

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. MATEMATİKSEL YÖNTEM	6
2.1. TEORİK ANALİZ.....	6
2.1.1. Üç Boyutlu Temel Hareket Denklemleri	7
2.1.2. İki Boyutlu Temel Hareket Denklemleri.....	9
2.2. SINIR ŞARTLARI	10
2.3. DENKLEMLERİN BOYUTSUZLAŞTIRILMASI VE BOYUTSUZ PARAMETRELER.....	11
3. NÜMERİK ÇALIŞMANIN MATERYAL VE YÖNTEMİ	14
3.1. AKIŞKANIN ÖZELLİKLERİ	14
3.2. METERYAL	15
3.3. YÖNTEM.....	16
4. DENEYSEL ÇALIŞMANIN MATERYAL VE YÖNTEMİ	18
4.1. AKIŞKANIN ÖZELLİKLERİ	18
4.2. METERYAL	18
4.3. YÖNTEM.....	22
5. SONUÇ	24
5.1. NÜMERİK ÇALIŞMA	24
5.1.1. Nümerik Modelin 3-D Simülasyonu	24
5.1.2. Akış İpçikleri (Streamlines) ve Hız Vektörler	26
5.1.3. Yüzey Sıcaklıkları	31

5.2. DENEYSEL ÇALIŞMA	32
5.3. YÜZEY SICAKLIKLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	33
KAYNAKLAR	38
EK-1: NÜMERİK ÇALIŞMANIN VERİLERİ.....	40
EK-2 : DENEYSEL ÇALIŞMANIN VERİLERİ.....	45
EK-3 : ÖZGEÇMİŞ	50

ÖZET

Bu çalışmada, yüzen bölge konfigürasyonu kullanılarak akışkan serbest yüzeyinin düz olduğu durumda üstten ısıtma yapılarak yüksek Prandtl sayısına sahip hidrokarbon (H-C) grubu akışkan kolonundaki yüzey gerilimli akış hareketi nümerik olarak incelenmiştir. Akışkan kolonuna uygulanan farklı sıcaklıklar yüzey gerilim hareketinin değişmesine sebep olmuştur. Rejim hali yüzey gerilim hareketinin akışkanın serbest yüzeyi boyunca farklı sıcaklık değerlerindeki yüzeysel sıcaklık profilleri ve hız vektörleri olarak incelenmiştir.

Hız vektörleri ve sıcaklık alanları, gelişmiş SIMPLE algoritması kullanılarak FORTRAN programlama dili yardımı ile çözülmüştür. Bu çözümde uygun sayıda gride sahip Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method- FEM) kullanılmıştır. Akışkanın üst ve alt bölgelerinde bakır silindire temas noktalarındaki nümerik sıcaklık hassasiyeti 0.01°C değerlerle elde edilen sonuçların sıcaklık ve hız alanları cinsinden adım adım program koşturulmuştur. Elde edilen sonuçlardan hız alanları, sıcaklık alanları ve akım çizgileri hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmada deney akışkanı olarak 5cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı kullanılmıştır. Kararlı akış halindeyken dikey konumdaki silindirik akışkanın yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Akış hareketini gözlemlemek için laser ışığı ve mikroskoptan yararlanılmıştır. Deneyler sabit ortam sıcaklığında ($T_R=22^{\circ}\text{C}$ 'de) ve ortamın titreşimsiz olduğu anlarda dikey olarak yukarıdan aşağıya kadar ki aralık boyunca sıcaklık değerleri elde edilmiştir.

Nümerik çalışmalarda hesaplanan değerler ve buna bağlı olarak çizilen grafikler, deneysel çalışmalarda elde edilen değerler ve bunların grafikleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticeleri sonuç kısmında açık şekilde ifade edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Yüzey gerilimli konveksiyon, rejim hali yüzey gerilimli konveksiyon, yüzey sıcaklıkları

ABSTRACT

In this study, thermocapillary flow in liquid bridge of high Prandtl number Hydrocarbon(H-C) group fluid is investigated numerically by using floating-zone configuration when the liquid free surface is flat. Different temperatures on the liquid column is caused changing of surface tension movement. Surface temperatures' profiles and velocity vectors are investigated as being applied different temperatures over the liquid free surface of steady-state surface tension.

Velocity vectors and temperature fields are computed by FORTRAN programming language with using advanced SIMPLE algorithms. In this computation Finite Element Method(FEM) which have suitable grid number is used. Thermocapillary flow in this configuration is generated by the temperature gradient created across the free surface due to the difference in temperature of the two rods. Both the heater (upper rod) and the cooler(bottom rod) are maintained at constant temperatures. The program is run step by step with numerical temperature sensitivity of 0.01°C . Velocity fields, temperature fields and streamlines are calculated from the found results.

In the experiment, the silicon oil which has 5cst kinematic viscosity is used as an experimental fluid. Vertical cylindrical fluid's surface temperatures are measured during the steady-state convection. A laser beam and a microscope are used to observe fluid flow. Experiments are done at constant room temperature($T_R=22^{\circ}\text{C}$) and vibration-free environment. Temperature values are measured from the top to the bottom.

The graphics drawn by using calculated numerical values and the graphics drawn by using experimental results are compared. The results of comparison is clearly explained in the result section.

KEY WORDS: Thermocapillary convection, Marangoni convection, surface temperatures

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans programında danışmanım olan, hem bilimsel çalışma konusunda hem de eğitimlik konusunda beni sürekli yönlendiren, teşvik eden ve bana yepyeni bir ufuk veren sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Ramazan SELVER'e şükranlarımı sunar, içtenlikle teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım sırasında her türlü yardım ve desteği benden esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Remzi VAROL hocama, teknik imkanlarından yararlanma izni veren Süleyman Demirel Üniversitesi Bucak Hikmet Tolunay Meslek Yüksekokulu'na ve ilgi ve yardımlarında dolayı Isparta Anadolu Teknik Lisesi Bilgisayar Bölümündeki öğretmen arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ve iyi bir eğitim görebilmem için çaba harcayan ve bana desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen MAZLUM ailesinin tüm fertlerine sonsuz sevgilerimi sunar, sonsuz teşekkür ederim.

SİMGELER DİZİNİ

ρ	Yoğunluk, [kg/m ³]
ν	Akışkanın kinematik viskozitesi, [m ² /s]
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi, $\mu = \rho \nu$
k	Kondüksiyon ısı iletim katsayısı, [W/mK]
h	Konveksiyon ısı iletim katsayısı, [W/mK]
α	Termal difüzyon katsayısı, $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$, [m ² /s]
σ	Akışkan yüzey gerilim katsayısı, [N/mK]
P	Yüzey basıncı, [N/m ²]
g	Yerçekimi ivmesi, [m/s ²]
D	Silindirik akışkan çapı, [m]
H	Akışkanın dikey yüksekliği, [m]
T	Sıcaklık, [K]
T_H	Akışkana temas eden ısıtıcı silindir sıcaklığı, [K]
T_C	Akışkana temas eden soğutucu silindir sıcaklığı, [K]
ΔT	Akışkanın sıcaklık farkı, $\Delta T = T_H - T_C$, [K]
ΔT_{num}	Nümerik çalışmalardaki akışkanın sıcaklık farkı, $\Delta T_{num} = T_H - T_C$, [K]
ΔT_{den}	Deneysel çalışmalardaki akışkanın sıcaklık farkı, $\Delta T_{den} = T_H - T_C$, [K]
T_M	Akışkana ortalama sıcaklığı, $T_M = \frac{1}{2}(T_H + T_C)$, [K]
Ar	Boyutsal oran, $Ar = \frac{H}{D}$
Pr	Prandtl sayısı, $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$
β	Isısal genleşme katsayısı, $\beta = \frac{1}{T}$, [1/K]
Gr	Grashof sayısı, $Gr = \frac{g\beta(\Delta T)H^3}{\nu^2}$
Y	Boyutsuz akışkan yüksekliği, $Y = \frac{y}{H}$

y	Akışkanın eksenel yöndeki uzunluk birimi, [m]
Re_{σ}	Yüzey gerilim Reynolds sayısı, $Re_{\sigma} = \frac{ \sigma_T (\Delta T_{kr})H}{\nu\mu}$
Ma	Marangoni sayısı, $Ma = Pr Re_{\sigma}$
θ	Boyutsuz sıcaklık, $\theta = \frac{T - T_C}{T_H - T_C}$
r	Silindirik koordinatlardaki yarıçap büyüklüğü, [m]
θ	Silindirik koordinatlardaki radyal büyüklük, [m]
z	Silindirik koordinatlardaki eksenel büyüklük, [m]
\underline{r}	Radyal yöndeki boyutsuz büyüklük, [m]
R	Silindirin Radyal yöndeki yarıçapı, [m]
R_0	Radyal yöndeki referans yarıçap, [m]
\underline{z}	Eksenel yöndeki boyutsuz büyüklük, [m]
Z	Eksenel yöndeki referans büyüklük, [m]
V_R	Radyal yöndeki hız büyüklüğü, [m/s]
V_{R_0}	Radyal yöndeki hızın referans değeri, [m/s]
\underline{u}	Radyal yöndeki boyutsuz hız değeri, [m/s]
V_Z	Eksenel yöndeki hız büyüklüğü, [m/s]
V_{Z_0}	Eksenel yöndeki hızın referans değeri, [m/s]
\underline{w}	Eksenel yöndeki boyutsuz hız değeri, [m/s]
g_R	r-yöndeki yerçekimi ivmesinin büyüklüğü, [m/s]
g_{θ}	θ -yöndeki yerçekimi ivmesinin büyüklüğü, [m/s]
g_Z	z-yöndeki yerçekimi ivmesinin büyüklüğü, [m/s]

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yüzen bölge konfigürasyonunda eksensel simetrik akışkan kolonunun koordinat sistemi.....	6
Şekil 4.2. Deney Düzeneği.....	19
Şekil 5.1.1. Sıcaklık farkı $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ 'de 3-D sıcaklık dağılımı ve hız vektörleri grafiği.....	25
Şekil 5.1.2.a. Akışkanın hareketindeki hız vektörlerinin $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ 'de 2-D olarak görünüşü.....	27
Şekil 5.1.2.b. Akışkanın hareketindeki hız vektörlerinin $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ 'de 2-D olarak görünüşü.....	28
Şekil 5.1.2.c. Akışkanın hareketindeki hız vektörlerinin $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ 'de 2-D olarak görünüşü.....	29
Şekil 5.1.2.d. Akışkanın hareketindeki hız vektörlerinin $\Delta T = 25^{\circ}\text{C}$ 'de 2-D olarak görünüşü.....	30
Şekil 5.1.3. Nümerik çalışma sonucunda farklı sıcaklık farklarındaki akışkanın yüzey sıcaklık profilinin grafiği	31
Şekil 5.2. Deneysel çalışma sonucunda farklı sıcaklık farklarındaki akışkanın yüzey sıcaklık profilinin grafiği	32
Şekil 5.3.1. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	33
Şekil 5.3.2. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	34
Şekil 5.3.3. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	35
Şekil 5.3.4. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	35
Şekil 5.3.5. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 25^{\circ}\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	36
Şekil 5.3.6. Nümerik ve Deneysel çalışma sonucunda farklı sıcaklık farklarındaki akışkanın yüzey sıcaklık profilinin grafiği	37

ÇİZELGELER DİZİNİ**Sayfa**

Tablo 1. Viskozitesi 5 cSt olan silikon yağının 25 °C deki fiziksel özellikleri..... 14

1. GİRİŞ

Son yıllarda yarı iletken malzemelerin temeli olan kristallerin kalitesinin artırılması için bir çok ileri teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır. Bu tekniklerden birisi; yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu tekniği, diğeri ise; açık kap (open-boat) tekniğidir. Hem nümerik hemde deneysel çalışmalarımızda bu tekniklerden yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonunda yarım bölge yüzen sistem konfigürasyonu (half-zone) kullanılmıştır. Bu çalışmalarda en önemli nokta kristallerin büyüme (gelişme) sürecinde etkili olan Transport Fenomenleridir. Doğal konveksiyon, Transport Fenomenlerinden birisi olarak yer alırken, yer yüzünde $g=9.81\text{m/s}^2$ yer çekimi ivmesi şartlarında kristalin büyümesine zararlı etki etmektedir. Bu zararlı etki nedeniyle ileri teknoloji endüstrilerinde ihtiyaç duyulan yüksek kaliteli kristallerin büyümesi için uzay araçları serüvenini ortaya çıkarmıştır. Burada $g \approx 0 \text{ m/s}^2$ şartları sağlanarak, g yerçekimi ivmesinin doğal konveksiyondaki zararlı etkisini azaltma çareleri sağlanmaya çalışılmaktadır. Doğal konveksiyonun etkisi altında kalan akışkanlar yoğunluk farkından dolayı batmazlığı meydana getirmektedir. Bahsedilen batmazlık etkisi düşük yerçekimi ivmesi değerlerine sahip ortamda önlenirken, akışkanın yüzey gerilimlerinden meydana gelen akışkan hareketinin önemi artmaktadır. İki farklı akışkan fazları arasında oluşan arakesit Transport Fenomenleri etkisi altında kalması ile akışkan hareketi doğmaktadır.

Akışkan serbest yüzeyi boyunca değişime sahip olan arakesit gerilimi akışkanların hareketine neden olmaktadır.

Akışkanın arakesitindeki yüzey gerilimi akışkanın sıcaklığı ve bileşiminin değişimine veya arakesit boyunca bileşimlerin konveksiyonlarının bir fonksiyonudur. Bu iki etken, arakesitle yüzey gerilimi değerinin değişimine neden olur. Bu etki devam ettiği müddetçe akışkanın hareketi süreklilik kazanmaktadır.

Deneysel, teorik ve nümerik çalışmalar bu önemli yüzey gerilim hareketini daha iyi anlamak amacına yönlendirilmektedir. Arakesit yüzeyi boyunca sıcaklık değişimi ise yüzey gerilim kuvvetinin bölgesel değişimine neden olmakta ve akışkanın fiziksel özelliklerinden olan viskozitenin etkisiyle akışkan hacimsel olarak harekete geçmektedir.

Kristalin büyüme sürecinde ısı ve kütle transferi kristalin mükemmelliğine, homogenliğine ve saflık derecesine etki etmektedir.

