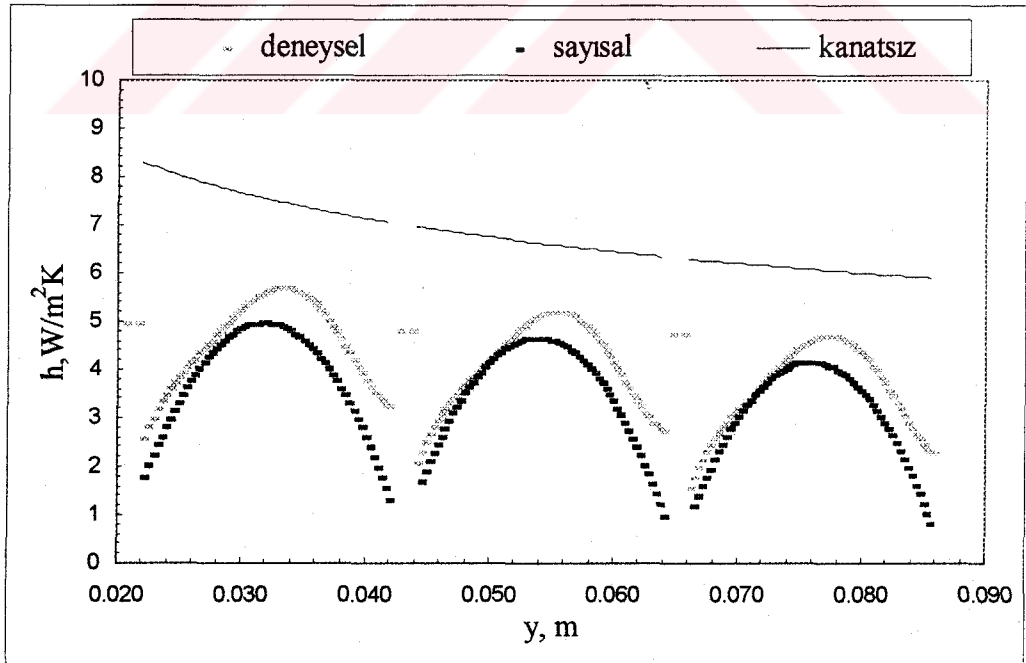
verilmiştir. Burada kanatsız düşey levhalar için, $10^4 < Gr Pr < 10^9$ aralığında

$$Nu = 0.59 (Gr Pr)^{1/4} \quad (5.1)$$

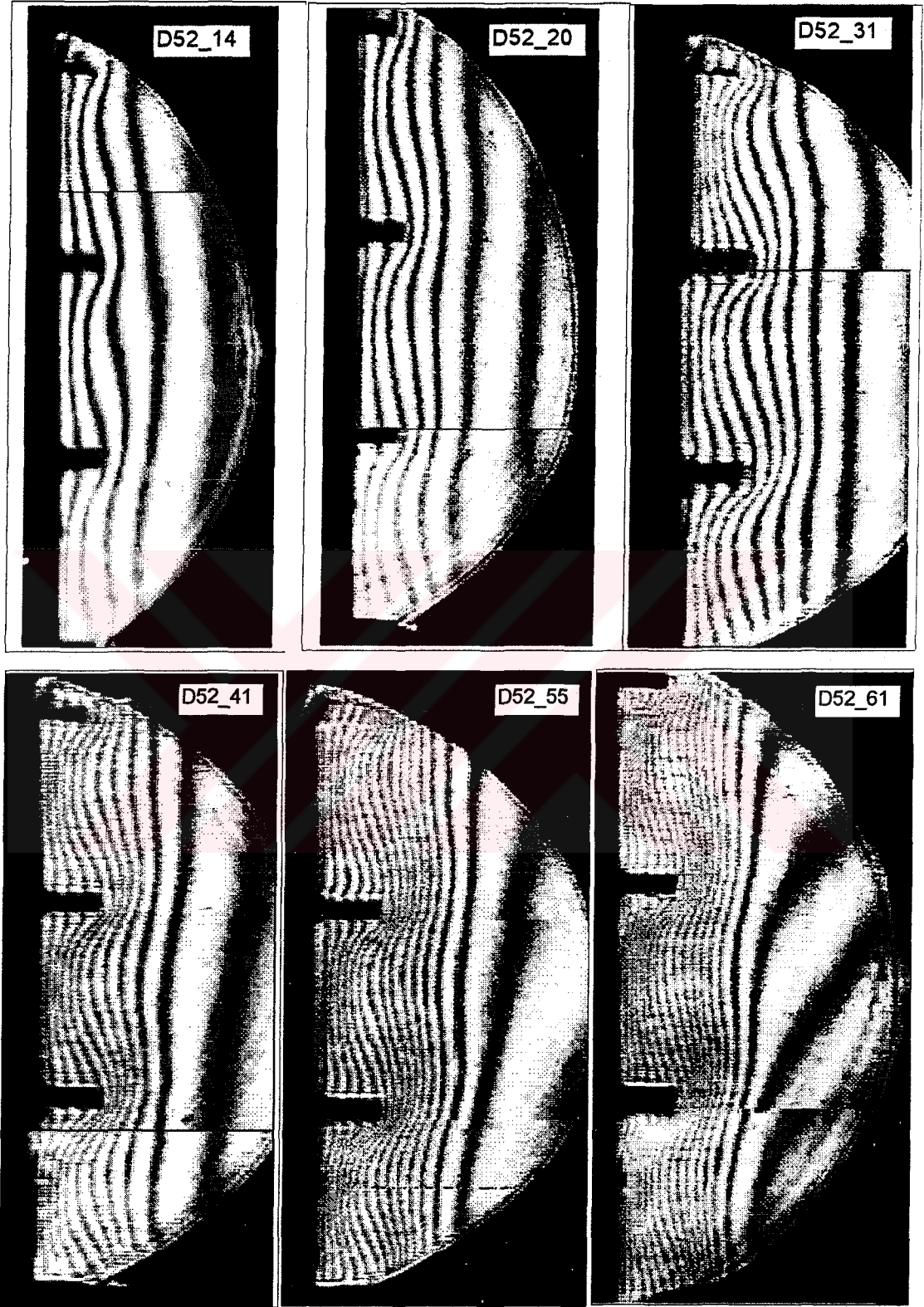
olarak verilen denklem kullanılmıştır [14]. Tablolarda verilen ısı taşınım katsayıları ise, tüm yüzey boyunca elde edilen ortalama değerlerdir. Burada $h_{deneysel}$, holografik interferometri ile elde edilen görüntülerin, bu çalışmada geliştirilmiş olan görüntü işleme programı ile değerlendirilmesi sonucunda hesaplanan ısı taşınım katsayıları; $h_{sayısal}$ ise, PHOENICS CFD programı ile gerçekleştirilen sayısal çözüm sonucunda elde edilen ısı taşınım katsayılarıdır. Ayrıca tablo ve şekillerde, kanat aralığının kanat yüksekliğine oranı olarak tanımlanan kenar oranı, A verilmiştir.

Tablo 5.1. D52 deneylerinde ölçülen değerler. (A=4)

Ölçülen büyüklük	Birim	Deneyler					
		D52_14	D52_20	D52_31	D52_41	D52_55	D52_61
V_{c1}	μV	576	782	1228	1617	2159	2414
V_{c2}		553	740	1202	1591	2130	2365
V_{c3}		551	755	1236	1642	2181	2404
V_{c4}		545	775	1201	1600	2134	2344
V_{c5}		544	755	1225	1573	2114	2310
V_{c6}		555	754	1212	1582	2129	2330
$T_c - T_o$	$^{\circ}C$	14.29	19.65	31.44	41.41	55.32	61.09
T_c		43.69	48.65	60.24	70.01	83.92	89.89
T_o		29.40	29.00	28.80	28.60	28.60	28.80
U	Volt	3.50	4.15	5.47	6.40	7.51	8.00
I	Amper	2.64	3.10	4.08	4.75	5.58	5.90
$h_{deneysel}$	W/m^2K	3.89	4.20	4.91	5.33	5.80	5.94
$h_{sayisal}$	W/m^2K	2.88	3.16	3.61	3.92	4.45	4.53



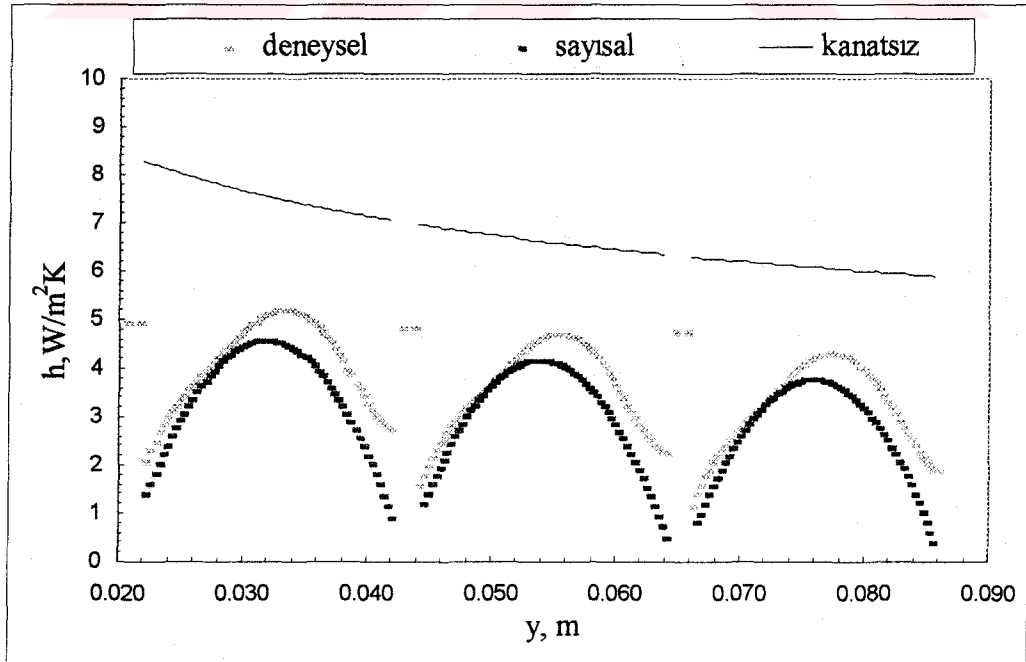
Şekil 5.1. Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi (A=4).



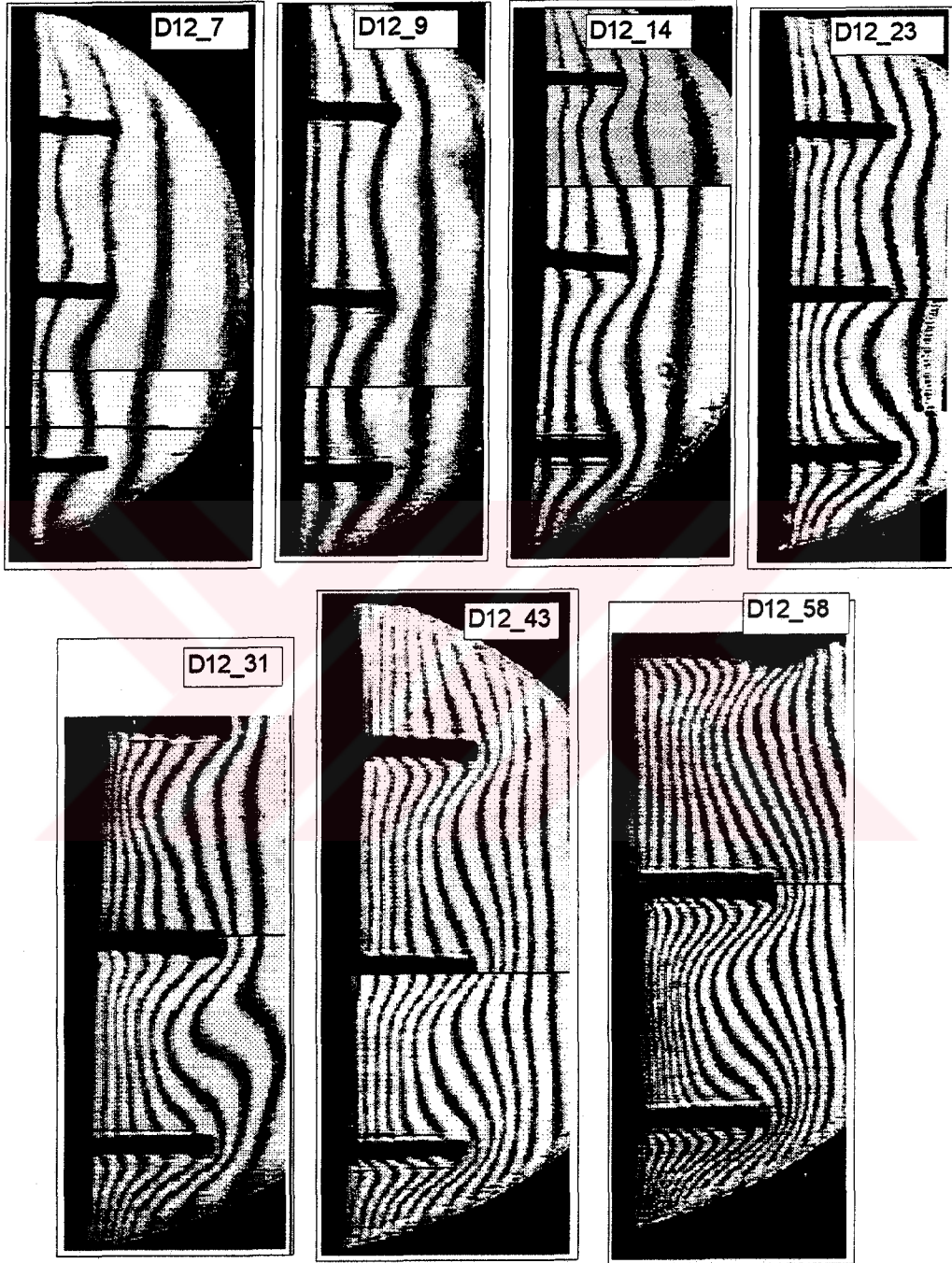
Şekil 5.2. D52 Deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=4$)

Tablo 5.2. D12 deneylerinde ölçülen değerler (A=2).

Ölçülen büyüklük	Birim	Deneyler						
		D12_7	D12_9	D12_14	D12_23	D12_31	D12_43	D12_58
V_{c1}	μV	312	367	528	915	1216	1721	2300
V_{c3}		276	359	519	902	1203	1670	2246
V_{c4}		270	360	523	906	1209	1671	2246
V_{c5}		261	366	522	910	1211	1669	2247
V_{c6}		261	362	525	905	1203	1673	2247
$T_c - T_o$	$^{\circ}C$	7.12	9.36	13.51	23.42	31.18	43.38	58.25
T_c		26.82	28.46	31.91	44.12	51.78	64.48	78.15
T_o		19.70	19.10	18.40	20.70	20.60	21.10	19.90
U	Volt	2.5	3	3.8	5.1	5.89	6.13	7.18
I	Amper	1.82	1.955	2.655	3.25	3.99	4.49	5.26
$h_{deneysel}$	W/m^2K	2.37	2.43	2.73	3.37	3.52	3.58	3.82
$h_{sayısal}$	W/m^2K	1.47	1.58	1.81	2.14	2.21	2.56	2.99



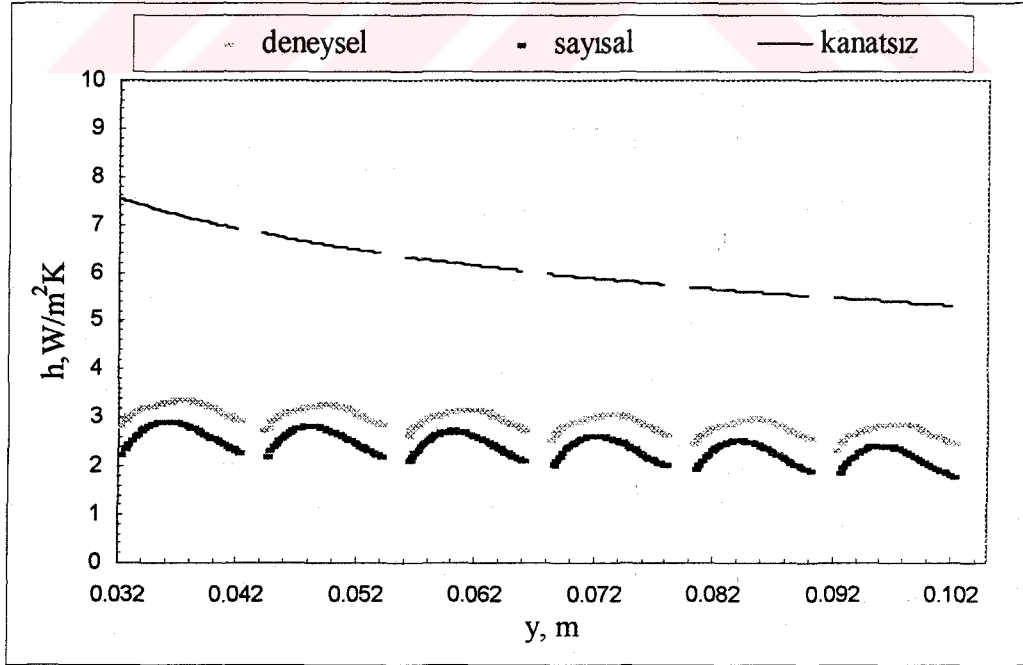
Şekil 5.3. Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi (A=2).



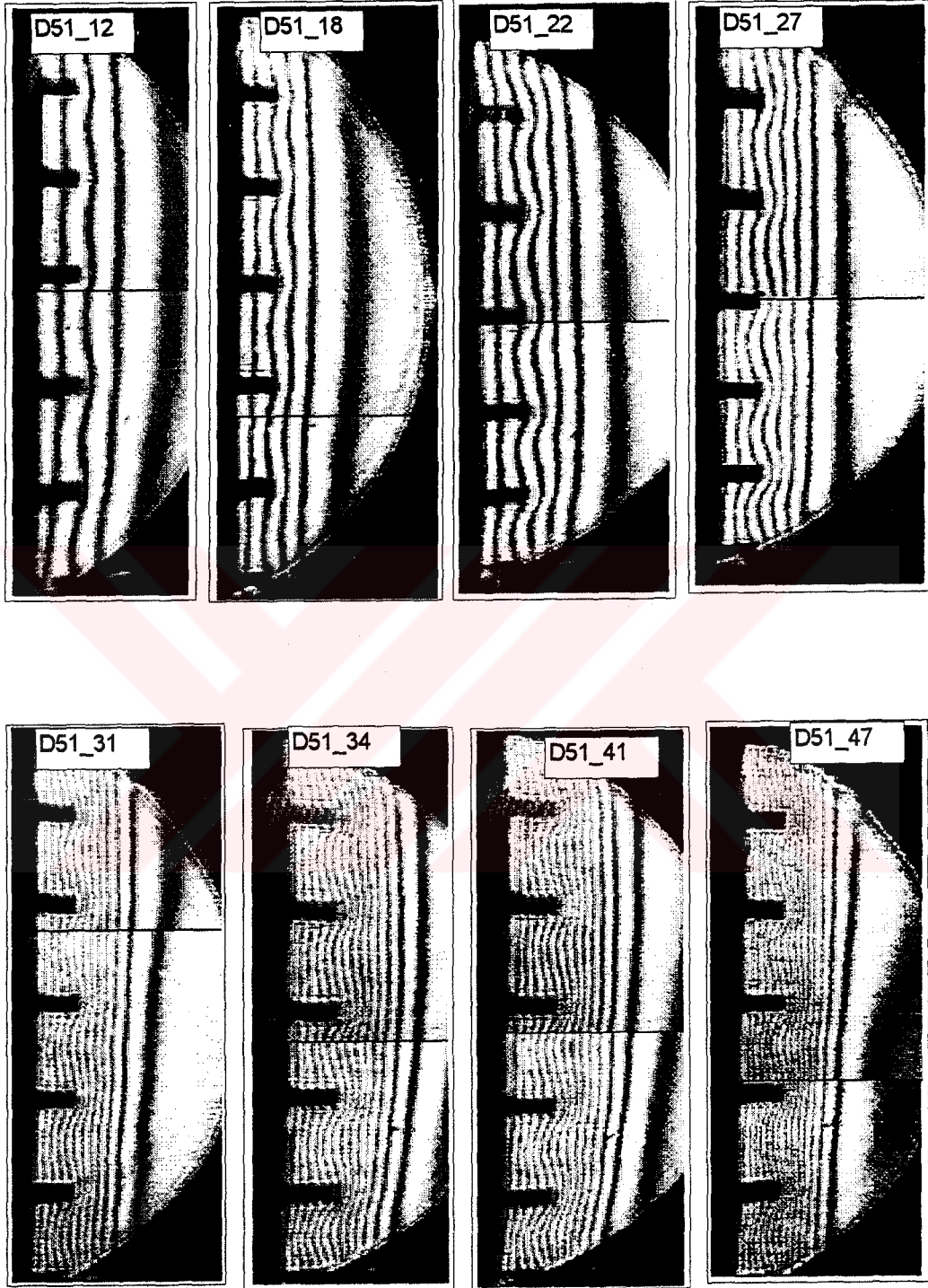
Şekil 5.4. D12 Deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=2$).

Tablo 5.3. D51 deneylerinde ölçülen değerler (A=2).

Ölçülen büyüklük	Birim	Deneyler							
		D51_12	D51_18	D51_22	D51_27	D51_31	D51_34	D51_41	D51_47
V_{c1}	μV	481	711	854	1071	1231	1353	1618	1864
V_{c2}		471	707	850	1052	1223	1330	1609	1833
V_{c3}		476	716	863	1068	1242	1346	1641	1847
V_{c4}		456	685	826	1036	1188	1304	1567	1791
V_{c5}		453	683	821	1045	1183	1316	1555	1812
V_{c6}		462	699	839	1068	1214	1345	1587	1853
$T_c - T_o$	$^{\circ}C$	12.04	18.07	21.73	27.27	31.32	34.38	41.19	47.31
T_c		40.34	46.27	49.43	49.67	59.02	55.88	68.79	69.31
T_o		28.30	28.20	27.70	22.40	27.70	21.50	27.60	22.00
U	Volt	3.25	4.00	4.50	5.09	5.50	5.70	6.39	7.08
I	Amper	2.50	3.05	3.39	3.85	4.21	4.34	4.88	5.25
$h_{deneyisel}$	W/m^2K	2.91	2.87	3.10	3.33	3.38	3.29	3.45	3.81
$h_{sayisal}$	W/m^2K	2.29	2.35	2.61	2.76	2.90	2.97	3.14	3.43



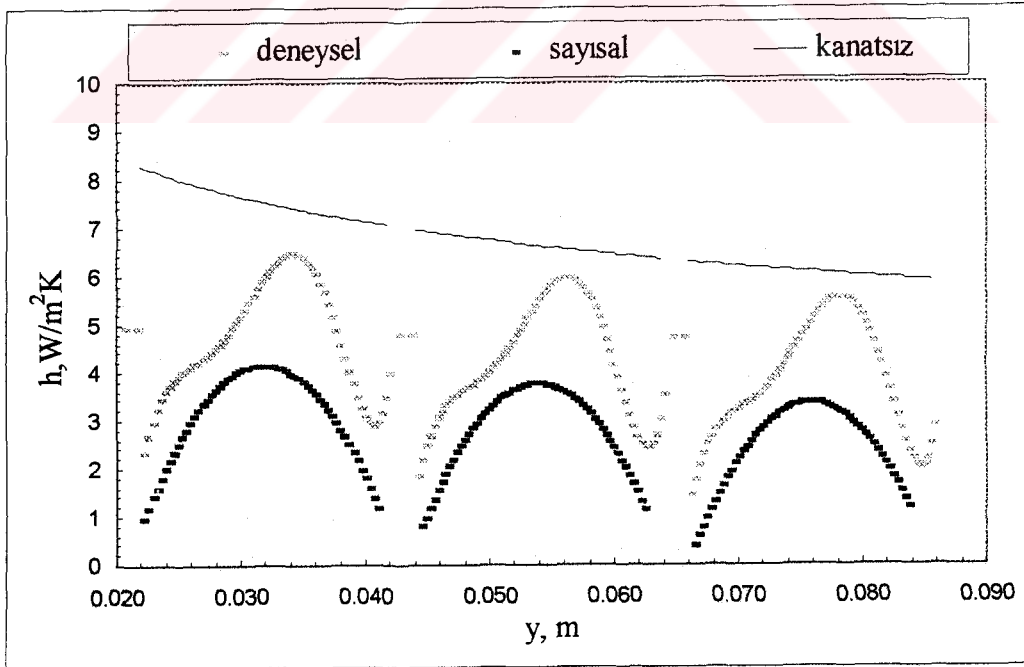
Şekil 5.5. Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi. (A=2)