Akışkan kolonundaki Termokapiler konveksiyondaki (yüzey gerilim konveksiyonundaki) rejim hali (zamandan bağımsız) ve rejim hali olmayan (zamana bağımlı) durumlarda hız ve sıcaklık dağılımları araştırılmıştır. Akışkana verilen ısı miktarı belirli bir kritik noktaya ulaşıktan sonra akışkan periyodik olarak osilasyonlu harekete geçmektedir. Prandtl sayısı değeri düşük olan akışkanlar, yarı iletkenler ve sıvı metaller olup bu tür akışkanlarda gerçek kristal büyümesi ortaya çıkmaktadır. Ancak yarı iletkenler ve sıvı metaller akışkan-hava arakesit bölgesinde havanın oksijeni ile reaksiyona girerek akışkan oksitini oluşturmaktadır. Oluşan akışkan oksiti yüzey gerilim kuvvetinin başlamasına engel olmakta ve bu akışkan harekete geçememektedir. Diğer yandan bu tür akışkanların saydam olmamasından dolayı akışkanın hareketi çıplak gözle gözlenememektedir. Bu tür akışkanların hareketi ancak akışkan çevresine yerleştirilen hassas sıcaklık ölçer cihazları ile belirlenebilir. Ancak bu durumda çevrede bulunan sıcaklık ölçerler yüzey deformasyonuna neden olmakta, dolayısıyla osilasyonlu akışın başladığı noktayı tespit etmek hatalı sonuca götürmektedir. Bu nedenle bu araştırma hidro-karbon (H-C) grubu akışkanlar simile edilerek gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada yüksek kaliteli yarı iletkenlerin üretiminde ortaya çıkan problemlerden en önemlisi olan yerçekimi ivmesinin etkisi incelenerek bu tür yarı iletkenlerin üretim kalitesinin artırılması amaçlanmaktadır.

Yüksek kaliteli kristallerin üretilmesinde etkili olan yüzey gerilim kuvvetlerinden doğan akış ile yoğunluk farkından meydana gelen akışlar esas alınarak teorik, nümerik ve deneysel incelemeler yapılmıştır.

Çalışma şartlarında, nümerik ve teorik incelemelerde yukarıda bahsedilen her iki akışın birbiri üzerindeki etkileri ve kristalin üzerinde zararlı etkiye sahip yoğunluk farkının azaltılması çareleri incelenmiştir. Bu çalışmada akışkan rejim hali akıştan osilasyonlu akış durumuna geçme noktasına kadar Navier-Stokes denklemleri ve

süreklilik denklemi kullanılarak yüzey gerilim hareketi yapan akışkanın SIMPLE metodu ile çözümü gerçekleştirilmiştir. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Microgravity laboratuvarlarında yaptığımız deneysel çalışmanın sonuçları ile numerik çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır.

Akışkanda yüzey geriliminden meydana gelen akış hareketleri 19. yüzyılda Marangoni ve arkadaşları tarafından açıklanmasına rağmen, 60'lı yıllarda Scriven ve Sterling (1960) daha önce yapılan yüzey gerilimi ile ilgili tüm çalışmaları bir araya getirerek önemli noktalarını belirtmişlerdir. Levich (1962), Levich ve Krylov (1969) ise yüzey gerilim hareketleri için tüm teorik bilgileri tartışıp özetlemişlerdir.

Chen ve Hu (1996) alttan soğutulmuş üstten ısıtma moduna göre yüzen bölge konfigürasyonundaki konveksiyonu nümerik olarak incelemişlerdir. Nümerik çözüm de sonlu farklar metoduyla (FDM) 32x32'lik grid kullanarak 2-D boyutlu konfigürasyona göre 0.0005 zaman adımıyla $t=1000$ saniyeye kadar 2 milyon ve defa iterasyon yaparak 20°C ortam sıcaklığından başlayarak yüzey gerilim hareketini incelemiştir. Nümerik olarak incelenen bu simülasyonda hacimsel sıcaklık profillerini ve akışkanın akış çizgilerini incelemişlerdir.

Monti vd. (1998) osilasyonlu marangoni konveksiyonu Avrupa Uzay Araştırmaları tarafından karşılanan roket üzerinde yapmış oldukları deneysel çalışmaları yeryüzünde bilgisayar başında yaptıkları nümerik simülasyonla karşılaştırmışlardır. Bu deneysel ve nümerik çalışmalarda 2 mm çapında ve 1 mm yüksekliğindeki yüzen bölge konfigürasyonunda üstten ısıtma moduna göre kinematik viskozitesi 2cs olan silikon yağının 30°C'ye kadar sıcaklık farkı uygulanarak 3-D Navier-Stokes denklemlerini çözmüşlerdir. Sonuç olarak 3-D osilasyonlu akışın aksel dalganın periyodik olmayan konumunda sinusoidal periyodik dalga konumuna geçip sürekliliğinin sağlandığı pozisyonu incelemişlerdir.

Zeng vd. (1999) $Pr=16.0849$, $Ma=3.30508 \times 10^4$ değerinde ve boyutsal oran aralığı geniş ($Ar=0.2$ ile 4.0) değerlere sahip silindirik kaptaki silikon yağının 3-D osilasyonlu Marangoni konveksiyonunu nümerik olarak incelemiştir. Nümerik

incelemelerdeki denklemlerin çözümü için Sonlu Hacim Metodu (FVM) ile SIMPLER algoritmasını kullanmış ve hız alanları ve sıcaklık alanlarını bulmak için SMART şemasını uygulamıştır. Hassas sonuçlar elde etmek için 80x40x24 ile 40x24x40 aralığında değişen grid sayılarını kullanarak sonuçları tablo halinde dökmüştür. Buna göre yukarıda bahsedilen Prandtl ve Marangoni değerleri altında periyodik osilasyonlu konveksiyonu incelemiştir. Bu inceleme sonucunda farklı grid sayılarında elde edilen değerlerde pek fark gözlemlenmemiştir.

Monti vd. (2000) 3-D rejim haline girmemiş Marangoni konveksiyonun nümerik çözümlerini ve mikro-skala deneyini incelemiştir. 3-D kod kullanarak boyutsuz terimlere dönüştürerek süreklilik, Navier-Stokes ve energy denklemlerini geliştirmiştir. Deneysel ve nümerik çalışmalarda radyal akış durumunda kararsızlığın başlangıcı olan rejim hali olmama durumunun başlangıcının geometrik boyutsal orana bağlı olduğu ve akışkanın ısıtma moduna göre (alttan ısıtıp üstten soğutma veya üstten ısıtıp alttan soğutma) değiştiğini bulmuştur.

Zeng vd. (2001) silikon yağının 3-D boyutlu yüzey gerilim konveksiyon akışını nümerik olarak incelemiştir. Sonlu Hacim Metodu (FVM) kullandığı çalışmada dönel(rotating) ve çalkantılı(pulsating) olmak üzere iki farklı osilasyonlu konveksiyonun varlığını keşfetmiştir. Osilasyonun başlangıcı noktasında önce çalkantılı osilasyonu, Marangoni sayısının artırılmasıyla da dönel osilasyonlu konveksiyonu gözlemlemiştir. Periyodik osilasyonlu rejim halinde boyutsal oran $Ar=4.0$ durumda Marangoni sayısı ile boyutsuz frekans arasında lineer bir bağlantının olduğunu keşfetmiştir.

Shevtsova vd. (2001) yüzen bölge konfigürasyonunda çok geniş Prandtl sayısı ($Pr=1-35$) aralığına sahip bir akışkan kullanarak osilasyonlu Marangoni konveksiyonu radyal yöndeki osilasyon dalga boylarının farklılıklarını nümerik olarak incelemiştir. Bu nümerik çalışma Sonlu Hacim Metodu (FVM) ile 3-D Marangoni konveksiyonun sonuçlarını karşılaştırmıştır.

Selver ve Uguz (2004) esnek bölge konfigürasyonunun yüzey gerilimli akış hareketinin deneysel bir çalışmasını sıcaklık ölçümleri ve akış görüntülerini kullanarak araştırmışlardır. Hakim olan yüzey gerilimli akış hareketinin meydana

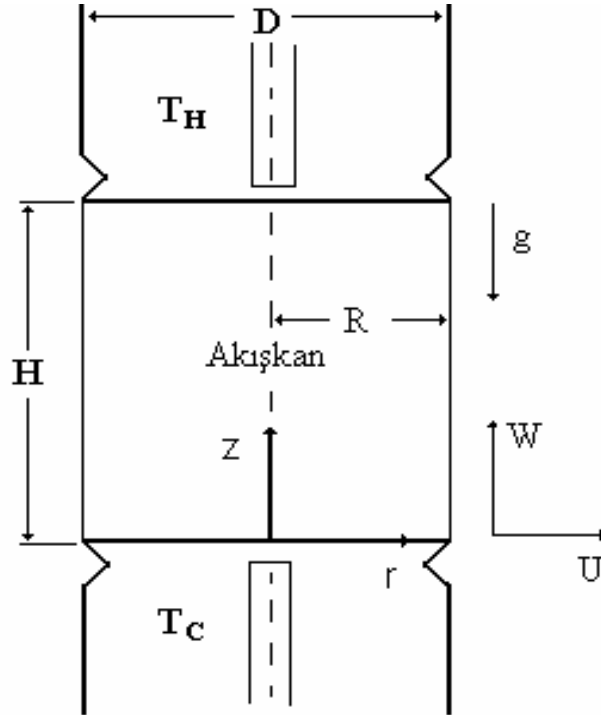
gelmesi için üst bakır çubuk tarafından dikey konumdaki akışkan kolonu ısıttıkları ve deney akışkanı olarak 5 cSt silikon yağı kullandıkları çalışmalarında bazı şartlar altında akış ve sıcaklık osilasyonlarını gözlemlemişlerdir. Değişen şartlar için kritik sıcaklık farklarını ölçmüş ve mikroskop sistemi sayesinde akış şekillerini gözetlemişlerdir.

Sağlam vd. (2004) yüzen bölge konfigürasyonunda yukarıdan ısıtılarak yüksek Prandtl sayısına sahip bir akışkan kolonundaki yüzey gerilimli akışı deneysel olarak araştırmışlardır. Deneylerinde 3 mm çapında iki küçük dairesel bakır çubuk ve deney akışkanı olarak kinematik viskozitesi 5 cSt olan silikon yağı kullanmışlardır. Deney akışkanını dikey vaziyette astıkları bu bakır çubuklara farklı sıcaklıklar uygulayarak belirli şartlar altında akış ve sıcaklık osilasyonları gözlemlemişlerdir. Farklı şartlar için kritik sıcaklık farkını ölçmüş ve akış şekillerini mikroskop sistemi sayesinde gözetlemişlerdir. Akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının osilasyonların başlama noktasına olan etkisini araştırdıkları bu çalışmada farklı duvar sıcaklıklarında ve farklı boyutsal oranlardaki kritik sıcaklık farkı değerlerini incelemişlerdir.

2. MATEMATİKSEL YÖNTEM

2.1. Teorik Analiz

Son yıllarda yüzey gerilimli konveksiyon hareketi ile ilgili çalışmalarda dikkate değer oranda bir artış görülmüştür. Özellikle yüzen bölge konfigürasyonu kullanılarak, akışkanın yüzey gerilim konveksiyon hareketi boyutsal oranlarına bağlı olarak yaygın şekilde çalışılmıştır. Yüzey gerilim konveksiyon hareketi, iki silindirik metal duvar arasına akışkan yerleştirilerek, deney bölgesi olarak da adlandırılan bir akışkan kolonunda incelenir. Şekil 2.1’de akışkan kolonunun koordinat sisteminde iki boyutlu görünüşü verilmiştir. Akışkana farklı sabit sıcaklıklar uygulanarak, yüzey gerilimli konveksiyonda kararlı yüzey gerilimli konveksiyon hareketindeki akışkan serbest yüzey boyunca sıcaklık profilleri ile hız vektörleri incelenmiştir. Bazı önemli boyutsuz parametreler yüzey gerilimli konveksiyon hareketinin karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu boyutsuz parametreler akışkanlar mekaniğindeki kütle korunum denklemleri kullanılarak elde edilir.



Şekil 2.1. Yüzen bölge konfigürasyonunda eksensel simetrik akışkan kolonunun koordinat sistemi.

2.1.1. Üç Boyutlu Temel Hareket Denklemleri

Bir akışkanda, akış hareketine bağlı olarak hız ve sıcaklık dağılımlarının bulunabilmesi için akışkanlar mekaniğindeki hareket denklemlerinin (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) uygun şartlarda çözülmesi gerekmektedir. Sıkıştırılmaz bir akışkan için silindirik koordinatlarda, sürekli rejimde hareket denklemlerini üç boyutlu olarak aşağıda görüldüğü gibi yazılabilir (Rohsenov 1998).

i. Süreklilik Denklemi

Süreklilik veya kütlenin korunumu olarak bilinen denklem, bir kontrol hacme giren ve çıkan toplam kütlenin toplamının sıfır olması şeklinde ifade edilir. Süreklilik denklemi;

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R V_R) + \frac{1}{R} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial Z} = 0 \quad (2-1)$$

olarak yazılabilir.

ii. Momentum Denklemleri

Momentum denklemleri Navier-Stokes denklemleri olarak da bilinir. Momentum denklemleri akış alanına Newton'un ikinci hareket kanununun uygulaması ile bulunur. Bir akışkandaki akış alanlarına bağlı olarak akışkanın kütlesine iç ve dış kuvvetler etki etmektedir. Akışkana etkiyen iç kuvvetler normal ve kayma gerilme kuvvetleridir. Akışkana etkiyen dış kuvvetler ise yerçekimi, manyetik ve elektriksel kuvvetlerdir. Sıkıştırılmayan akışkan için momentum denklemleri, R- momentum denklemi, θ - momentum denklemi ve Z- momentum denklemi olarak aşağıda ki gibi yazılabilir. Bu R- momentum denklemi, θ - momentum denklemi ve Z- momentum denklemlerinde; eşitliğin sol tarafındaki terim atalet kuvvetlerini, sağ taraftaki ilk terim basınç kuvvetlerini, ikinci terim dış kuvvetleri , son terim ise viskoz kuvvetleri göstermektedir.

R- momentum denklemi;

$$\rho \left(\frac{\partial V_R}{\partial t} + V_R \frac{\partial V_R}{\partial R} + \frac{V_\theta}{R} \frac{\partial V_R}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{R} + V_Z \frac{\partial V_R}{\partial Z} \right) =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial R} + \rho g_R + \nu \left(\frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R V_R) \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 V_R}{\partial \theta^2} - \frac{2}{R^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_R}{\partial Z^2} \right) \quad (2-2)$$

θ - momentum denklemi;

$$\rho \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_R \frac{\partial V_\theta}{\partial R} + \frac{V_\theta}{R} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{V_R V_\theta}{R} + V_Z \frac{\partial V_\theta}{\partial Z} \right) =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left(\frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R V_\theta) \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{R^2} \frac{\partial V_R}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial Z^2} \right) \quad (2-3)$$

Z- momentum denklemi;

$$\rho \left(\frac{\partial V_Z}{\partial t} + V_R \frac{\partial V_Z}{\partial R} + \frac{V_\theta}{R} \frac{\partial V_Z}{\partial \theta} + V_Z \frac{\partial V_Z}{\partial Z} \right) =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial Z} + \rho g_Z + \mu \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial V_Z}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 V_Z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_Z}{\partial Z^2} \right) \quad (2-4)$$

iii. Enerji Denklemi

Enerji denklemi, differansiyel hacim elemanına Termodinamiğin I. Kanununun (Enerjinin korunumu ilkesi) uygulanması ile bulunur. Hacim elemanı içinde enerji kaynağı olmadığı ve radyasyon etkisinin ihmal edildiği düşünülürse Termodinamiğin

I. Kanunu;

[Hacim elemanına iletimle olan ısı transferi] + [Hacim elemanına dış kuvvetlerin yaptığı iş] + [Hacim elemanında yüzeysel kuvvetlerin yaptığı iş] = [Hacim elemanının iç enerjisindeki değişimi] olarak ifade edilir. Bu ifadeden yararlanarak enerji denklemi;

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_R \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{V_\theta}{R} \frac{\partial T}{\partial \theta} + V_Z \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = k \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (2-5)$$

olarak yazılabilir. Simetriden dolayı θ doğrultusu boyunca momentum ve enerji denklemlerinde ki terimler ihmal edildi. Dolayısıyla r ve z doğrultusunda ki süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinden oluşan 2 boyutlu hareket denklemlerini yeniden yazacak olursak;

2.1.2. İki Boyutlu Temel Hareket Denklemleri

Deneysel çalışmalarımızda, yüzen bölge konfigürasyonu kullanılarak yüksek Prandtl sayısına ($Pr= 67$) sahip olan silikon yağının sıcaklık etkisiyle meydana gelen yüzey gerilim akış hareketleri araştırılmıştır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi akışkana sıcaklık farkı uygulandığında, akışkanda yüzey gerilimli akış hareketinin başladığı görülmektedir. Yüzey gerilim akış hareketinde etkili olan parametreler süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin boyutsuz hale getirilmesiyle elde edilir. Silindirik koordinatlarda akışkanın hareketi θ eksenine göre simetri olmasından dolayı, akış hareketi sadece R ve Z eksenlerinin fonksiyonu olmaktadır. Ayrıca, karlı(rejim hali) akış söz konusu olduğunda silindirik koordinatlarda süreklilik denklemi, momentum denklemleri(R-momentum denklemi ve Z-momentum denklemi) ve enerji denklemlerini R ve Z eksenlerine göre yazarsak;

i. Süreklilik Denklemi

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R V_R) + \frac{\partial V_Z}{\partial Z} = 0 \quad (2-6)$$

ii. Momentum Denklemleri

R- momentum denklemi:

$$\rho \left(V_R \frac{\partial V_R}{\partial R} + V_Z \frac{\partial V_R}{\partial Z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial R} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_R}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial V_R}{\partial R} - \frac{V_R}{R^2} + \frac{\partial^2 V_R}{\partial Z^2} \right) + g_R \quad (2-7)$$

Z- momentum denklemi:

$$\rho \left(V_R \frac{\partial V_Z}{\partial R} + V_Z \frac{\partial V_Z}{\partial Z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial Z} - \rho g_Z + \mu \left(\frac{\partial^2 V_Z}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial V_Z}{\partial R} + \frac{\partial^2 V_Z}{\partial Z^2} \right) \quad (2-8)$$

iii. Enerji denklemi

$$V_R \frac{\partial T}{\partial R} + V_Z \frac{\partial T}{\partial Z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (2-9)$$

olarak yazılabilir.

2.2. Sınır Şartları

Yüzey gerilim konveksiyon hareketinde problem çözümü için kullanılan uygun sınır şartları:

i- Duvarlarda akışkanın kayması yoktur;

$$Z=0 \text{ da } \longrightarrow V_R=0, \quad V_Z=0$$

$$Z=H \text{ da } \longrightarrow V_R=0, \quad V_Z=0$$

ii- Deney bölgesinde akışkanla temas halindeki alt ve üst duvarlardaki sıcaklıklar sabittir;

$$Z=0 \text{ durumunda } T=T_C$$

$$Z=H \text{ durumunda } T=T_H$$

2.3. Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması ve Önemli Boyutsuz Parametreler

Yüzey gerilimli akış hareketinde akışkanların serbest yüzeylerinin düz olduğu durumda ve uygun sınır şartlarında önemli boyutsuz parametreler Ostrach (1977-1979-1982) tarafından önerilmiştir. Yüzey gerilimli akış hareketinde etkili olan, bu önemli boyutsuz parametreler iki boyutlu hareket denklemlerinin boyutsuzlaştırılması ile elde edilebilir. Denklemleri boyutsuzlaştırmak için aşağıda verilen boyutsuzlaştırma parametreleri kullanılır. Bu parametreler;

$$\underline{r} = \frac{R}{R_0}$$

$$\underline{z} = \frac{Z}{H}$$

$$\underline{u} = \frac{V_R}{V_{R_0}}$$

$$\underline{w} = \frac{V_Z}{V_{Z_0}}$$

$$\underline{\theta} = \frac{T - T_C}{T_H - T_C}$$

dır. Burada viskoz akışkanın; \underline{r} , \underline{z} , \underline{u} ve \underline{w} boyutsuz niceliklerini, H ve R karakteristik uzunluklarını, V_R ve V_Z referans hızlarını, $\underline{\theta}$ ise boyutsuz sıcaklığını göstermektedir. Bu boyutsuz ifadeleri (2-6), (2-7), (2-8),(2-9) kullanarak süreklilik denklemini \underline{r} ve \underline{z} doğrultusunda ki momentum denklemlerine ve enerji denklemlerine uyarlandığında her terim için boyutsuzlaştırılmış denklemler aşağıda gösterildiği gibidir:

Boyutsuz süreklilik denklemini;

$$\frac{1}{\underline{r}} \frac{\partial}{\partial \underline{r}} (\underline{r} \underline{u}) + \frac{\partial \underline{w}}{\partial \underline{z}} = 0 \quad (2-10)$$

olarak yazılır.

Boyutsuz süreklilik denkleminde akışkanın radyal doğrultudaki referans hızı (\underline{u}), eksensel doğrultudaki referans hızı (\underline{w}) olmak üzere aşağıda ki ifade çıkartılır:

$$\underline{u} = \underline{w} \frac{R}{H} \quad (2-11)$$

yukarıda bulmuş olduğumuz radyal yöndeki \underline{u} parametresi momentum denklemlerinde ve enerji denkleminde yazılarak aşağıda ki boyutsuz ifadeler çıkartılır.

Boyutsuz r- momentum denklemini:

$$\underline{u} \frac{\partial \underline{u}}{\partial \underline{r}} + \underline{w} \frac{\partial \underline{u}}{\partial \underline{z}} = -\frac{\partial p}{\partial \underline{r}} + \frac{1}{(2 \text{Re}_\sigma \text{Ar})^{2/3}} \left[\frac{\partial}{\partial \underline{r}} \left(\frac{1}{\underline{r}} \frac{\partial (\underline{r} \underline{u})}{\partial \underline{r}} \right) + \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial \underline{z}^2} \right] \quad (2-12)$$

Boyutsuz z- momentum denklemini:

$$\underline{u} \frac{\partial \underline{w}}{\partial \underline{r}} + \underline{w} \frac{\partial \underline{w}}{\partial \underline{z}} = -\frac{\partial p}{\partial \underline{z}} - \frac{\text{Gr}}{(2 \text{Re}_\sigma \text{Ar})^{4/3}} \underline{\theta} + \frac{1}{(2 \text{Re}_\sigma \text{Ar})^{2/3}} \left[\frac{1}{\underline{r}} \frac{\partial}{\partial \underline{r}} \left(\underline{r} \frac{\partial \underline{w}}{\partial \underline{r}} \right) + \frac{\partial^2 \underline{w}}{\partial \underline{z}^2} \right] \quad (2-13)$$

Boyutsuz Enerji denklemini;

$$\underline{u} \frac{\partial \underline{\theta}}{\partial \underline{r}} + \underline{w} \frac{\partial \underline{\theta}}{\partial \underline{z}} = \frac{1}{\text{Pr}(\text{Re}_\sigma \text{Ar})^{2/3}} \left[\frac{1}{\underline{r}} \frac{\partial}{\partial \underline{r}} \left(\underline{r} \frac{\partial \underline{\theta}}{\partial \underline{r}} \right) + \frac{\partial^2 \underline{\theta}}{\partial \underline{z}^2} \right] \quad (2-14)$$

olarak elde edilir. Bu çıkartılan boyutsuz momentum ve enerji denklemlerinden yüzey gerilim akış hareketinde etkili olan önemli parametreler aşağıda gösterildiği gibidir;

i. Boyutsal oran: $\text{Ar} = \frac{H}{D}$

ii. Prandtl sayısı: $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

iii. Yüzey gerilim Reynolds sayısı: $Re_{\sigma} = \frac{|\sigma_T|(\Delta T)H}{\nu \mu}$

vi. Marangoni sayısı : $Ma = Pr Re_{\sigma} = \frac{|\sigma_T|(\Delta T)H}{\alpha \mu}$

olarak elde edilir. Burada; H akışkanın dikey yüksekliği, D akışkanın çapı, ν akışkanın kinematik viskozitesi, α akışkanın termal difüzyonu, μ akışkanın dinamik viskozitesi, $|\sigma_T|$ akışkanın yüzey gerilim sıcaklık katsayısı, ΔT akışkanın sıcaklık farkı, ($\Delta T = T_H - T_C$) dir. Akışkana sıcaklık farkı uygulandığında, sıcaklık farkından dolayı serbest yüzeyde akış hareketi sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğrudur. Yani akışkanın viskozite değeri sıcak bölgede azalacağı için akışkan soğuk bölgeye doğru çekilecektir. Prandtl sayısı, yüzey gerilim Reynolds sayısı ve Marangoni sayısı akışkanın fiziksel özelliklerini içeren boyutsuz sayılardır. Bu sayılar ısıtma metoduna göre baskın ve akış hareketinde etkili olan boyutsuz sayılardır.

Yüzey gerilim Reynolds sayısı eylemsizlik kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak bilinir. Yüzey gerilim Reynolds sayısı momentum denkleminin boyutsuz halinde de görüldüğü gibi yüzey gerilim akış hareketinde önemli rol oynar. Prandtl sayısı büyük ($Pr \gg 1$) olan akışkanlar için yüzey gerilim Reynolds sayının etkisi daha büyüktür.

Büyük Prandtl sayısına sahip akışkanlar için yüzey gerilim akış hareketinde akışkanın akış karakteri Marangoni sayısı ile belirlenir. Kararlı akış durumundaki yüzey gerilimli akış hareketinde Marangoni sayısı akış karakterini belirlemede oldukça etkilidir. Yüksek Prandtl sayısına sahip bir akışkanın farklı Marangoni sayıları için akışkanın yüzey sıcaklık dağılımları ve hız dağılımları hesaplanabilir. Marangoni sayısı akışkanın kararlı durumdan periyodik osilasyonlu duruma geçiş noktasını belirleyen önemli bir sayıdır.

3. NÜMERİK ÇALIŞMANIN MATERYAL ve YÖNTEMİ

3.1. Akışkanın Özellikleri

Bu nümerik çalışmada alt duvar(soğuk duvar) sıcaklığı $T_C=25^\circ\text{C}$ ve üst duvar (sıcak duvar) sıcaklıkları $T_H= 30^\circ\text{C}$, 35°C , 40°C , 45°C ve 50°C olarak seçilmiştir. Deney ortamında normal şartlar altında $T_C=25^\circ\text{C}$ alınmaktadır. Bu nümerik çalışmanın sonuçları da deney sonuçlarıyla karşılaştırılacağından dolayı bu nümerik çalışmada da $T_C=25^\circ\text{C}$ olarak seçilmiştir. Bu değerlere göre boyutsuz parametrelerin en düşük ve en yüksek sınır değerleri sırası ile:

$$A_r = 0.5$$

$$Pr = 53-63$$

$$Re_\sigma = 29-202$$

$$Ma_{kr} = 1.858 \times 10^3 - 1.09 \times 10^4$$

dır. Boyutsuz parametreler belirlenirken akışkanın ortalama sıcaklığı için $T_M=1/2(T_H+T_C)$ ifadesi kullanılmıştır.

Tablo 1. Viskozitesi 5 cSt olan silikon yağının 25°C deki fiziksel özellikleri.

Simge	Birimler	Değerler
Yoğunluk (ρ)	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	913
Dinamik viskozite (μ)	$[\text{m}^2/\text{s}]$	4.88×10^{-3}
Kinematik viskozite (ν)	$[\text{N}.\text{s}/\text{m}^2]$	5.345×10^{-6}
Termal kondüksiyon katsayısı (k)	$[\text{J}/\text{m}.\text{s}.\text{K}]$	0.116
Termal difüzyon katsayısı (α)	$[\text{m}^2/\text{s}]$	7.42×10^{-8}
Yüzey gerilim sıcaklık katsayısı $ \sigma_T , \left \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right $	$[\text{N}/\text{m}.\text{K}]$	$-5,9 \times 10^{-5}$
Prandtl sayısı (Pr)	Birimsiz	67.0
Akışkanın kinematik viskozitesinin değişimi, $\nu = 8.185 - 0.2T + 3.74 \times 10^{-3} T^2 - 4.865 \times 10^{-5} T^3 + 3.47 \times 10^{-7} T^4 - 9.76 \times 10^{-10} T^5$ şeklindedir. Sıcaklık değerleri $^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır (Selver ve Uguz, 2004'den)		

3.2. Meteryal

Nümerik çözüm için matematiksel çözümde bahsedilen süreklilik denklemi (2-1), Navier-Stokes denklemleri (2-2, 2-3, 2-4) ve enerji denklemi (2-5) kullanılmıştır. Bu denklemler Fortran programlama dilinde kodlanarak adım adım çözdürülmüştür.

Nümerik çözüm için kullanılan program Fortran programlama dilinde kodlanmıştır. Kodlama dili olarak Fortran'ın tercih edilmesinin birkaç sebebi vardır: Birincisi, günümüzde bilimsel çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmesi, adeta bilimsel programlama dili olarak kabul görmesi dolayısıyla yazılan programın bu konularda bilimsel çalışma yapan kişiler tarafından kolaylıkla anlaşılabilir ve incelenebilir olması, ikincisi Fortran programla dilinin esnek bir yapıya sahip olması nedeniyle herhangi bir aşamada çıkan sorunların kolaylıkla çözümlenebilmesi, üçüncüsü nümerik çözümün matematiksel hesaplamalarda gerektirdiği çok yüksek hassasiyeti Fortran programlama dilinin karşılaması ve son olarak Fortran programlama dilinin çok hızlı olmasının program da kullanılan oldukça fazla sayıdaki denklemlerin çözümü için gereken süreyi kısaltmasıdır.