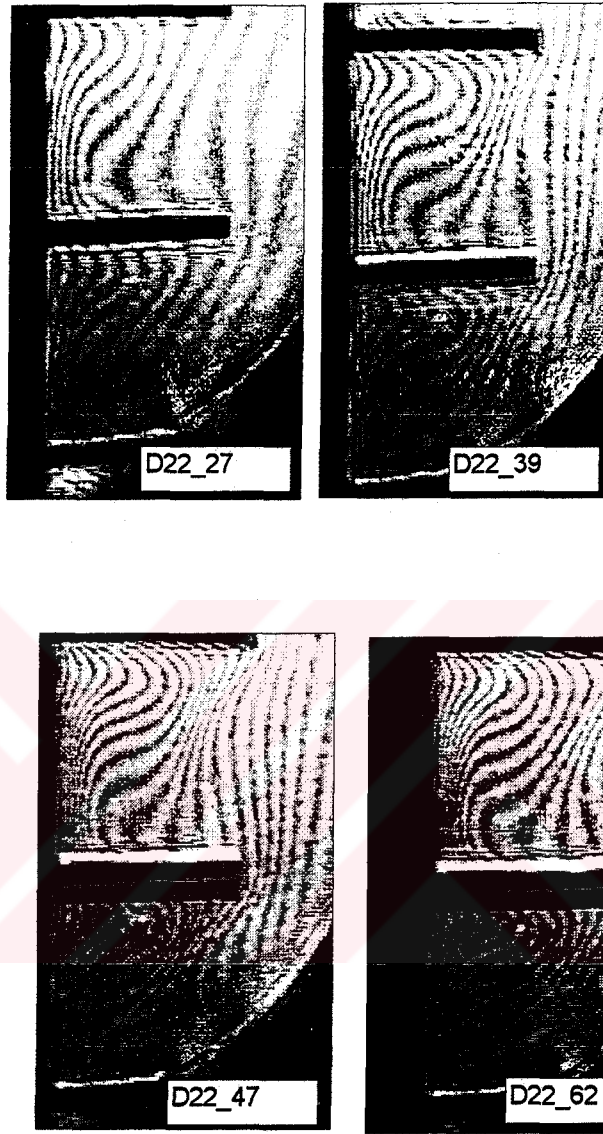


Şekil 5.6. D51 Deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler($A=2$).

Tablo 5.4. D22 deneylerinde ölçülen değerler ($A=1$).

Ölçülen büyüklük	Birim	Deneyler				
		D22_10	D22_27	D22_39	D22_47	D22_62
V_{c1}	μV	417	1074	1548	1821	2424
V_{c2}		417	1074	1548	1821	2424
V_{c3}		384	1052	1520	1790	2384
V_{c4}		377	1063	1511	1793	2393
V_{c5}		378	1070	1524	1807	2409
V_{c6}		378	1057	1530	1803	2402
$T_c - T_o$	$^{\circ}C$	10.11	27.48	39.49	46.60	62.09
T_c		26.21	46.08	57.99	65.10	80.79
T_o		16.10	18.60	18.50	18.50	18.70
U	Volt	2.82	4.98	5.90	6.96	8.13
I	Amper	2.06	3.68	4.30	5.01	5.85
$h_{deneyisel}$	W/m^2K	2.20	2.91	2.98	3.57	3.88
$h_{sayisal}$	W/m^2K	1.20	1.86	2.24	2.48	2.81

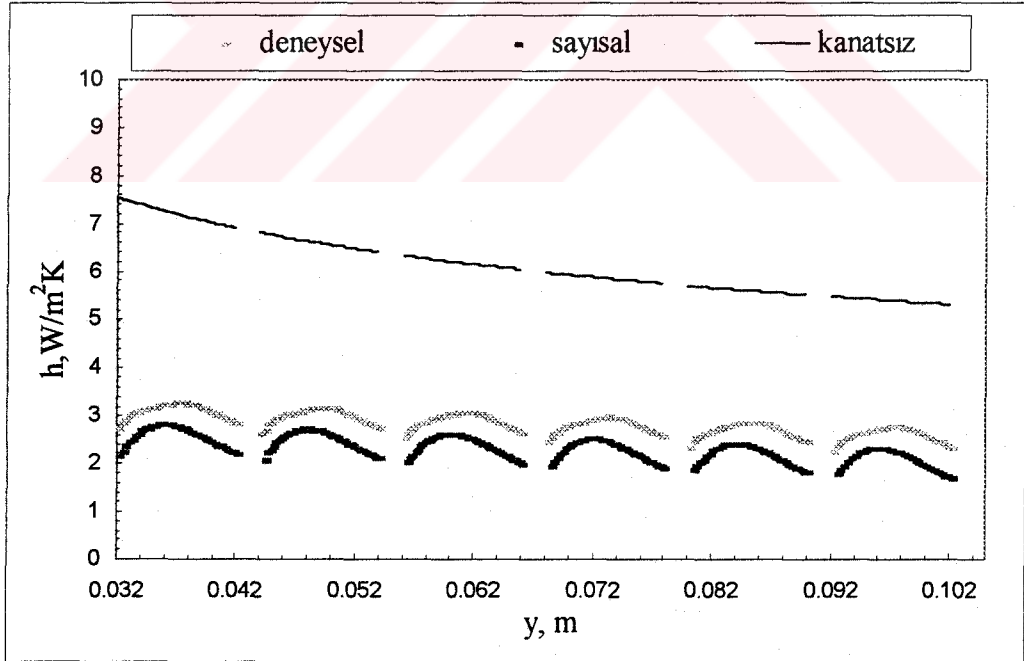
Şekil 5.7. Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi ($A=1$).

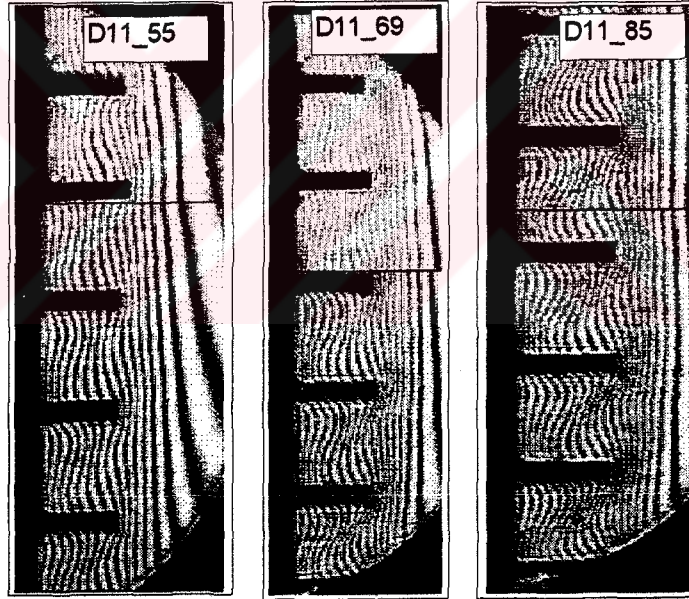
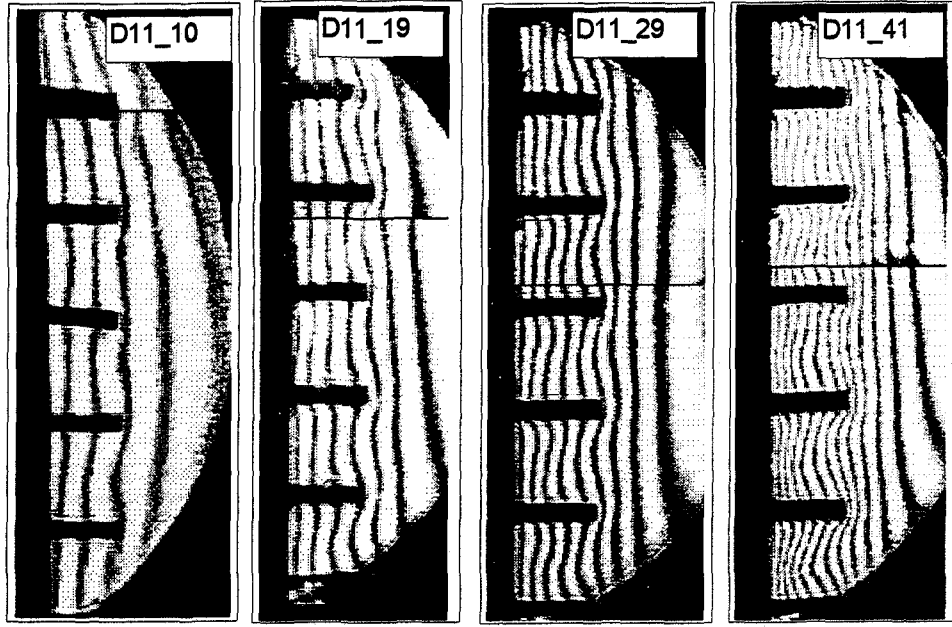


Şekil 5.8. D22 Deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=1$).

Tablo 5.5. D11 deneylerinde ölçülen değerler ($A=1$).

Ölçülen büyüklük	Birim	Deneyler						
		D11_10	D11_19	D11_29	D11_41	D11_55	D11_69	D11_85
V_{e1}	μV	392	736	1129	1604	2157	2718	3340
V_{e3}		369	724	1114	1592	2122	2649	3279
V_{e4}		365	716	1104	1578	2105	2626	3258
V_{e5}		371	723	1115	1599	2122	2663	3302
V_{e6}		370	723	1122	1611	2143	2692	3326
$T_c - T_o$	$^{\circ}C$	21.2	21.7	22.3	21.8	21.7	22.1	23.4
T_c		3.00	3.95	5.02	6.00	7.00	8.07	9.00
T_o		9.64	18.69	28.82	41.21	54.96	68.89	85.19
U	Volt	30.84	40.39	51.12	63.01	76.66	90.99	108.59
I	Amper	2.25	2.98	3.80	4.51	5.29	6.09	6.84
$h_{deneyse}$	W/m^2K	2.97	3.10	3.14	3.27	3.59	3.87	3.98
$h_{sayisal}$	W/m^2K	2.09	2.32	2.75	2.97	3.11	3.14	