Program başlangıç koşullarını ana program ile aynı klasörde bulunan 'Basla.D1' isimli text dosyadan ve grid aralıklarını 'Grid.dat' isimli text dosyadan almaktadır. Program çalışıp denklemleri çözdükten sonra bulduğu sonuçları sırasıyla 'U.B1', 'V.B1', 'W.B1', 'P.B1' ve 'T.B1' dosyalarına kaydetmektedir.

Fortran programlama dilinde kodlanan program ana programa bağlı olan 14 alt programdan (procedure) oluşmaktadır. Ana programda başlangıç koşullarını içeren ilgili text dosyadan bilgiler alındıktan sonra sonuçların kaydedilmesi için gerekli olan text dosyalar oluşturulmakta ve başlangıç koşullarını hazırlayan alt program çağrılarak başlangıç koşulları programa girdi olarak verilmektedir. Sınır hızlarını, sınır sıcaklıklarını ve sınır basınçlarını bulan alt programlar çağrılıp sınır değerleri bulunduktan sonra hızları, basınçları, sıcaklıkları hesaplayan alt programlar çağrılıp çözümler yapılmakta ve en sonunda çıkış alt programları yardımıyla hesaplanan değerler başlangıçta oluşturulan ilgili text dosyalara kaydedilerek program sonlanmaktadır.

Programın çalışmasıyla elde edilen sonuçlar osilasyonlu durum oluşuncaya kadar ilk hücreden (0,0,0) son hücreye (15,30,24) kadar çıktı dosyalarına kaydedilmiştir. ‘U.B1’, ‘V.B1’, ‘W.B1’, ‘P.B1’ ve ‘T.B1’ dosyalarına kaydedilen değerler, Fortran da yazılan başka bir program yardımıyla TecPlot veri formatına çevrilerek yeni bir text dosyaya verilen isimle kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler bu dosyadan alınarak TecPlot paket programında çizdirilmiştir.

3.3. Yöntem

Akış ve sıcaklık alanı, gelişmiş SIMPLE algoritması kullanılarak FORTRAN programlama diliyle çözülmüştür. Bu çözümde uygun sayıda gride sahip Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method- FEM) kullanılmıştır. Akışkanın üst ve alt bölgelerinde bakır silindire temas noktalarını 0.01°C hassasiyetteki değerlerle elde edilen sonuçların sıcaklık ve hız alanları cinsinden adım adım program koşturulmuştur.

Akışkanın hacmi ise $1 \times 6.28 \times 2 \text{mm}$ olarak alınmıştır. Akışkanın hareketindeki hassasiyete göre deneme yanılma yöntemiyle optimum grid sayısı olarak $15 \times 30 \times 24$ belirlenmiş ve kullanılmıştır. Sabit tutulan soğutucu duvar sıcaklığı ile ısıtıcı duvar sıcaklığı arasındaki fark ise; 5°C , 10°C , 15°C , 20°C ve 25°C gibi değerlerle program ayrı ayrı koşturulmuştur.

Program ilk hücre olan (0,0,0) hücresi ile son hücre olan (15,30,24) hücresine kadar nümerik çözüme ulaşmıştır. Hesaplanan bu değerler nümerik sonuçların grafik çizimlerinde oldukça iyi sonuçlar veren Amtec Engineering, Inc. firması tarafından geliştirilen “Tecplot” grafik programına aktarılarak sonuçlar gösterilmiştir.

Akışkanın hacmi $1 \times 6.28 \times 2 \text{mm}$ olarak alınmıştır. Akışkanın hareketindeki hassasiyete göre en uygun grid sayısı olarak $15 \times 30 \times 24$ belirlenmiş ve kullanılmıştır. Hücre sayısının küçük olması hücre sayısının büyük olması kadar hataya neden olmasa da yine de hataya sebep olacağı ve çok büyük hücre sayılarının programın daha uzun sürede koşmasına neden olacağı dolayısıyla gereksiz zaman kaybına da neden

olacağı düşünülerek grid sayısı optimum olarak bu şekilde belirlenmiştir. Yatay da 15 adet daireye, Dikey de 30 adet diske ve Radyal yönde 24 adet pasta dilimine bölünmüştür. Bu şekilde bölünmesinin nedeni; düşeyde akışkanın hareketi fazla olduğu için daha sık (30 adet disk) yapılarak daha hassas sonuçlar elde edilmiş ve böylece hesaplamalarda ki uyumluluk sağlanmıştır. İkinci önemli değişim olan Radyal yöndeki değişimi de sağlıklı olarak analiz edebilmek için de Radyal yönde 24 adet pasta dilimine bölünmüştür. Akışkan hareketi aksenal yönde simetrik olduğu için yatay yönde 15 adet daireye bölünerek programın çok fazla zaman almasının önüne geçilmiştir.

Değişik sıcaklık değerlerinde rejim hali durumlarda alt duvar (soğuk duvar) sıcaklığı deney ortam şartlarındaki değere yakın değerde (25°C) sabit tutularak üst duvar (sıcak duvar) sıcaklığı 5°C artırılarak (30°C, 35°C, 40°C, 45°C ve 50°C) program yeniden koşturulmuştur.

4. DENEYSEL ÇALIŞMANIN MATERYAL ve YÖNTEMİ

4.1. Akışkanın Özellikleri

Prandtl sayısı 67 olan akışkanın silindirik kolonunun, üst çubuk ile üstten ısıtılarak ve alt çubuk ile alttan da soğutularak oluşturulan bir konfigürasyonda yüzey gerilim hareketinden meydana gelen doğal taşınımı gözlenmiştir. Bu deneysel çalışmada akışkana body kuvveti etkisi sebebiyle dikey vaziyetteki bakır çubuklara asılan akışkanın yüzeyi tam dikey vaziyette gerçekleşmemektedir. İki bakır çubuk arasına asılan akışkanın body kuvveti etkisi nedeniyle gerçek olarak Şekil 4.2.'de ki konumunu alır. Dikey vaziyette silindirik konumda bozulma durumu boyutsal oran olan H/D değerine bağlıdır. H/D oranı > 1 değerlerinde bu farklılık bariz bir şekilde görülmektedir. Şayet boyutsal ora $H/D < 1$ olması durumunda bu farklılık mümkün olduğu kadar az hissedilmektedir (Sağlam vd., 2004'den).

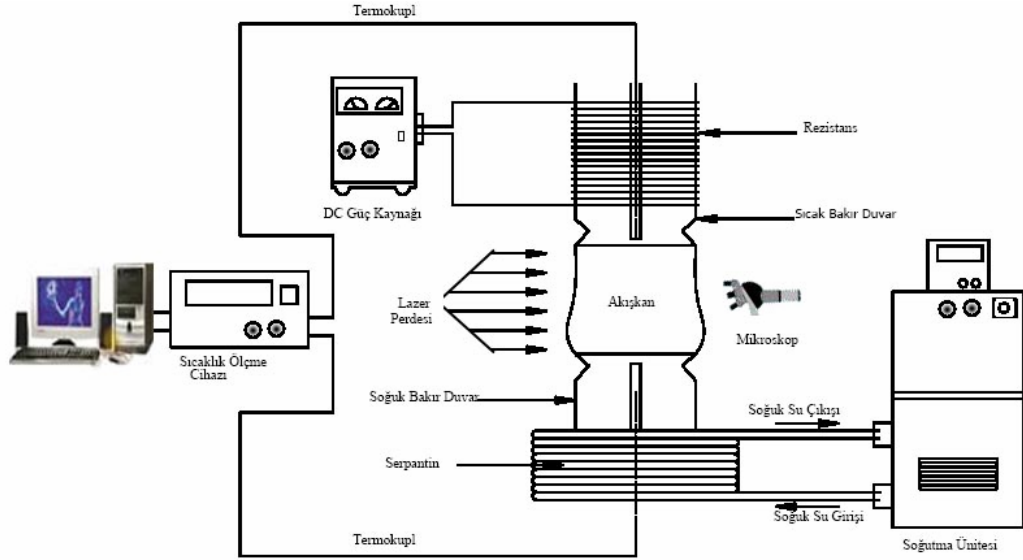
4.2. Materyal

Deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 4.2.'de verilmiştir. Esnek bölge konfigürasyonunda akışkandaki doğal taşınım etkisini en aza indirmek için soğutucu çubuğun alt tarafta ve ısıtıcı çubuğun üst tarafta olduğu metot kullanılmıştır. Şekil 4.2.'de verilen deney düzeneği; deney akışkanı, deney bölgesi ısıtma sistemi, termokupullar, sıcaklık ölçme cihazı, akış görüntüleme sistemi ve akışkanın yüksekliğini hassas şekilde ayarlayan deney aparatından oluşmaktadır.

Deneysel çalışmada deney akışkanı olarak 'Dow Corning' firmasından ticari olarak alınan, 5cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı (polydimethylsiloxane polimers) kullanılmıştır. Bu silikon yağının 25°C sıcaklıktaki fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Deney bölgesinde kullanılan akışkanla temas halinde olan ve simetri eksenine dik konumdaki sıcak duvar ve soğuk duvar olup çapı 3 mm olan saf bakırdan yapılmıştır. Silindirik duvarların malzemesi yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayı bakır olarak seçilmiştir. Ayrıca bu bakır duvarlar, akışkanın yüzey gerilim hareketinin homojen olarak gerçekleşmesinde önemli rol oynamaktadır. Silindirik

bakır duvarın her birinin merkezinden 1mm çapında ve derinliği bu bakır duvarların akışkan ile temas yüzeyine 0.5mm kalana kadar açılan deliklere yerleştirilen termokupullar sayesinde sıcaklık ölçmelerinin sağlıklı olarak yapılabilmesi için tasarlanmıştır.



Şekil 4.2. Deney Düzenegi

Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi; silindirik sıcak bakır duvar ve silindirik soğuk bakır duvarın akışkana temas yüzeyine yakın bölgelerden radyal yönde çentikler açılmıştır. Bu çentikler akışkanın silindirik bakır duvarlarının radyal ısıtma yüzeylerinin azaltılması amacı ile yapılmıştır.

Deney düzeneginde ısıtmayı gerçekleştirmek amacıyla 0.5 mm çapında krom-nikel telden imal edilen elektrik rezistansı kullanılmıştır. Havanın doğal taşınımının akışkana yakın noktalarda akışkanı etkilememesi için bu rezistans akışkan yüzeyinden 5 mm yukarıda olacak şekilde yerleştirilmiş ve akışkanla temas halindeki bakır silindirik duvarın yüzeyine sarılmıştır. Rezistansın uçları "Phillip Harris" firması tarafından üretilen AC-DC akımı veren 0-25 volt arasında çalışan güç kaynağına bağlanmıştır.

Akışkan yüzeyinin alt bölgesinin soğutulması ve istenilen sabit bir sıcaklık değerinde

tutulması için silindirik bakır duvara soğutma özelliği verecek şekilde uyarlanmış akışkan test bölgesi oluşturulmuştur. Silindirik bakır duvarın üzerine bakır borudan yapılmış serpantin sıkı bir şekilde sarılmıştır. Soğutucu bakır duvarın soğutulması 0-300°C aralığında soğutma ve ısıtma yapabilen, 'Heto' firması tarafından üretilen 0.1°C hassasiyete sahip cihaz ile sağlanmıştır.

0.01 mm çapında ve 0.015°C hassasiyette olan copper-constantan T tipi izoleli termokupullar ısıtıcı ve soğutucu bakır duvar sıcaklıkların ölçülmesi için, bu silindirik duvarların merkezinde açılan kanallara yerleştirilmiştir. Kanallara yerleştirilen termokupulların çevresindeki boşluklar 'Omega' firması tarafından üretilen yüksek ısı iletim katsayısına sahip bir macun ile doldurulmuştur. Soğutucu duvar ile ısıtıcı duvar arasındaki sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerleri arasındaki hassasiyeti akışkanın yüzey gerilim hareketinin başlayıp osilasyonlu hale geçinceye kadar ki hassasiyeti belirler.

Yapılan çalışmada deney bölgesinin çevresindeki ortam sıcaklığı dört farklı noktadan sıcaklığa karşı çok hassas hassasiyete sahip iron-constantan J tipi izoleli termokupullar ile ölçülmüştür. Dört farklı noktadan elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığını verir.

0.01 mm çapında ve 0.015 hassasiyette olan copper-constantan T tipi izolesiz termokupul sayesinde akışkanın istenilen bölgesinden dikey vaziyetteki sıcaklığı ölçer. Bu termokupul copper-constantan tellerinin tam birleştiği nokta akışkanın akış hareketini bozmayacak şekilde daldırılarak akışkan yüzey sıcaklığı ölçülmüştür.

Sıcak ve soğuk duvar sıcaklıkları, 4 adet farklı noktalarda ki ortam sıcaklığını ölçen termokupullar ve akışkan yüzey sıcaklığını ölçen 1 adet termokupulların uçları Omega firması tarafından üretilen (OMB-TEMPSCAN 1100) model ve 0.001°C hassasiyetinde ölçülerek kişisel bilgisayarda yine Omega firması tarafından geliştirilen Chart View grafik programı yardımıyla datalar anlık hem grafiksel olarak hemde nümerik olarak görüntülenebilmektedir. Ayrıca bu program yardımıyla termokupullardan alınan datalar(sıcaklık değerleri) text dosyalara kaydedilerek bilgisayarın sabit diskinde saklanmaktadır.

Isıtıcı ve soğutucu duvarlar arasına asılan akışkanın saydam bir akışkan olmasından dolayı, akışkan partikülünün hareketinin izlenebilmesi oldukça zordur. Nümerik ve deneysel olarak yüzey gerilim hareketi yapan silindirik konumda ki akışkanın yüzey sıcaklıkları sadece ve sadece rejim hali durum için yani osilasyona başlamadan önceki akış söz konusu olduğundan dolayı akışkanın osilasyonlu veya osilasyonsuz mu olduğunu çıplak gözle, akış görüntüleme ve microscope gibi sistemler yardımıyla bile gözlemlemek oldukça zordur. Bu nedenle akışkan içerisine 3 mikron çapında Al_2O_3 partikülleri ilave edilmiştir. Bu partiküllerin hareketleri yüzey gerilim hareketlerinin karakterini gösterir. Silindirik konumdaki akışkanın deney anında homojen bir yapıya sahip olmasından dolayı üç boyutlu akışkan hareketi meydana gelir. Bu boyutlardan radyal olanında akışkan partikülünün hareketi simetriden dolayı akışkanın her bölgesinde ve her açısında sabit kalmaktadır. Silindirik saydam akışkana, akışkanın merkezinden geçecek şekilde ve dalga boyu 630 - 670 nm olan kırmızı lazer ışığı uygulanarak lazer perdesi oluşturulmuştur. Lazer perdesi üzerindeki akış hareketinin rahatlıkla gözlenebilmesi ve rejim hali hareket eden akışkanın yüzey sıcaklıklarını ölçen termokupulların akışkana daldığı konumu izlemek için, perdeye dik olacak şekilde 'Western Electric' firması tarafından üretilen ve büyütme oranı 26 olan bir mikroskop yerleştirilmiştir. Bu mikroskop ile lazer perdesi üzerindeki 3 mikron çapındaki Al_2O_3 partiküllerinin izleri takip edilerek, akışkanın akış hareketinin kararlı Marangoni taşınım hareketinden periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım hareketine geçtiği noktaların dikkatle izlenmesi sağlanır.

Yüzey gerilim akış hareketlerinin karakterini belirleyen önemli parametrelerden biri de akışkanın boyutsal oranıdır. Bu boyutsal oran akışkan dikey yüksekliğinin akışkan çapına oranı olup akışkanın akış karakterinin değişim noktasını etkilemektedir. Nümerik çalışmada akışkanın boyutsal oranı sabit tutulduğu için (Nümerik çalışmada boyutsal oran, $A_r=0.5$) deneysel çalışmada da aynı boyutsal oran dikkate alınmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada yüzey gerilim hareketinde ki boyutsal oranın etkileri düşünülmemiştir. Deneysel çalışmalar esnasında akışkan yüksekliğinin hassas olarak ölçülmesi bu çalışmanın hassasiyetini belirlemektedir. Deney akışkanının dikey yüksekliği 0.01 mm hassasiyete sahip bir komparatör ile kalibre edilmiştir. Ayrıca

yüzev sıcaklığını ölçen termokupulların istenilen durumda yani dikey vaziyette ve bir eksen boyunca istenilen sıcaklık değerinin ölçülebilmesi için bir kızak boyunca dikey vaziyette hassas olarak ilerlemesini sağlamak için hem dikey hem de yatay konumda hareket edebilen bir düzenek hazırlanmış olup bu düzeneğin hassasiyeti ise mikron mertebesinde hareket edebilen mikrometreler sayesinde gerçekleştirilmektedir.

Denevler sabit ortam sıcaklığında ($T_R=+22^{\circ}\text{C}$ 'de) ve ortamın titreşimsiz olduğu anlarda gerçekleştirilmiştir.

4.3. Yöntem

Yukarıda bahsedildiği gibi; deney aparatları ve deney seti hazırlandıktan sonra deney aparatları ve cihazları teker teker çalıştırılır. Sabit sıcaklıkta tutulacak olan soğutucu sirkülasyon cihazı istenilen T_C sıcaklık değerine ayarlanır ve T_C sıcaklığının kararlı duruma gelmesi beklenir. İlk olarak; deney bölgesindeki akışkan yüksekliği akışkanın boyutsal oranına ($A_r=H/D=0.5$ için) uygun olarak 1 mm'ye komparatör ile ayarlanır. Boyutsal orana bağlı yükseklik ayarlandıktan sonra, akışkanın temizliği açısından ısıtıcı ve soğutucu bakır duvarların yüzeyleri etilalkol ile temizlenir. Etilalkolün kuruması için bir süre beklendikten sonra silindirik bakır çeper bir hava kompresörü ile tekrar temizlenir. Silindirik bakır duvarlar arasına asılan akışkanın yerçekiminden ve akışkanın ıslaklığından dolayı bazen alt bakır duvar üzerinden akışkan kayarak hacimsel olarak eksilirken, bazen de bu etkiler akışkanın kayarak tamamen yok olmasına sebep olmaktadır. Bunu önlemek amacıyla; soğutucu bakır duvarın radyal yüzeyine pamuklu kür ile 'Scotch-Gard' sıvı malzemesi sürülür. Sürülen malzeme kuruduktan sonra deney bölgesi hava kompresörü bir defa daha temizlenir. Akışkan, camdan yapılmış temiz bir enjektör ile silindirik bakır duvarlar arasına yerleştirilir. Akışkanın akış hareketinin rahat bir şekilde izlenebilmesi için eser miktarda Al_2O_3 partikülleri iğne ucu ile akışkana enjekte edilir. Akışkanın merkezinden geçecek şekilde lazer perdesi oluşturulur, daha sonra mikroskop akışkan perdesine odaklanır. Başlangıçta sıcak duvar sıcaklığı ($T_H= +30^{\circ}\text{C}$), ortam sıcaklığına ($T_R = +22^{\circ}\text{C}$) oldukça yakın bir değere sahiptir. Daha sonra sıcak duvar sıcaklığı güç kaynağı kullanılarak kademeli olarak sırasıyla 35°C , 30°C , 45°C , ve 50°C 'ye çıkarılır.

Deneylet aynı Şartlar altında uğer defa tektarlanır ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak, deneydeki akışkanın periyodik osilasyona başlama noktası bulunmuŐ olur.

5. SONUÇ

5.1. Nümerik Çalışma

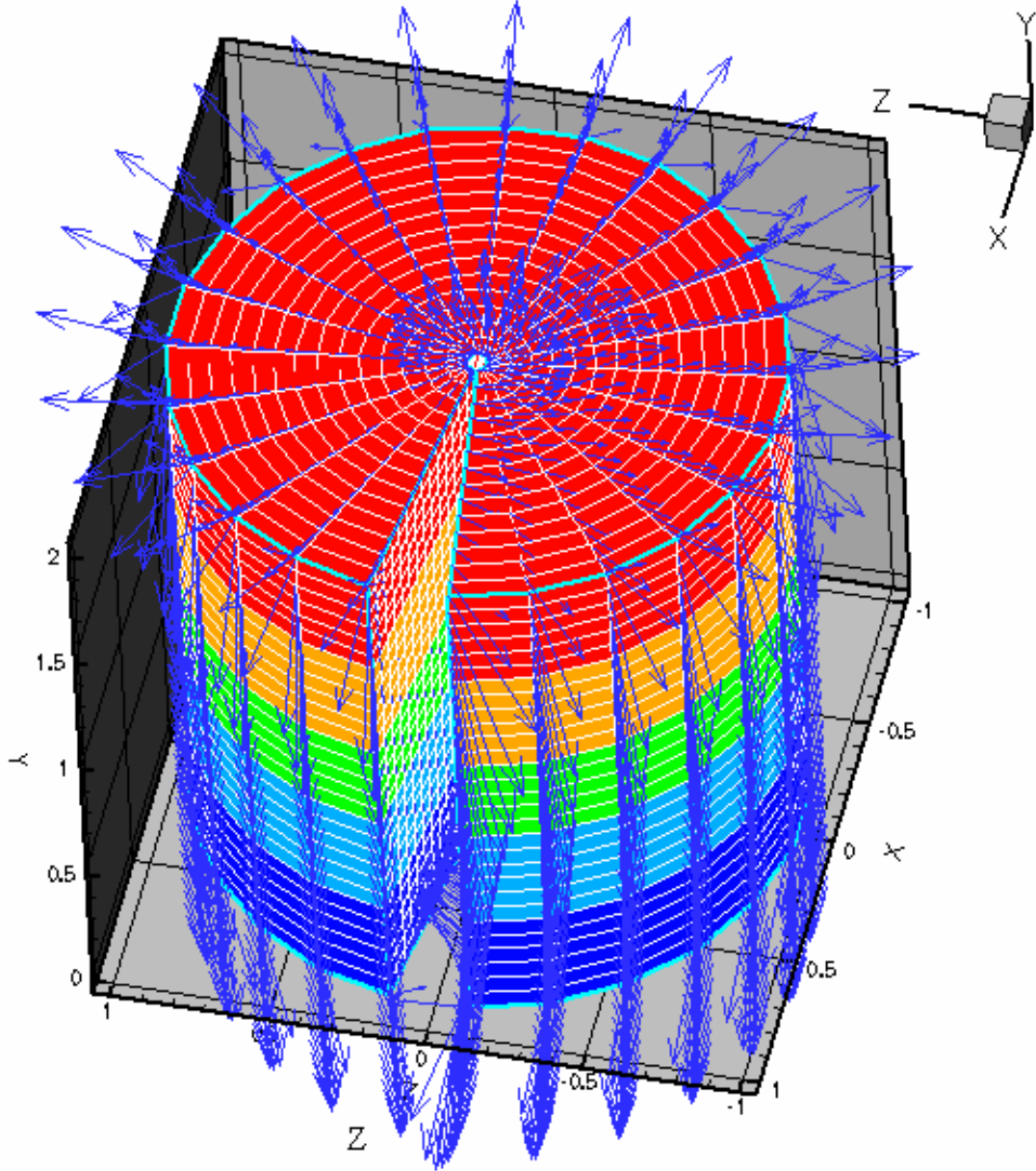
Bu bölümde, süreklilik denklemi, Navier-Stokes denklemleri ve enerji denklemlerinin Fortran programlama dilinde kodlanmış programın farklı sıcaklık değerleri için adım adım koşturulmasıyla elde edilen sonuçların Tecplot grafik çizim programı yardımıyla çizdirilen grafiklerinin incelemesi yapılacaktır.

5.1.1. Nümerik Modelin 3-D Simülasyonu

Normal şartlar altında (1 Bar basınç ve 25°C sıcaklık da) yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların nümerik olarak hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılabilmesi için nümerik hesaplamalardaki şartlar dikkate alınarak ortam sıcaklığının 25°C olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda çıkartılmıştır. Bu nümerik çalışmanın sonuçları ile bu çalışmayla birlikte yapılan deneysel çalışmaların sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel ve nümerik olarak yapılan çalışmada ortam sıcaklığı ile soğuk duvar sıcaklık değerleri aynı değerde tutularak akışkan yüzeyindeki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Yapılan bu çalışmada hem deneysel hem de nümerik olarak sıcak duvar sıcaklığı ile soğuk duvar sıcaklığı arasındaki fark $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$, 10°C , 15°C , 20°C , ve 25°C değerlerinde 3-D simülasyonları yapılmıştır. Bu yapılan simülasyonlar içerisinde sıcaklık farkı $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ 'deki yüzey gerilim hareketini gerçekleştiren akışkanın hız alanı Şekil 5.1.1.'de görülmektedir. Şekil dikkatlice incelenirse 3-D akışkan hacminin içerisinde bilgisayar yardımı ile bir dilim çıkartılarak bu dilim akışkan içerisindeki hız alanını da göstermek amaçlanmıştır.

Şekil 5.1.1'de silindirik konumda ki akışkanın serbest yüzeyi boyunca akış hızının değeri oldukça yüksektir. Bu silindirik akışkan iç kısımlara doğru radyal yönde katmanlar halinde incelendiğinde akışkanın serbest yüzeyinden içeriğe doğru kısımlarda hız vektörünün yönüde yukarıdan aşağıya olup şiddeti ise kademeye bağlı olarak azalmaktadır. Akışkanın serbest yüzeyinde ki hareket yüzey geriliminden

meydana gelmiş olup; bu hız değerinin ataleti ile birlikte iç kısımda ki katmanları etkileyerek simetriden dolayı hacimsel akış hareketinin gerçekleştirir.

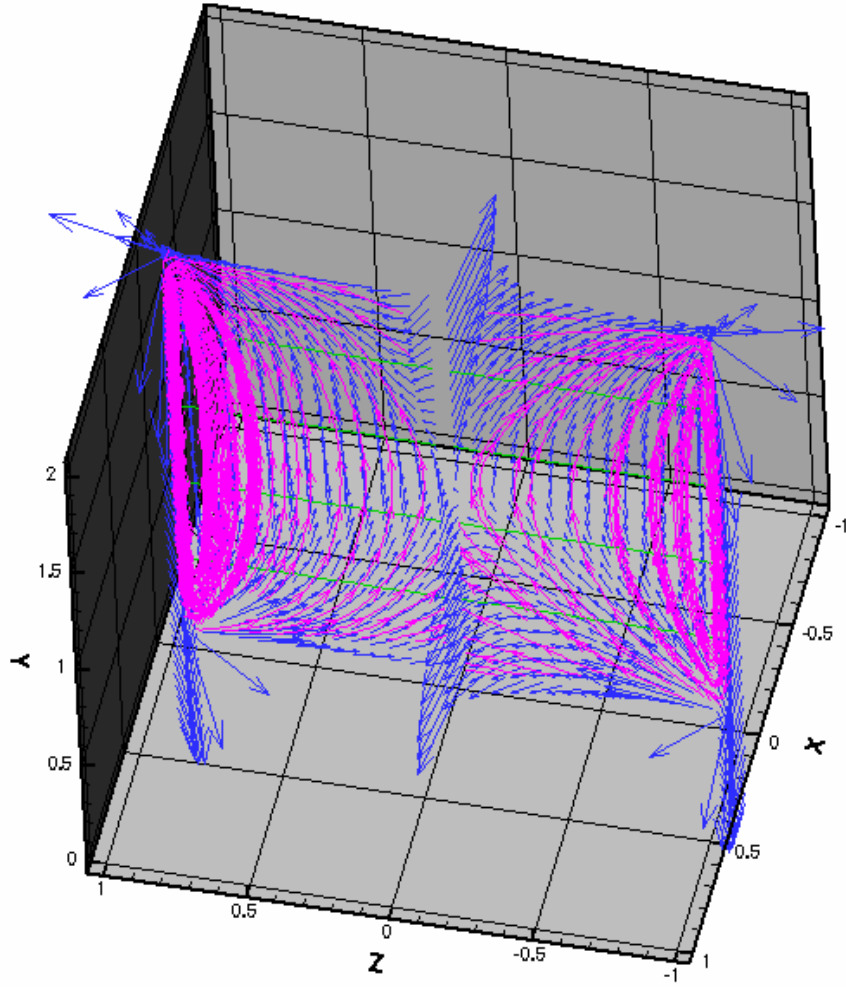


Şekil 5.1.1. Sıcaklık farkı $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ 'de 3-D sıcaklık dağılımı ve hız vektörleri grafiği