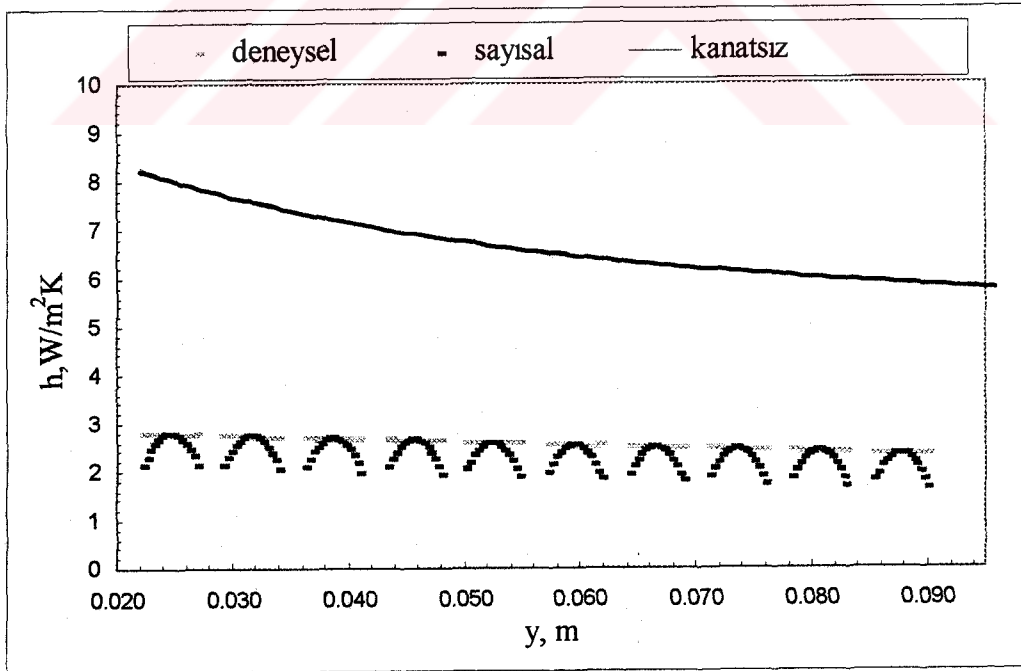
Şekil 5.9. Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi. ($A=1$)



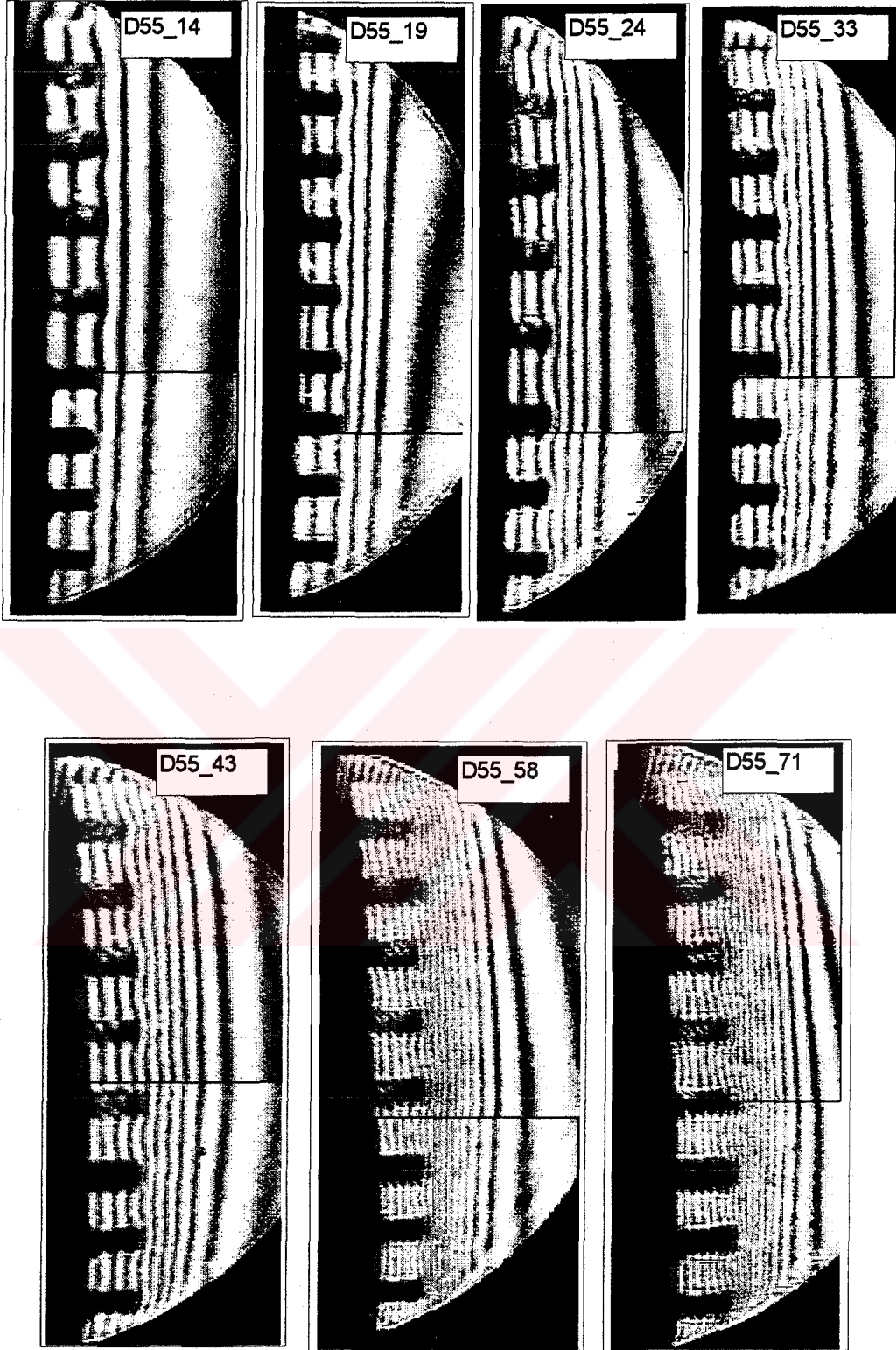
Şekil 5.10. D11 Deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler($A=1$).

Tablo 5.6. D55 deneylerinde ölçülen değerler (A=1).

Ölçülen büyüklük	Birim	Deneyler						
		D55_14	D55_19	D55_24	D55_33	D55_43	D55_58	D55_71
V_{e1}	μV	539	737	924	1293	1678	2297	2808
V_{e2}		527	718	908	1262	1659	2258	2769
V_{e3}		534	731	923	1377	1621	2284	2801
V_{e4}		523	712	896	1240	1638	2281	2712
V_{e5}		527	716	900	1246	1673	2208	2731
V_{e6}		541	733	916	1269	1649	2227	2784
$T_c - T_o$	$^{\circ}C$	22.3	22.9	22.4	21.5	22.1	22.6	22.4
T_c		13.72	18.70	23.51	33.06	42.66	58.30	71.42
T_o		36.02	41.60	45.91	54.56	64.76	80.90	93.82
U	Volt	3.55	4.20	4.82	5.75	6.80	8.02	9.00
I	Amper	2.70	3.20	3.65	4.35	5.05	6.08	6.81
$h_{deneysel}$	W/m^2K	3.42	3.61	3.97	3.98	4.49	4.66	4.77
$h_{sayisal}$	W/m^2K	2.56	2.89	3.01	3.03	3.59	3.73	3.82



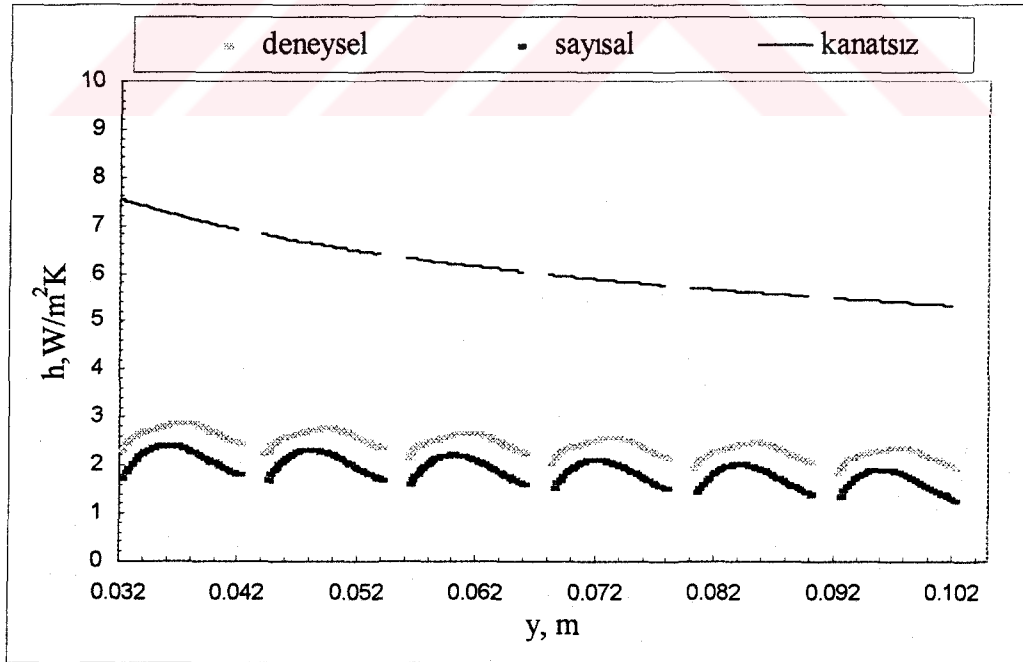
Şekil 5.11. Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi. (A=1)

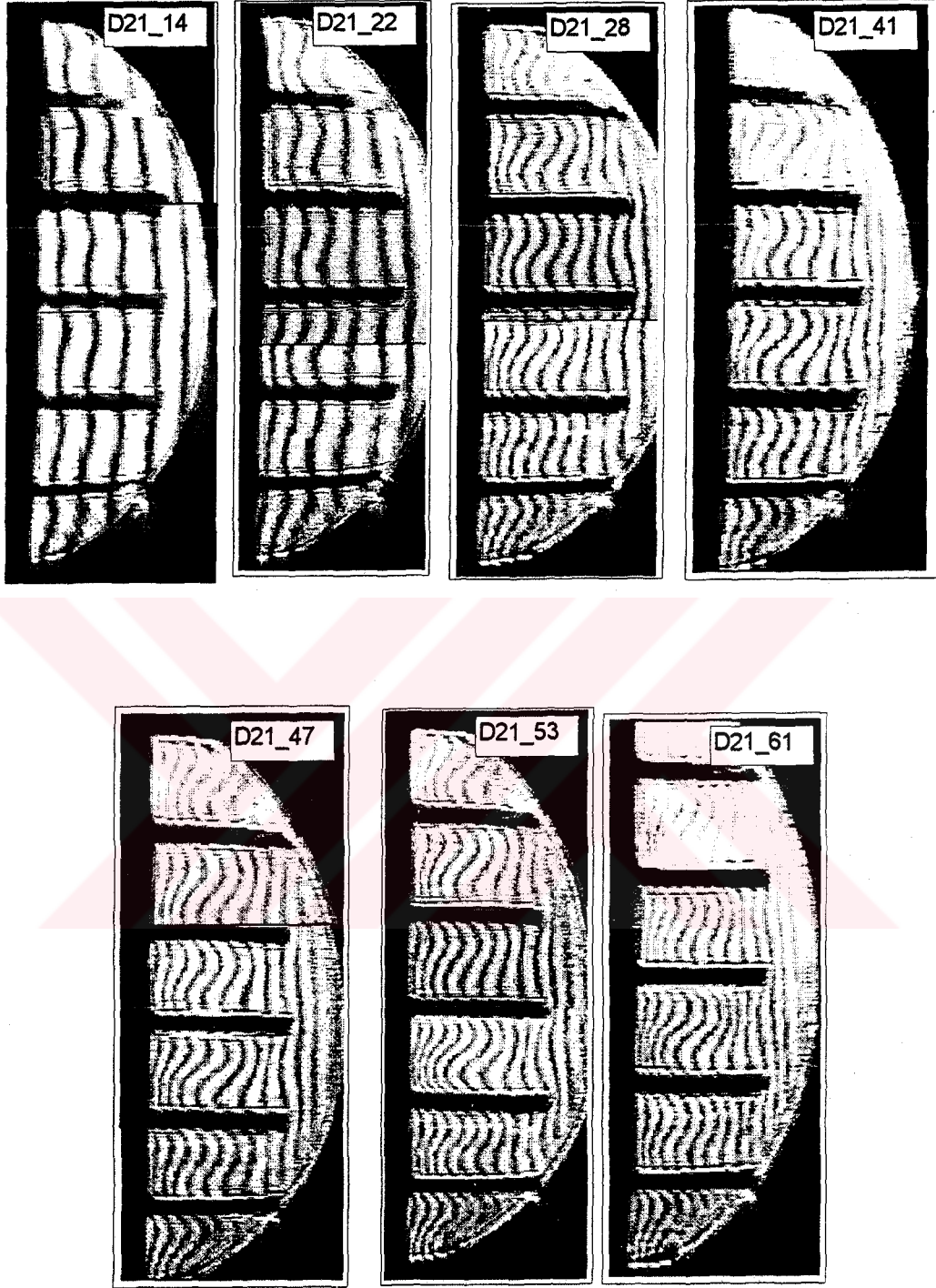


Şekil 5.12. D55 Deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler. ($A=1$)

Tablo 5.7. D21 deneylerinde ölçülen değerler ($A=0.5$).