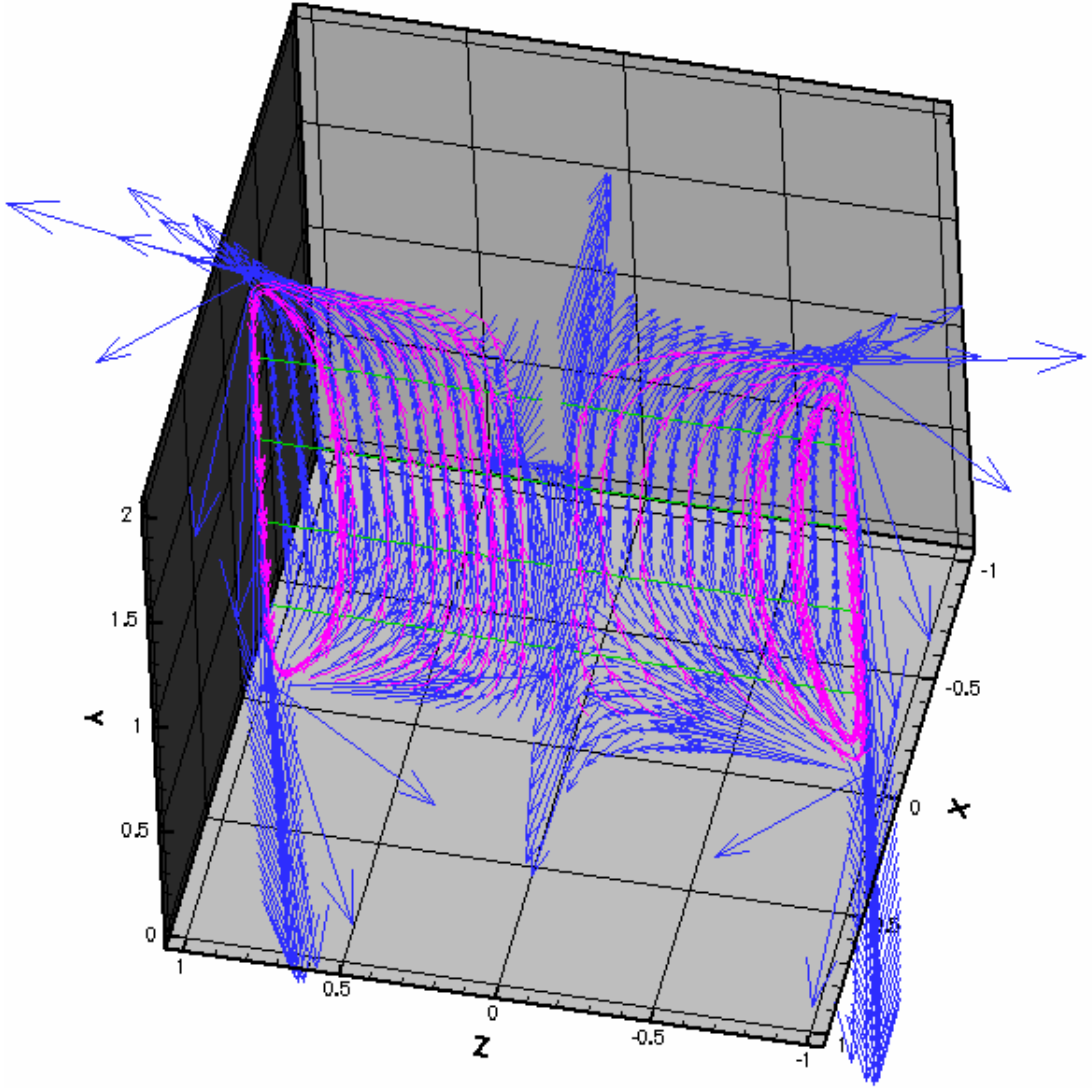
Yukarıda bahsedilen iç katmanlarda ki hız değişiminin değeri akışkan hareketi içerisindeki dairesel akış hücreleri birbirini kesmeden hareket ettiklerinden dolayı akış periyodu aynı olacağından dolayı akışkan partiküllerinin radyal yönde bulunduğu konuma bağlı olarak alınan yol ile hız arasındaki bağıntının ters orantılı olması münasebetiyle katmanlar arasında hız farkının oluşması dairesel akış hücrelerinin konumuna göre değişmesi doğal olmaktadır. Dairesel akış hücresinin çapı büyüdükçe akış hızı da büyük olmalı ki periyod sonunda farklı konumlarda ki akış partikülleri aynı konuma ulaşmış olmaları gerekmektedir. Bu durum ise aşağıda bölüm 5.1.2’de gösterilen şekillerde ki hız vektörlerinden de anlaşılmaktadır. Bu hız vektörleri ile akış ipçikleri arasındaki bağıntı aşağıdaki paragrafta izah edilecektir.

5.1.2. Akış İpçikleri (Streamlines) ve Hız Vektörler

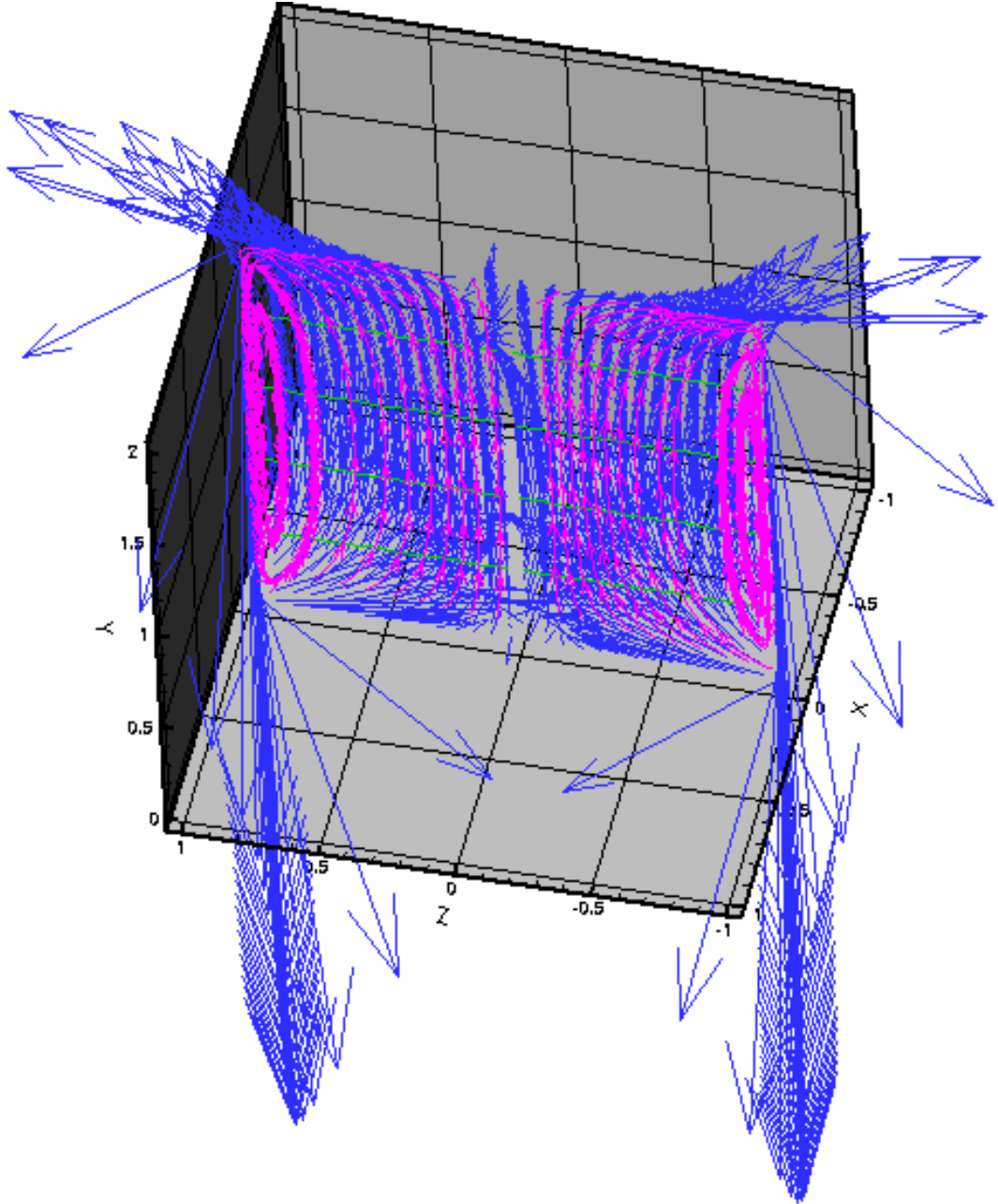
Önceki paragrafta 3-D boyutlu izah edilen hız vektörleri ile akış ipçikleri arasındaki bağıntı 2-D olarak ele alınarak; eksenal yöndeki düzlem bir yüzey üzerine düşen hız vektörlerinin değerleri ve akış ipçikleri(streamlines) görülmektedir. Bu bölümde ise soğuk duvar sıcaklığı sabit tutulmak şartı ile çeşitli sıcaklık farkı değerleri $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$, 10°C , 15°C , 20°C , ve 25°C ’de ki akış ipçikleri görülmektedir. Sıcaklık farkı, $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ ’deki akışkan hareketinin hız vektörleri ile birlikte akış ipçiklerinin 2-D görünüşü Şekil 5.1.2.a’daki gibidir. Sıcaklık farkı $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ ’deki 2-D hız vektörleri ile akış ipçikleri Şekil 5.1.2.b’de görülmektedir. Bu şekil ve diğer Şekil 5.1.2.c ve Şekil 5.1.2.d şekilleri biri diğerine göre karşılaştırıldığında; sıcaklık farkı değeri arttıkça hız vektörlerinin şiddeti de artmaktadır. Bu ise; akışkanın termal yüzey gerilim katsayısının değeri sıcaklık farkı değeri arttıkça artacağından dolayı akışkan hareketinin hızı artmaktadır. Bu artış değerleri Şekil 5.1.2.a, Şekil 5.1.2.b, Şekil 5.1.2.c ve Şekil 5.1.2.d ayrı ayrı karşılaştırıldığında görülmektedir. Ayrıca bu şekiller birbiriyle karşılaştırıldığında sıcaklık farkı değerine bağlı olarak birim yüzey üzerinde ki vektör yoğunluğu da değişmektedir. Sıcaklık farkı değeri arttıkça birim alan üzerine düşen vektör sayısı da artmaktadır. Vektör sayısının artışı Şekil 5.1.2.a, Şekil 5.1.2.b, Şekil 5.1.2.c ve Şekil 5.1.2.d’de görülmektedir. Sıcaklık farkı değerinin yüzey gerilim hareketine çok hassas bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir.



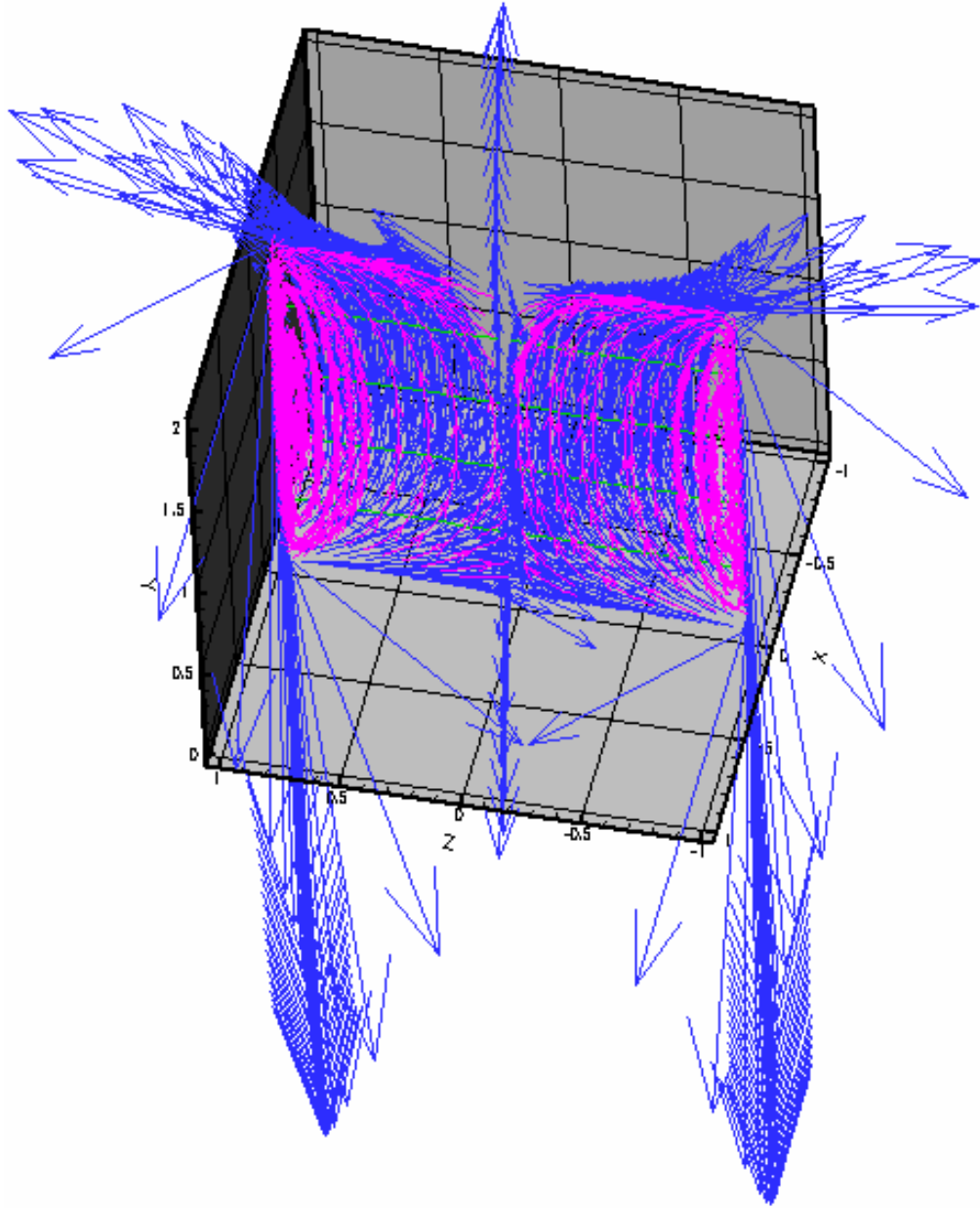
Şekil 5.1.2.a. Akışkanın hareketindeki hız vektörlerinin $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ 'de 2-D olarak görünüşü



Şekil 5.1.2.b. Akışkanın hareketindeki hız vektörlerinin $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ 'de 2-D olarak görünüşü



Şekil 5.1.2.c. Akışkanın hareketindeki hız vektörlerinin $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ 'de 2-D olarak görünüşü