Ölçülen büyüklük	Birim	Deneyler						
		D21_14	D21_22	D21_28	D21_41	D21_47	D21_53	D21_61
V_{c1}	μV	568	887	1126	1627	1868	2062	2393
V_{c2}		548	853	1126	1627	1868	2062	2393
V_{c3}		541	846	1104	1598	1836	2049	2384
V_{c4}		541	833	1094	1565	1809	2012	2360
V_{c5}		535	836	1098	1550	1775	2019	2361
V_{c6}		532	846	1096	1570	1792	2041	2383
$T_c - T_o$	$^{\circ}C$	24.50	24.20	26.00	26.40	26.50	25.70	27.00
T_c		14.04	21.94	28.58	41.02	47.09	52.67	61.39
T_o		38.54	46.14	54.58	67.42	73.59	78.37	88.39
U	Volt	3.25	4.04	4.63	5.60	6.11	6.55	7.00
I	Amper	2.45	3.06	3.51	4.22	4.62	4.90	5.31
$h_{deneyse}$	W/m^2K	2.22	2.38	2.64	2.74	3.18	3.34	3.46
$h_{sayisal}$	W/m^2K	1.75	1.86	2.10	2.26	2.50	2.57	

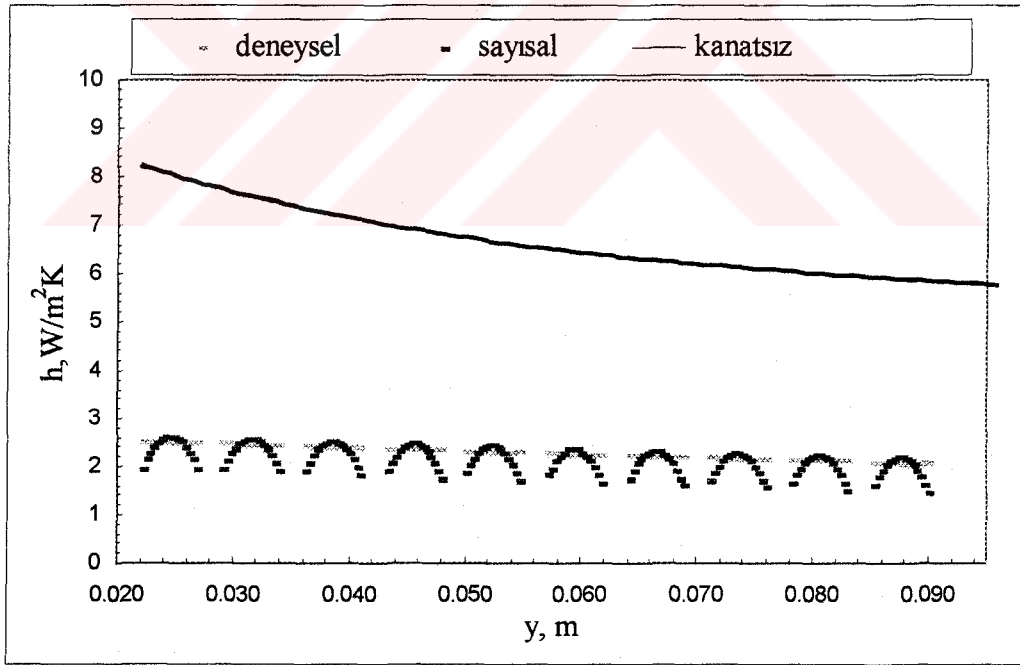
Şekil 5.13. Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi. ($A=0.5$)



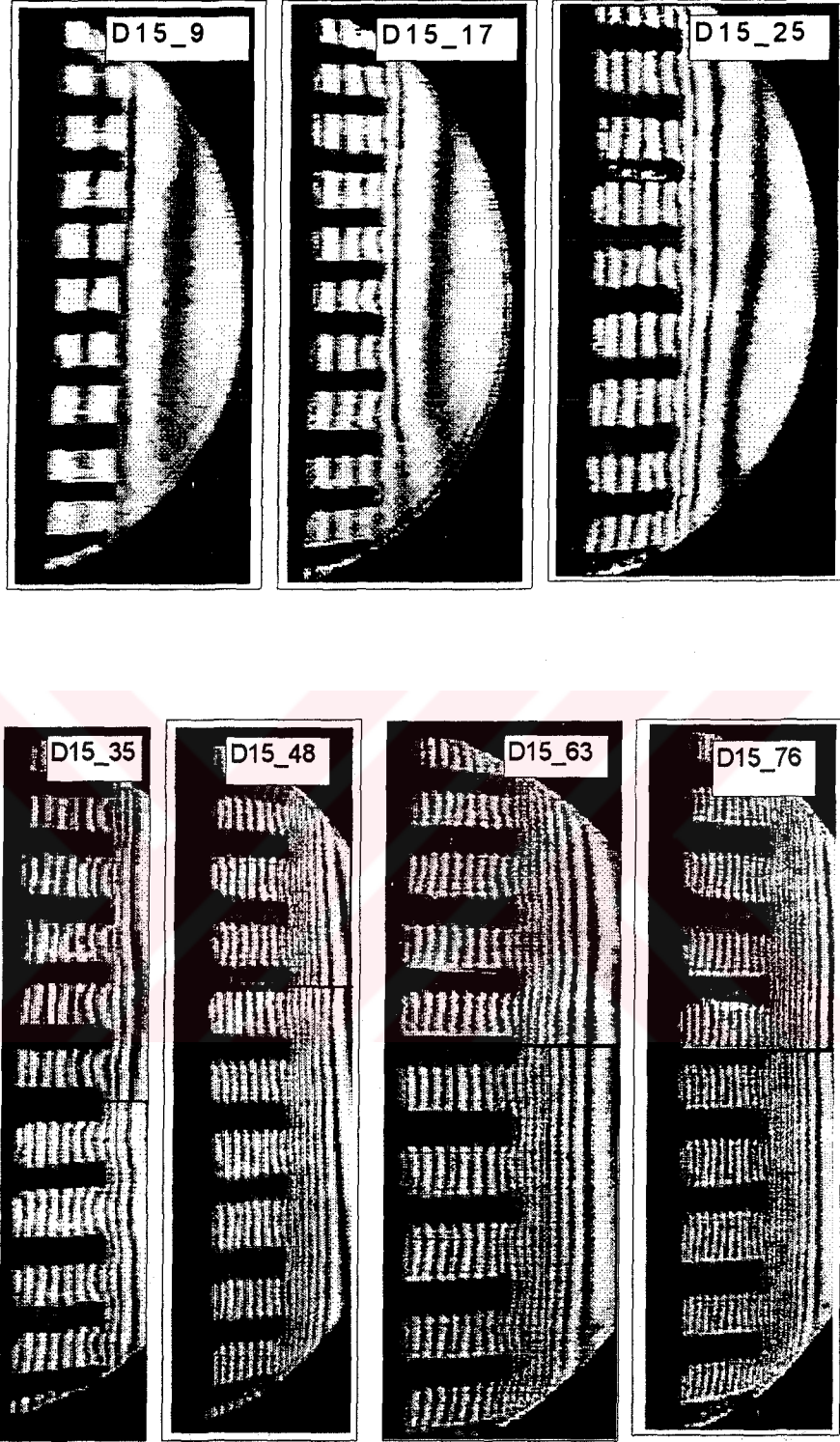
Şekil 5.14. D21 Deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=0.5$).

Tablo 5.8. D15 deneylerinde ölçülen değerler (A=0.5).

Ölçülen büyüklük	Birim	Deneyler						
		D15_9	D15_17	D15_25	D15_35	D15_48	D15_63	D15_76
V_{c1}	μV	249	452	674	931	1302	1647	1983
V_{c3}		384	731	1075	1473	2047	2667	3219
V_{c4}		372	705	1062	1445	1996	2610	3140
V_{c5}		381	717	1062	1452	2009	2627	3162
V_{c6}		383	718	1061	1454	2009	2632	3159
$T_c - T_o$	$^{\circ}C$	20.50	19.80	20.40	20.60	21.00	19.20	19.80
T_c		9.13	17.15	25.47	34.86	48.33	62.88	75.68
T_o		29.63	36.95	45.87	55.46	69.33	82.08	95.48
U	Volt	2.97	4.09	5.00	5.93	7.01	8.12	9.09
I	Amper	2.23	3.08	3.77	4.46	5.27	6.10	6.83
$h_{deney\text{sel}}$	W/m^2K	3.45	3.53	3.58	3.73	3.69	3.93	4.24
$h_{sayısal}$	W/m^2K	2.09	2.32	2.75	2.97	3.11	3.14	



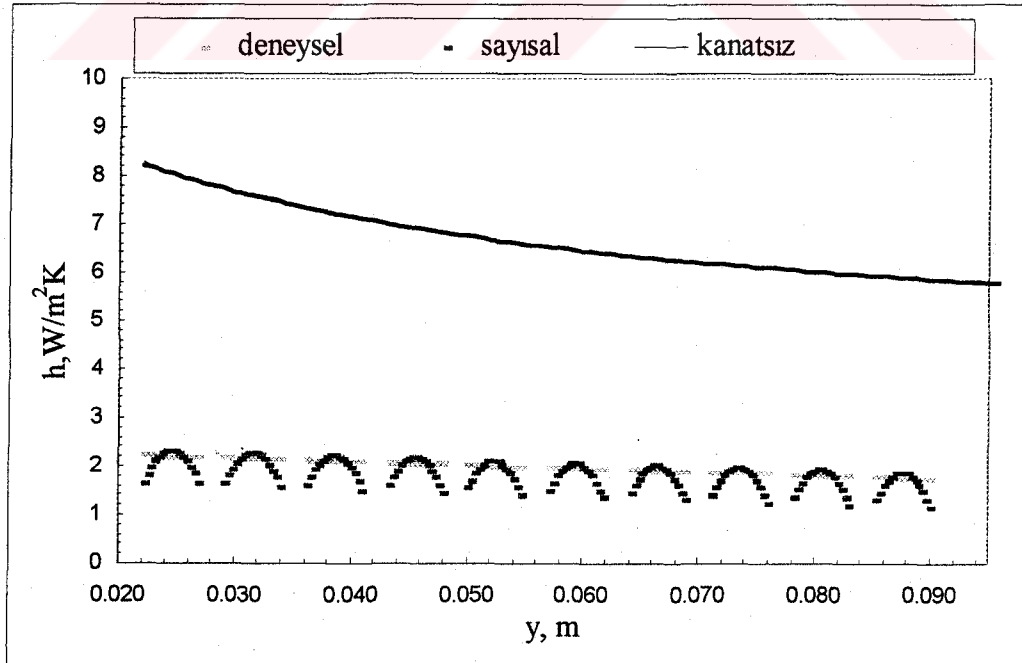
Şekil 5.15. Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi. (A=0.5)

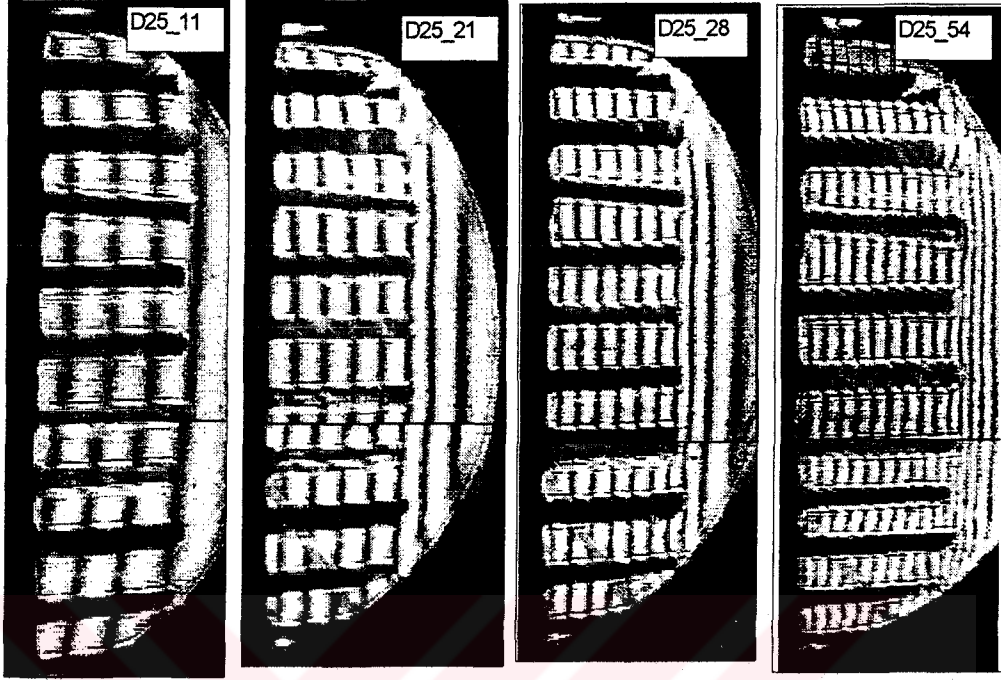


Şekil 5.16. D15 Deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=0.5$).