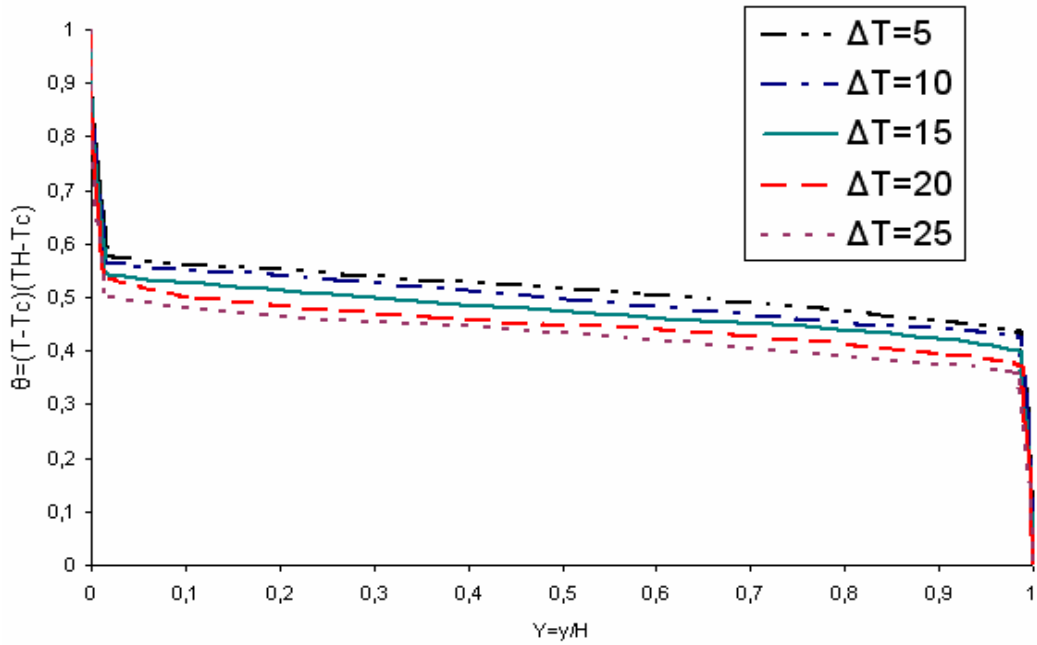
Şekil 5.1.2.d. Akışkanın hareketindeki hız vektörlerinin $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ 'de 2-D olarak görünüşü

Silindirik konumda dikey vaziyetteki akışkanına uygulanan sıcaklık farkı nedeniyle meydana gelen yüzey gerilim hareketi yukarıda bahsedilen şekliyle hareket etmektedir. Bu hareket genel olarak zamandan bağımsız olarak gerçekleşmektedir. Bu hareketi biz rejim hali (kararlı) yüzey gerilim hareketi olarak isimlendiririz. Böyle bir hareket esnasında nümerik olarak hesaplanan yüzey sıcaklığının değeri de dikey vaziyette (eksenel olarak) incelenmiştir. Nümerik olarak hesaplanan bu

sıcaklık değerleri Ek-1’de verilmiştir. Bu incelemenin sonucu ise aşağıda Bölüm 5.1.3’de izah edilmiştir.

5.1.3. Yüzey Sıcaklıkları

Soğuk duvar ile sıcak duvar arasındaki sıcaklık farkının $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$, 10°C , 15°C , 20°C ve 25°C değerleri için akışkanın normalleştirilmiş (boyutsuz) yüzey sıcaklık eğrileri Şekil 5.1.3.’de görülmektedir.



Şekil 5.1.3. Nümerik çalışma sonucunda farklı sıcaklık farklarındaki akışkanın yüzey sıcaklık profilinin grafiği

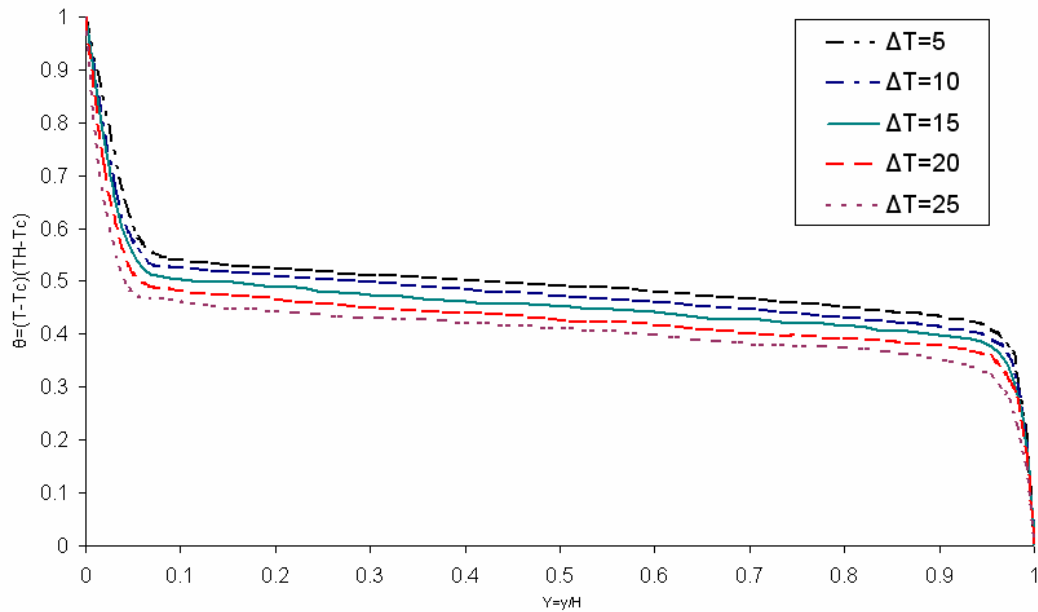
Soğuk duvar sıcaklığı sabit kalmak şartı ile farklı sıcaklık farkı değerlerinde 3-D akışkan modeli hazır bulunan programda koşturularak elde edilen hız vektörleri, akış ipçikleri ile birlikte elde edilen çözümdeki değerler kullanılarak akışkanın her noktası ve pozisyonundaki noktasal, çizgisel ve bölgesel sıcaklık değerleri de hesaplanabilmektedir. Nümerik olarak hesaplanan yüzey sıcaklık değerlerinin doğruluğunu sadece deneysel çalışma sonucunda yüzey sıcaklık değerleri ile karşılaştırma imkanı var olması bizi sınırlandırmaktadır. Dolayısıyla deneysel çalışma sonucunda 3-D akış hareketini bozmadan akışkanın yüzey sıcaklık değerleri

hassas ve mümkün olduğunca küçük boyutlarda termokupullarla ölçülerek karşılaştırma yapılabilmektedir. Bu sınırlama dikkate alınarak nümerik ve deneysel yüzey sıcaklık değerleri karşılaştırılacaktır.

Akışkan yüzeyinin ortalama sıcaklığı, ısıtıcı duvar ile soğutucu duvarın aritmetik ortalaması olduğunu düşünecek olursak; sıcaklık farkı değeri ΔT arttıkça akışkanın serbest yüzeyinin ortalama sıcaklığının da artacağından dolayı ortalama akışkan sıcaklığı yüksek olan değerden ortama olan ısı kaybı da artacaktır. Bu ortama olan ısı kaybının artması nedeniyle soğuk duvar ile sıcak duvar arasındaki farkın büyümesi ile yüzey sıcaklığı değerleri de düşmektedir. Bu ifadeler Şekil 5.1.3.'de grafik üzerinde görülmektedir.

5.2. Deneysel Çalışma

Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Microgravity laboratuvarlarında oluşturulan deney düzeneğinde, sabit ortam sıcaklığında ($T_R=+22^\circ\text{C}$ 'de) ve ortamın titreşimsiz olduğu anlarda gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları bu bölümde irdelenmiştir.

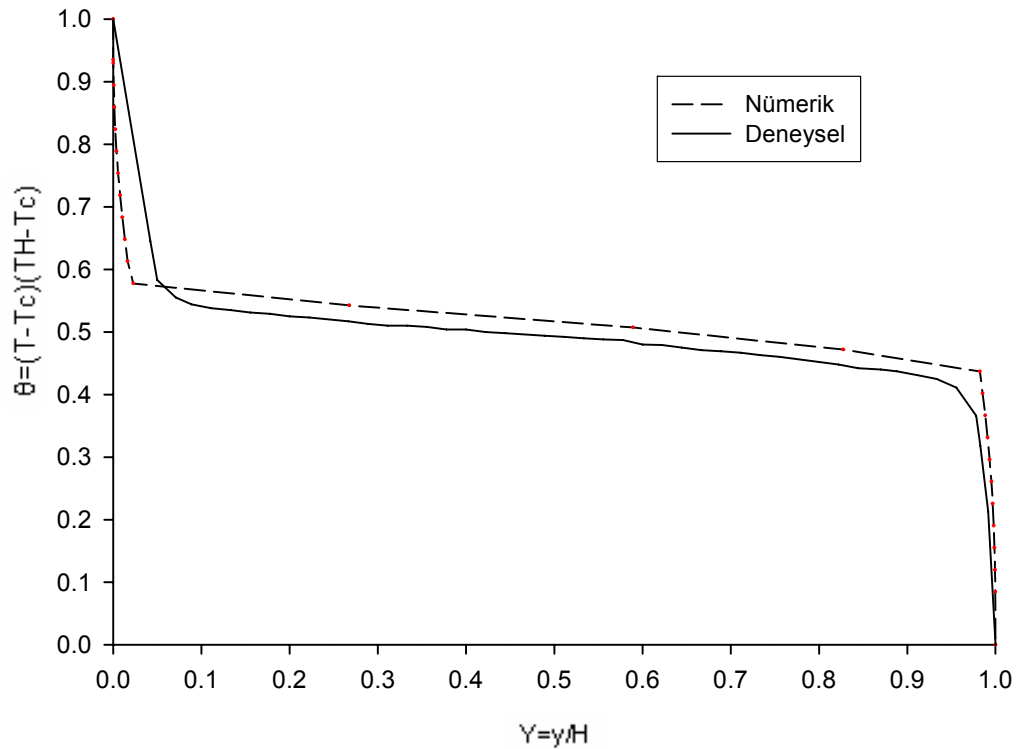


Şekil 5.2. Deneysel çalışma sonucunda farklı sıcaklık farklarındaki akışkanın yüzey sıcaklık profilinin grafiği

Dikey vaziyetteki akışkanın yüzey sıcaklığı termokupl yardımıyla sıcak bölge $Y=0$ kabul edilerek aşağıya doğru 0,005mm aralıklarla akışkanın serbest yüzeyi yukarıdan aşağıya kadar taranarak yüzey sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Soğuk duvar ile sıcak duvar arasındaki sıcaklık farkının $\Delta T=5^\circ\text{C}$, 10°C , 15°C , 20°C ve 25°C değerleri için elde edilen sıcaklık değerlerinin normalleştirilmiş (boyutsuz) yüzey sıcaklık değerlerine göre çizilen yüzey sıcaklık eğrileri Şekil 5.2.'de görülmektedir. Ayrıca bu elde edilen değerler Ek-2'de verilmiştir.

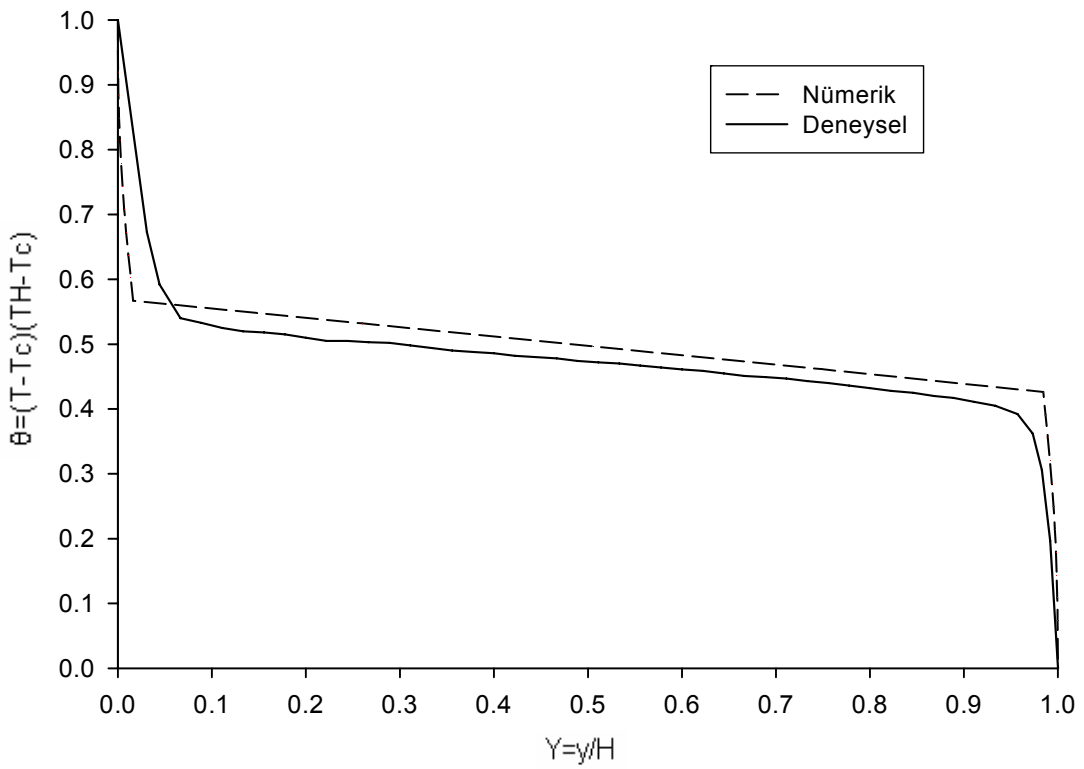
5.3. Yüzey Sıcaklıklarının Karşılaştırılması

Yapılan nümerik çalışmada elde edilen yüzey sıcaklıklarının dağılımı ile Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Microgravity laboratuvarlarında yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