Tablo 5.9. D25 deneylerinde ölçülen değerler ($A=0.25$).

Ölçülen büyüklük	Birim	Deneyler					
		D25_11	D25_21	D25_28	D25_54	D25_62	D25_72
V_{e1}	μV	439	843	1121	2138	2431	2841
V_{e2}		439	843	1121	2138	2431	2841
V_{e3}		429	815	1060	2040	2361	2756
V_{e4}		415	817	1077	2039	2401	2762
V_{e5}		412	817	1085	2069	2403	2781
V_{e6}		412	817	1085	2069	2403	2781
$T_c - T_o$	$^{\circ}C$	28.30	27.70	28.20	27.50	27.50	28.50
T_c		10.95	21.30	28.17	53.73	62.06	72.09
T_o		39.25	49.00	56.37	81.23	89.56	100.59
U	Volt	3.00	4.10	4.80	6.80	7.15	8.00
I	Amper	2.28	3.10	3.73	5.20	5.35	5.93
$h_{deneysel}$	W/m^2K	2.09	2.47	2.59	2.78	2.90	3.20
$h_{sayisal}$	W/m^2K	1.88	2.10	2.33	2.37	2.53	2.88

Şekil 5.17. Cidardaki yerel ısı taşınım katsayısının değişimi. ($A=0.25$)



Şekil 5.18. D25 Deneylerinde video ile kaydedilen holografik görüntüler ($A=0.25$).

5.2. Sonuçların Değerlendirilmesi

Yapılan deneyler ve sayısal çözüm ile elde edilen sonuçlara göre bu tarzdaki kanatlar yüzeydeki ısı taşınım katsayısını, kanatsız hale kıyasla azaltmaktadır. Isı taşınım katsayısının yüzeydeki değişimini veren eğrilerden görülen bu sonuç, kanatların arasında kalan hacimlerde akış hızlarının küçük olması ile açıklanabilir.

Düşey levha yüzeyindeki yerel ısı taşınım katsayısı kanatlara yaklaştıkça küçülmekte ve iki kanat arasındaki düşey yüzeyin ortasında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu durum, kanat diplerinde hava hareketlerinin yavaş olduğu hava hücrelerinin oluşması ile açıklanabilir.

Kanat aralığının kanat yüksekliğine oranı olarak tanımlanan kenar oranı, A azaldıkça cidardaki ortalama ısı taşınım katsayısı da azalmaktadır. Kanat boyunun uzaması veya kanat aralığının kısalması, düşük hızlı hava hücrelerini büyütür ve ısı taşınımını kötüleştirir.

Genel olarak bakıldığında sayısal olarak elde edilen ısı taşınım katsayıları deneysel değerlere oranla daha düşüktür. Bu farklılık; sayısal çözümlerde ışıınım ile ısı geçişinin taşınım olayı üzerindeki etkisinin göz önüne alınmamasından kaynaklanmaktadır. Holografik interferometri yöntemi ile doğrudan yüzeydeki ısı taşınım katsayısı elde edilmektedir. Bu nedenle deneysel değerlerde ışıının doğrudan etkisi yoktur.

Verilen holografik görüntülerden anlaşılacağı gibi genel olarak eş sıcaklık eğrileri kanatlara yaklaşık olarak dik olmaktadır. Bu durum, düşük ısıl iletkenliği olan kanat kullanılmasının bir sonucudur. Bunun diğer bir anlamı ise kanatlar arasında olan taşınım ile ısı geçişinin az olmasıdır.

Deneylerden elde edilen ısı taşınım katsayıları kullanılarak

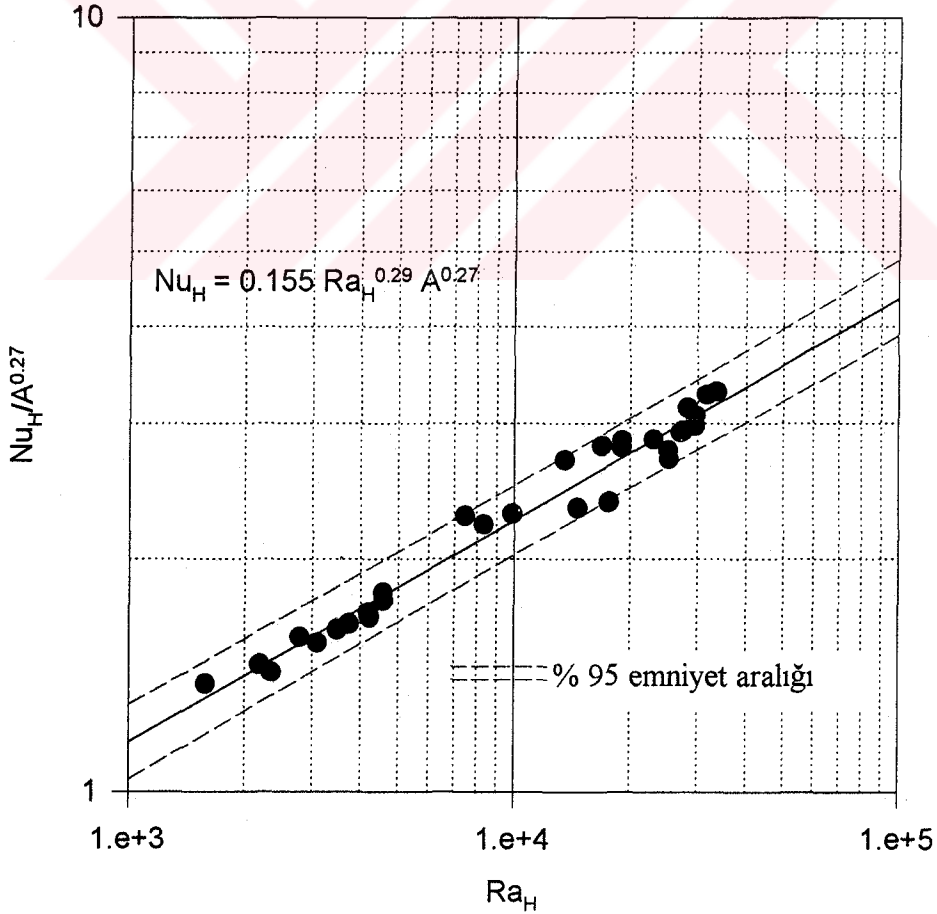
$$Nu_H = \frac{\bar{h} \cdot H}{k} \quad (5.2)$$

$$Ra_H = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot H^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (5.3)$$

değerleri hesaplanmış ve bu değerler ile kenar oranı A arasında, en küçük kareler yöntemi kullanılarak, $10^3 < Ra_H < 10^5$ ve $0.25 < A < 4$ aralıkları için

$$Nu_H = 0.155 \cdot Ra_H^{0.29} \cdot A^{0.27} \quad (5.4)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Şekil 5.19'da bu bağıntı ve deneysel veriler görülmektedir.



Şekil 5.19. $Ra_H - Nu_H$ değişimi.

5.3. Belirsizlik Hesabı

Holografik görüntülerin değerlendirilmesi ile elde edilen (5.2) bağıntısındaki belirsizlik, Holman [20] tarafından önerilmiş olan yönteme göre hesaplanmıştır. Bu yöntemde, x_i , $i=1,n$ bir deneyde ölçülen parametreler, w_i , $i=1,n$ ise, bu parametrelerin ölçülmesindeki mutlak belirsizlikler olmak üzere, bu parametrelere bağlı

$$y = y(x_1, x_2, x_3, \dots x_n) \quad (5.5)$$

büyükliğünün, ölçülen değerler kullanılarak yapılan hesabındaki mutlak belirsizlik,

$$w_y = \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

bağıntısıyla bulunur. Herhangi bir x değerindeki belirsizlik yüzdesi ise,

$$u = w/x \quad (\pm \%) \quad (5.7)$$

şeklinde hesaplanır.

Bu çalışmada yapılan deneylerde ölçülen değerler ve bu değerlerdeki belirsizlikler Tablo 5.10'da, hesaplanan değerlerdeki belirsizlikler ise Tablo 5.11'de verilmiştir. Bu tablolardan da görüldüğü gibi, yapılan deneysel çalışma ile elde edilen (5.2) bağıntısındaki belirsizlik % 10 mertebelerindedir. Bu değer de, benzeri çalışmalar ile kıyaslandığı zaman, sunulan deneysel çalışmada kullanılan deneysel yöntemin ve geliştirilmiş olan görüntü işleme programının oldukça güvenilir olduğu görülmektedir.

Tablo 5.10 Deneylerde ölçülen değerlerdeki belirsizlikler

Ölçülen değer	D	H	ΔT	β	ν	Pr	k	$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right _{x=0}$
u, $\pm$ %	2	2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	10

Tablo 5.11 Ölçülen değerler kullanılarak hesaplanan büyüklüklerdeki belirsizlikler

Hesaplanan değer	A	h	Ra _H	Nu _H
u, $\pm$ %	2	10	6	10

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan bu çalışmada, düşey yüzeylerde ısı taşınımına, ısı iletkenliği düşük olan yatay kanatların etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesine ek olarak, yeni bir sayısal görüntü işleme (dijital image processing) programı geliştirilmiştir. Video kameradan alınan holografik görüntüyü sayısal olarak değerlendirmek amacıyla geliştirilen bu program, bundan sonra gerçekleştirilecek benzeri çalışmalarda da kullanılabilecektir. Bu yönüyle sunulan çalışma, mevcut holografik interferometri tesisatı ile elde edilen görüntülerin değerlendirilmesinde karşılaşılan bazı zorlukları ortadan kaldırarak, deneylerde zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntem ile; olayların gerçek zamanlı (real time) analizlerinin yapılabilmesi, çok fazla miktarda deney verisi işlenebilmesi ve verilerin bilgisayarlarda saklanabilmesi mümkün olmaktadır.

Görüntünün bilgisayara aktarımı sırasında, bazen görüntü netliği kaybolmakta, bunun sonucu olarak elde edilen gri tonu dağılımı düzgün olmamaktadır. Geliştirilen programda en küçük kareler yöntemi uygulanarak doğru geçirme işlemi ile, bu düzgünsüzlük giderilmeye çalışılmakta, fakat bu sırada az da olsa bir hata oluşmaktadır. Gri tonu eğrisinde maksimum ve minimum noktaların bulunmasında, uydurulan doğru ile eğrinin kesim noktalarının orta noktası alınmakta, bu da konumun doğru olarak belirlenmesinde hata kaynağı oluşturmaktadır. Fakat bu türden hatalar, el ile yapılan değerlendirmelerde de mevcuttur.

Sayısal görüntü işleme sırasında görüntünün hassasiyeti yeterli mertebededir. Bir görüntü 512x256 nokta ile alınmaktadır. Bunun yeterli olmaması durumunda, kamera ile görüntünün tamamı yerine sadece inceleme yapılacak kısmı alınarak bilgisayara gönderilebilir. Yapılan deneylerde 0.025 mm/nokta hassasiyete varan ölçümler yapılmıştır. 16 gri tonlu ölçekde inceleme yapılması ise mevcut kartın özeliğinden kaynaklanmaktadır. Birçok araştırma için bu kapasite yeterli hassas

sonucu vermektedir. Daha net bir görüntü için daha çok sayıda nokta ve gri tonu yoğunluğu içeren özel amaçlı kart ve bilgisayar gerekmektedir.

Bu çalışmada incelenen düşük ısı iletkenliğe sahip yatay kanatlı düşey levhalar bazı endüstriyel uygulamalarda ortaya çıkmaktadır. Elektronik devrelerin tasarımı ve bazı güneş toplayıcıları buna örnek olarak verilebilir. Elektronik devrelerin, etkin bir şekilde soğutulması arzu edildiğine göre, bu tür kanatların bu alanda uygulanmaması gerekir. Hücreli güneş toplayıcılarında ise, tam tersi arzu edildiği için, bu tür kanatların etkin bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir.

İleride bu konuda yapılacak olan çalışmalarda, sunulan bu çalışma çerçevesinde incelenmemiş olan

- kanatların ısı iletim katsayısındaki değişimin ve
- kanat ve yüzey ışıyım özelliklerinin

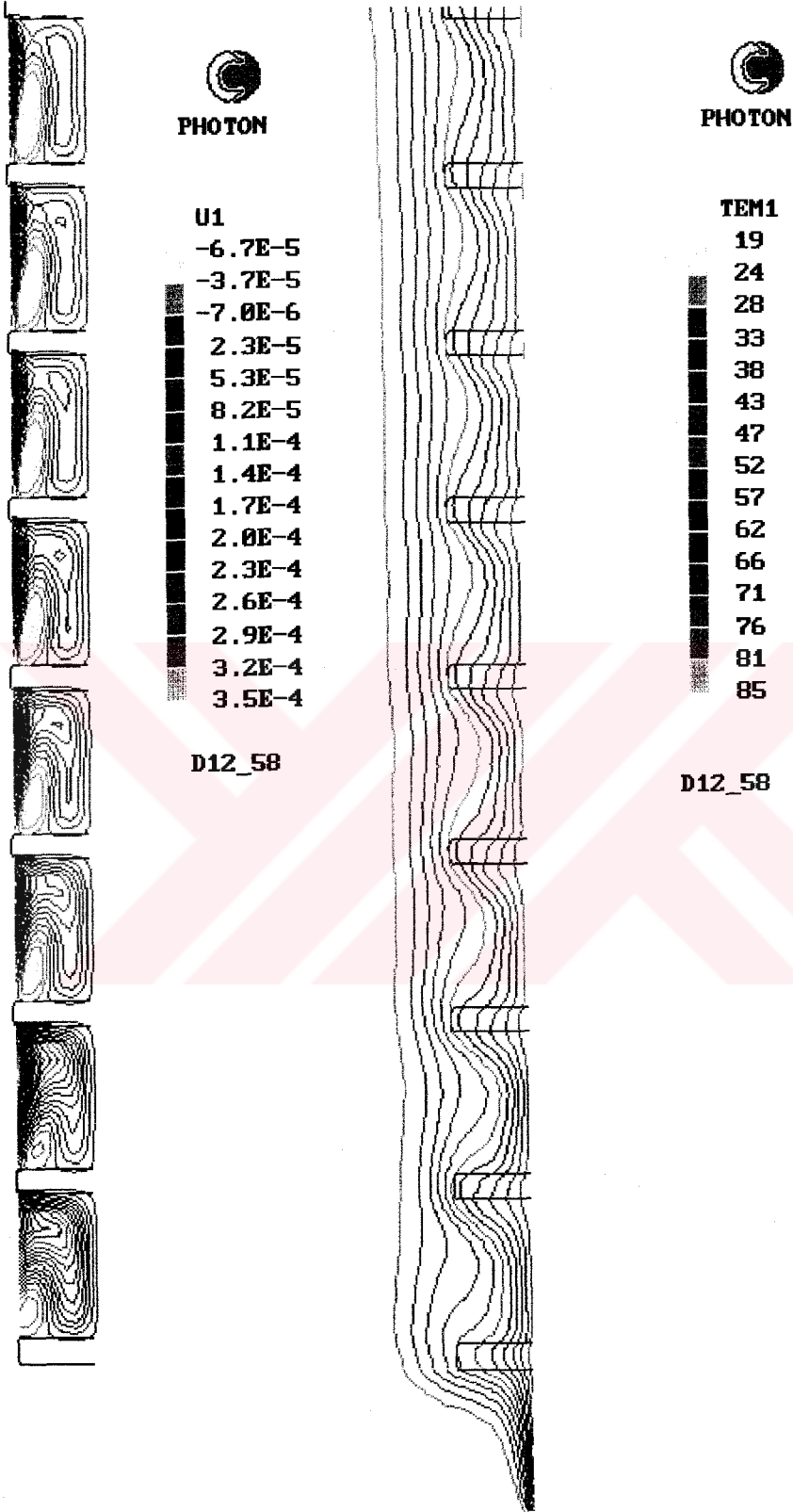
taşıyım üzerindeki etkilerinin incelenmesi yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **FUJII, T., FUJII, M., TAKEUCHI, M.,** Influence of Various Surface Roughness on the Natural Convection, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16, pp.629-640, (1973).
- [2] **ORTEGA, A., MOFFAT, R.J.,** Heat Transfer from an Array of Simulated Electronic Components: Experimental Results for Free Convection with and without a Shrouding Wall, 23rd ASME National Heat Transfer Conference , Denver, Colorado, pp. 5-15, 4-7 August (1985).
- [3] **KISHINAMI, K., HAKARU, S., IKUO, T.,** Experimental Study on Natural Convective Heat Transfer from a Vertical Wavy Surface Heated at Convex/Concave Elements, Scripta Technica, pp.15-31, (1989).
- [4] **MISUMI, T., KITAMURA, K.,** Natural Convection Heat Transfer from a Vertical Heated Plate with a Horizontal Partition Plate, Scripta Technica, pp.57-71, (1990).
- [5] **HUNG, Y.H., SHIAU, W.M.,** Local Steady-State Natural Convection Heat Transfer in Vertical Parallel Plates with a Two-Dimensional Rectangular Rib, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp.1279-1288, (1988).
- [6] **HUNG, Y.H., SHIAU, W.M.,** An Effective Model for Measuring Transient Natural Convective Heat Flux in Vertical Parallel Plates with a Rectangular Rib, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, pp.863-871, (1989).
- [7] **BHAVNANI, S.H., BERGLES, A.E.,** Effect OF Surface Geometry and Orientation on Laminar Natural Convection Heat Transfer from a VerticalFlat Plate with Transverse Roughness Elements, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, pp.965-981, (1990).
- [8] **CHAN, Y.L., TIEN, C.L.,** A Numerical Study of Two-Dimensional Natural Convection in Square Open Cavities, Numerical Heat Transfer, Vol. 8, pp.65-80, (1985).

- [9] **DAVIDSON, L.**, Calculation of the Turbulent Buoyancy-Driven Flow in a Rectangular Cavity Using an Efficient Solver and Two Different Low Reynolds Number $k-\varepsilon$ Turbulence Models, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 18, pp.129-147, (1990).
- [10] **PHOENICS SATELLITE Version 2.2.1**, Concentration Heat and Momentum Ltd., London, (1994).
- [11] **PATANKAR, S.V.**, Numerical Heat Transfer And Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, (1980).
- [12] **GABOR, D.**, Microscopy by Reconstructed Wave-Fronts, Proc. Roy. Soc., London, A 197, p.454, (1949).
- [13] **GENCELİ, O.F.**, Optik Ölçme Metodları, İTÜ Kütüphanesi, Sayı 1380, (1989).
- [14] **AKÖZ, Y., GENCELİ, O.F.**, Holografi ve Mühendislikte Uygulamaları, İ.T.Ü.D, C 34, s.4, (1976).
- [15] **HAUF, W., GRIGULL, U.**, Optical Methods in Heat Transfer, Advances in Heat Transfer, Vol. 6, pp. 133-366, New York, (1970).
- [16] **HOOGENDORN, C.J.**, Experimental Methods in Natural Convection, Natural Convection, ed. KAKAÇ, S., pp. 675-695, (1992).
- [17] **MAYINGER, F., PANKNIN, W.**, Holography in Heat and Mass Transfer, Int. Conf. Heat Transfer, V.6, pp.29-43 , (1974)
Türkçesi: **GENCELİ, O.F.**, Isı ve Kütle Geçişinde Holografi, İTÜ Kütüphanesi, No. 1028, (1975).
- [18] **TURBO C Refernce Guide Version 2.0**, Borland International, (1988).
- [19] **McADAMS, W.H.**, Heat Transmission, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, (1954).
- [20] **HOLMAN, J.P.**, Experimental Methods for Engineers, 5th ed., McGraw-Hill, New York, (1989).

Ek -A Sayısal çözümden elde edilen akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri.





PHOTON

U1

-6.1E-5

-3.3E-5

-5.3E-6

2.3E-5

5.1E-5

7.9E-5

1.1E-4

1.3E-4

1.6E-4

1.9E-4

2.2E-4

2.5E-4

2.8E-4

3.0E-4

3.3E-4



D52_55



PHOTON

TEM1

19

23

28

32

37

41

46

50

55

59

64

68

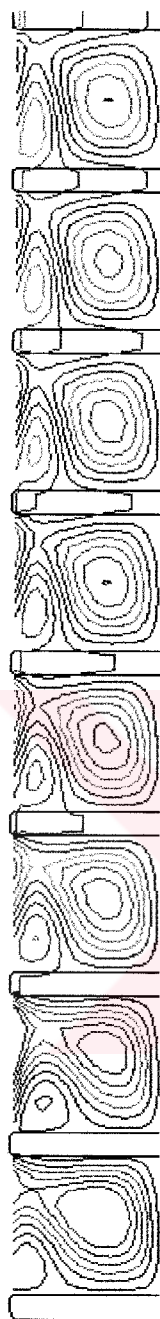
73

77

82

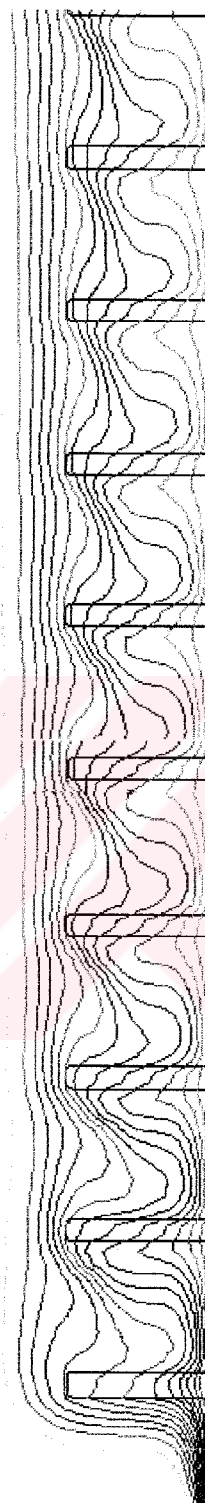


D52_55



U1
-3.0E-4
-2.7E-4
-2.3E-4
-2.0E-4
-1.7E-4
-1.4E-4
-1.0E-4
-7.0E-5
-3.7E-5
-4.0E-6
2.9E-5
6.2E-5
9.4E-5
1.3E-4
1.6E-4

D22_47



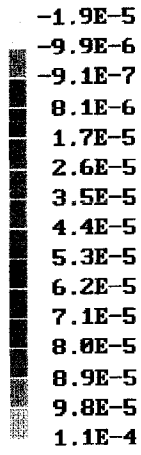
TEM1
19
23
27
32
36
40
44
49
53
57
61
66
70
74
78

D22_47



PHOTON

U1

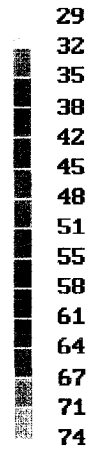


D51_55



PHOTON

TEM1

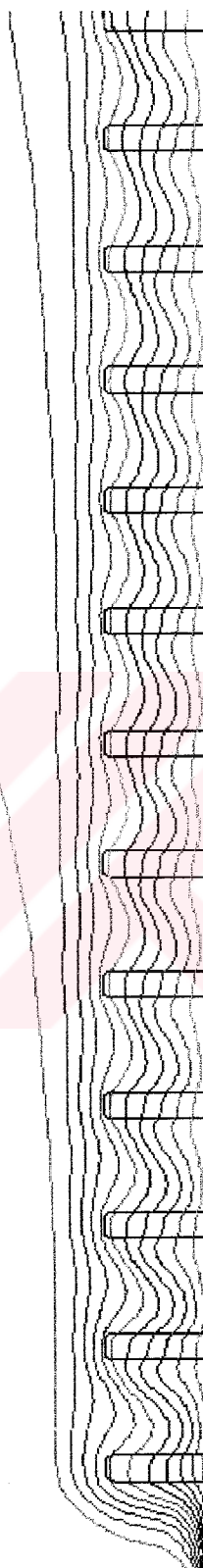


D51_55



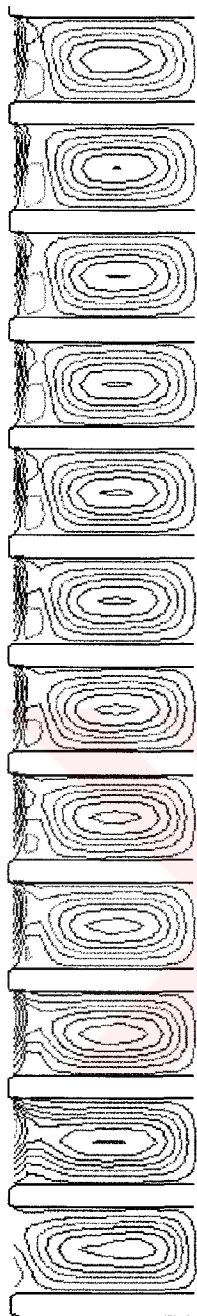
U1
-1.7E-5
-8.1E-6
8.4E-7
9.8E-6
1.9E-5
2.8E-5
3.7E-5
4.6E-5
5.5E-5
6.4E-5
7.3E-5
8.2E-5
9.1E-5
9.9E-5
1.1E-4

D11_55



TEM1
29
33
36
40
44
48
52
55
59
63
67
71
74
78
82

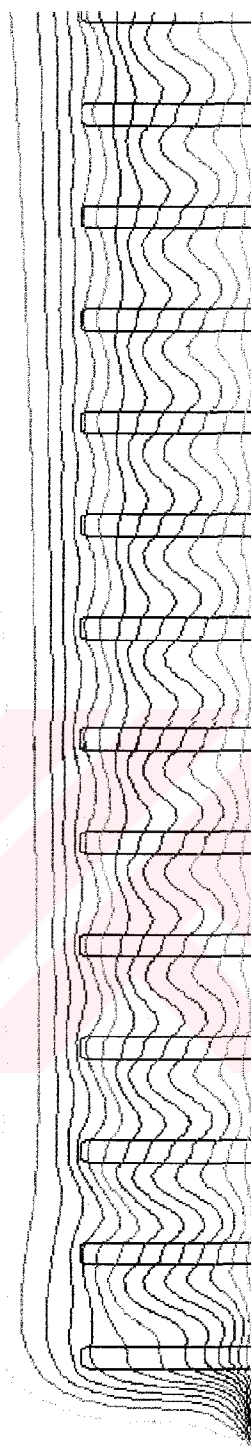
D11_55



U1

-2.1E-5
-1.3E-5
-4.5E-6
3.7E-6
1.2E-5
2.0E-5
2.0E-5
3.7E-5
4.5E-5
5.3E-5
6.1E-5
6.9E-5
7.7E-5
8.6E-5
9.4E-5

D21_53



TEM1

29
33
36
40
44
48
52
56
59
63
67
71
75
79
82

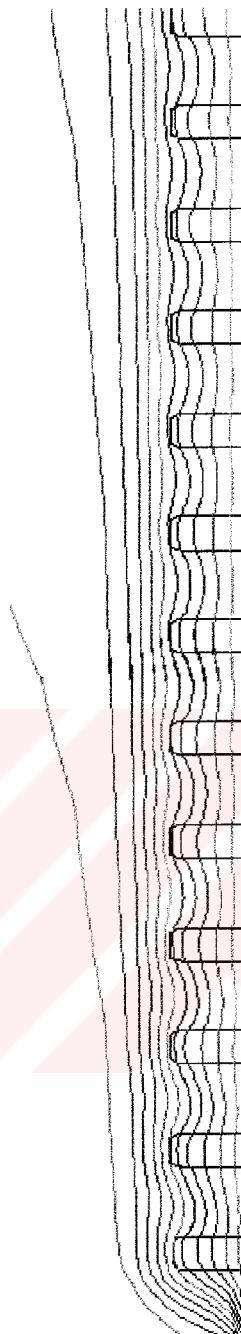
D21_53




PHOTON

U1
-6.6E-6
-3.7E-6
-8.0E-7
2.1E-6
5.0E-6
7.9E-6
1.1E-5
1.4E-5
1.7E-5
1.9E-5
2.2E-5
2.5E-5
2.8E-5
3.1E-5
3.4E-5

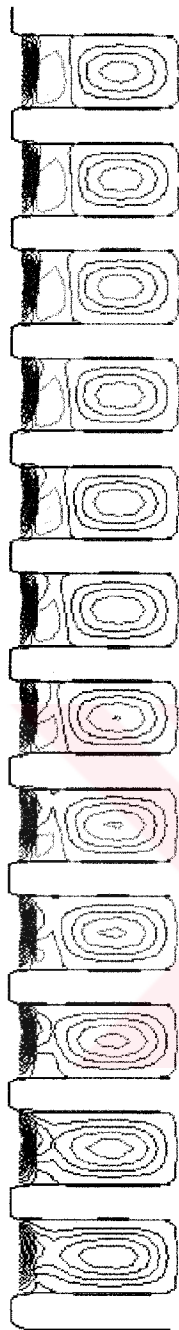
D55_58




PHOTON

TEM1
29
33
37
41
45
49
53
57
61
65
69
73
77
81
85

D55_58

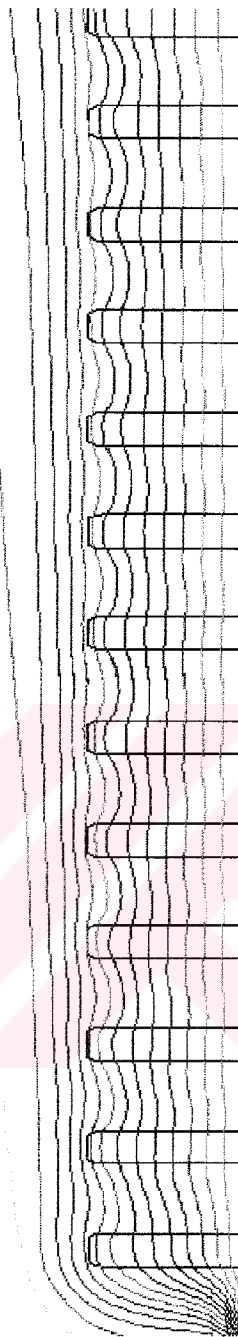



PHOTON

U1

-5.6E-6
-3.3E-6
-1.1E-6
1.1E-6
3.3E-6
5.6E-6
7.8E-6
1.0E-5
1.2E-5
1.5E-5
1.7E-5
1.9E-5
2.1E-5
2.3E-5
2.6E-5

D15_48

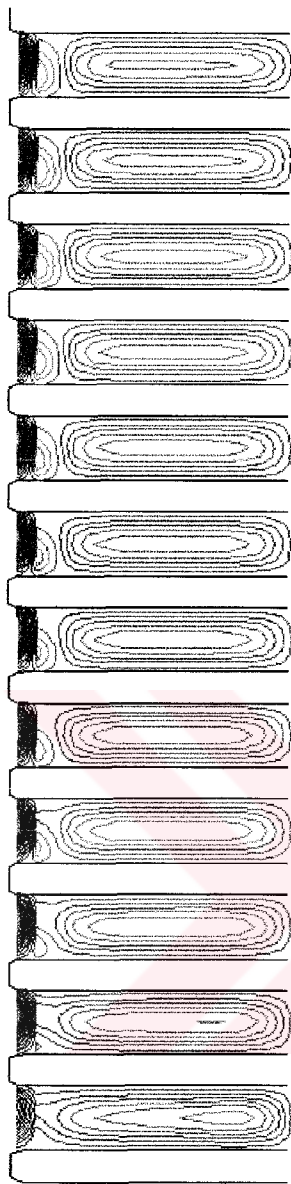



PHOTON

TEM1

29
32
35
39
42
45
49
52
55
59
62
65
69
72
75

D15_48

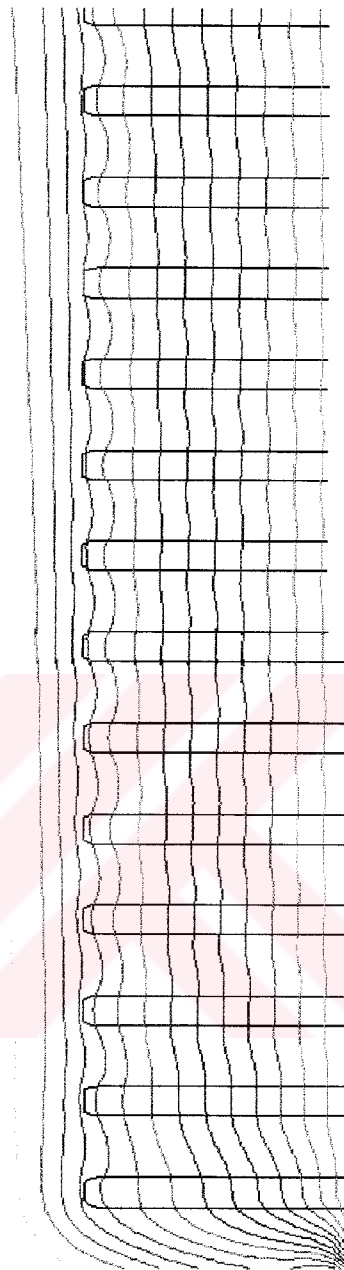


PHOTON

U1

-4.8E-6
-3.8E-6
-1.2E-6
6.4E-7
2.4E-6
4.2E-6
6.0E-6
7.8E-6
9.7E-6
1.1E-5
1.3E-5
1.5E-5
1.7E-5
1.9E-5
2.0E-5

D25_54



PHOTON

TEM1

29
33
36
40
44
48
52
56
60
64
68
71
75
79
83

D25_54

ÖZGEÇMİŞ

Nedim Türkmen, 1965 yılında Giresun'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Giresun'da tamamladıktan sonra 1984 yılında İ.T.Ü. Makina Fakültesine girdi. 1988 yılında burandan birincilikle mezun olduktan sonra aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü'nde bir yıl İngilizce hazırlık okuyarak yüksek lisans programına başladı. Yüksek lisansını Makina Anabilim Dalı Enerji Programında 1991 yılında tamamlayarak aynı programda doktora çalışmasına başlamıştır.

Nedim Türkmen, 1989 yılında İ.T.Ü. Makina Fakültesi Isı Tekniği Biriminde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamış olup halen bu görevini sürdürmektedir.