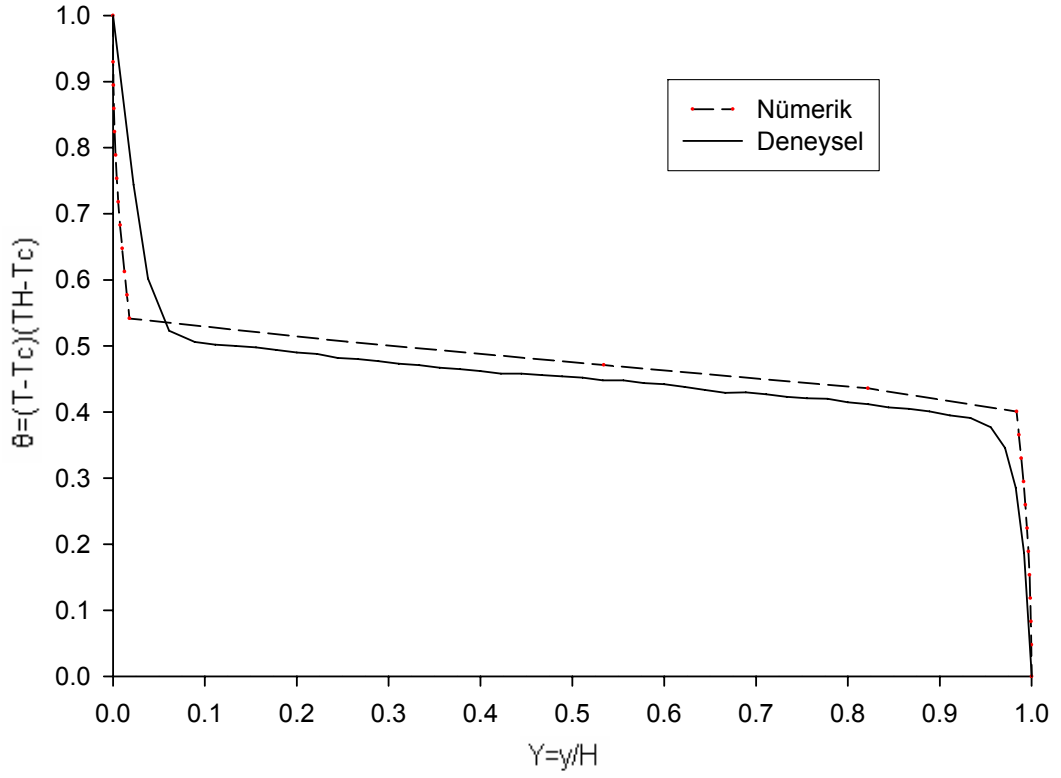


Şekil 5.3.1. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

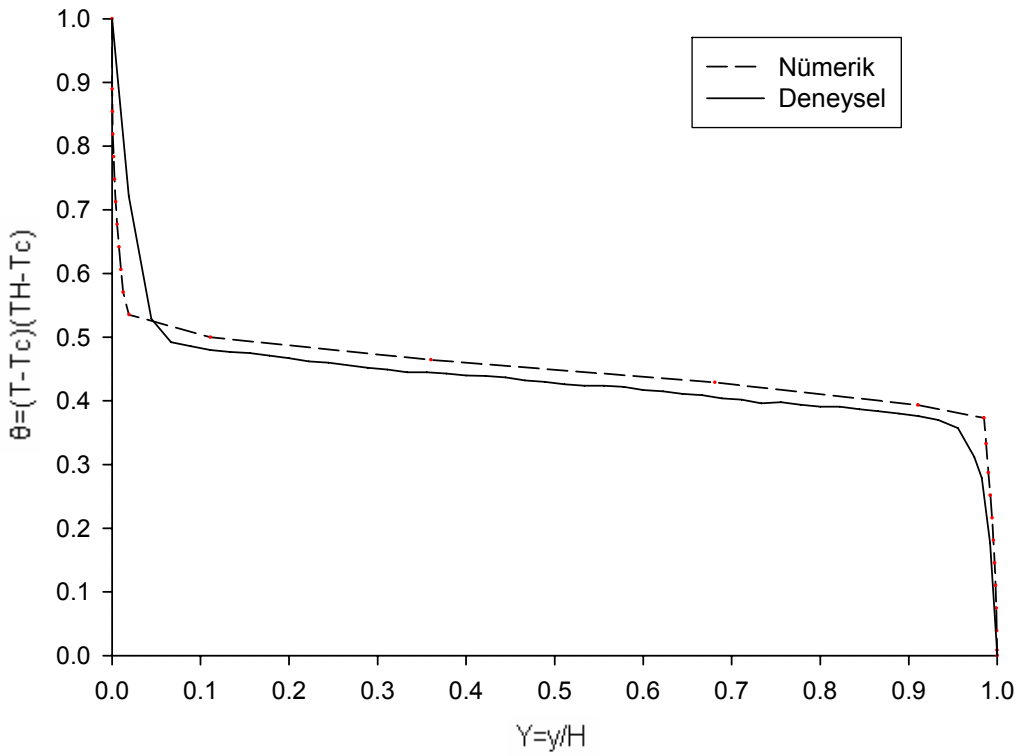
Deney odasının ortam sıcaklığı 22°C civarında olduğu ve bu değere yakın sıcaklık değerine sahip soğuk duvar sıcaklığı (25°C) ile soğuk duvar ile sıcak duvar arasındaki fark 5°C, 10°C, 15°C 20°C ve 25°C olduğu şartlarda ki akışkanın nümerik ve deneysel çalışmalardaki yüzey sıcaklıkları karşılaştırılmalı olarak Şekil 5.3.1, Şekil 5.3.2, Şekil 5.3.3, Şekil 5.3.4 ve Şekil 5.3.5’de görülmektedir.



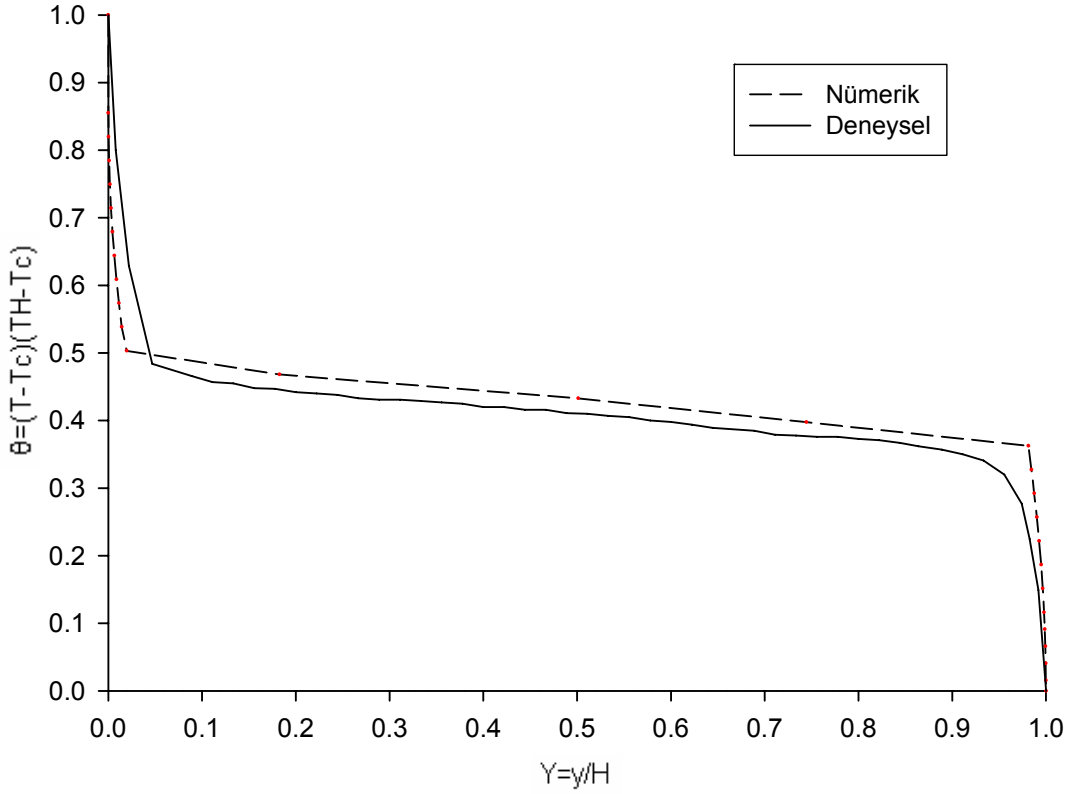
Şekil 5.3.2. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.3.3. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması



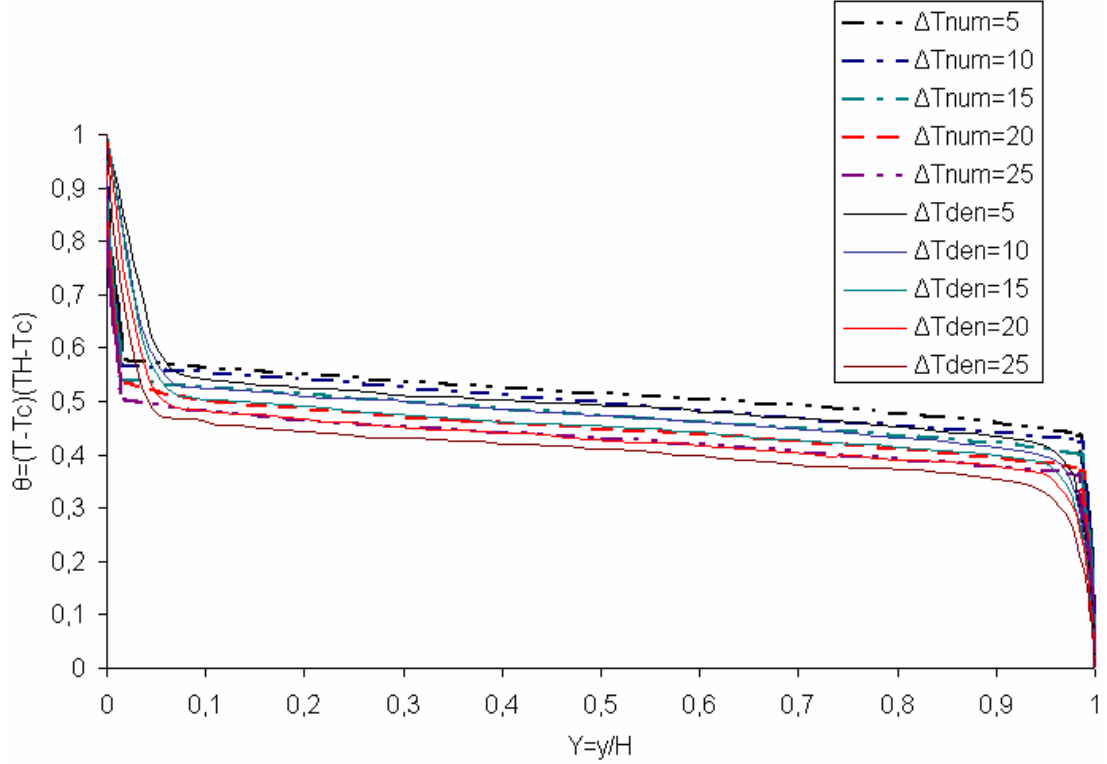
Şekil 5.3.4. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.3.5. Akışkanın yüzey sıcaklığındaki sıcaklık profilinin $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ 'deki nümerik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Nümerik çalışmada ki yüzey sıcaklıkları ile deneysel çalışmada ki yüzey sıcaklıklarının birbirine paralel olduğu fakat aynı olmadıkları görülmektedir. Aynı sıcaklık değerlerinin kullanılmasına rağmen deneysel çalışmadaki yüzey sıcaklık değerleri nümerik çalışmadaki sıcaklık değerlerinin genelde altına düşmektedir. Deneysel çalışmadaki değerlerin nümerik çalışmadaki değerlerin altında olmasının başlıca sebebi deneysel çalışmada ortam sıcaklığının nümerik çalışmada ki ortam sıcaklığının (25°C) altında olmasıdır. Ayrıca yüzey sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan termokupul mecburen sıvının içine biraz (termokupulun sıcaklığı ölçen başı sıvıya gömülecek kadar) batırılmaktadır. Bundan dolayı termokupul dış yüzey sıcaklığı ile dış yüzeye yakın bölgenin sıcaklıklarını ortalamasını ölçmektedir. En üst bölgelerde ki fark, ısısal sınır tabaka kalınlığının sıcaklığın fonksiyonu olması sebebiyle deney anında akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybı ve akışkanın fiziksel özelliği olan kinematik viskozitesinin sıcaklığının ani düşmesi nedeniyle oluşan viskozite değişimi viskoz sınır tabaka kalınlığında değişmesine sebebiyet vermesinden kaynaklanmaktadır. En alt bölgelerde ki farkın üst

bölgelerdekine göre nispeten fazla olmasının sebebi ise, yukarıdaki nedenlere ilave olarak yerçekimi vektörünün meydana getirmiş olduğu body kuvvetinin etkisinin eklenmiş olmasından dolayıdır. Ayrıca yerçekim kuvvetinin etkisinden dolayı akışkan yüzeyinde bir miktar bozulma olmaktadır.



Şekil 5.3.6. Nümerik ve Deneysel çalışma sonucunda farklı sıcaklık farklarındaki akışkanın yüzey sıcaklık profilinin grafiği

KAYNAKLAR

Chen, Q.S. ve Hu, W.R., 1996, Numerical investigation on a simulation model of floating zone convection, *Int. Jour. of Heat Transfer*, p. 757.

Kamotani, Y., Wang, Ş., Hatta, S., Selver, R., ve Yoda, S., 2001, Effect of free surface heat transfer on onset of oscillatory thermocapillary flow of high Prandtl number fluid, *J. Jpn. Microgravity Appl.*, Vol. 18, No. 4, p. 283

Levich, V. G., 1962, "Physicochemical Hydrodynamics", Prentice-Hall Inc., p. 372.

Levich, V. G, Krylov, V. S., 1969, Surface tension driven phenomena, *Ann. Rev. Fluid Mec.*, p. 293.

Monti, R., Savino, R., ve Lapa, M., 1998, Oscillatory thermocapillary flows in simulated floating-zones with time-dependent temperature boundary conditions, *Acta Astronautica*, p. 863.

Monti, R., Savino, R., ve Lapa, M., 2000, Influence of geometrical aspect ratio on the oscillatory Marangoni convection in liquid bridges, *Acta Astronautica*, p. 753.

Ostrach, S., 1977, Motion induced by capillarity, *Physicochem. Hydrodyn.*, p. 571.

Ostrach, S., 1979, Convection due to surface-tension gradients, *COSPAR, Space Research*, p. 563.

Ostrach, S., 1982, Low-gravity fluid flows, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, p. 313.

Rohsenow, W. M., Hartneft, J. P., Cho, Y. I., 1998, *Henbook of heat transfer*, USA.

Sağlam A., Özek N. ve Selver, R., 2004, Yüzen bölge konfigürasyonunda kararlı Marangoni konveksiyondan osilasyonlu Marangoni konveksiyona geçişi üzerine deneysel bir çalışma, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 19, No:2, p. 225.

Scriven, L. E., Sternling, C. V., 1960, The Marangoni effects, Nature, p. 186.

Selver, R. ve Uguz, N., 2004, Esnek bölge konfigürasyonunda yüzey gerilimi ile meydana gelen taşınımlı akışın deneysel incelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 19, No:3, p. 295.

Shevtsova, V.M., Melkinov, D.E., ve Legros, J.C., 2001, Three-dimensional simulations of hydrodynamic instability in liquid bridges: Influence of temperature-dependent viscosity, Physics of Fluids, p. 2815.

Zeng, Z., Mizuseki, H., Higashino, K., ve Kawazoe, Y., 1999, Direct numerical simulation of oscillatory Marangoni convection in cylindrical liquid bridges, Journal of Crystal Growth, p. 395.

Zeng, Z., Mizuseki, H., Simamura, K., Fukuda, T., Higashino, K., ve Kawazoe, Y., 2001, Three-dimensional oscillatory thermocapillary convection in liquid bridge under microgravity, Int. Jour. of Heat Transfer, p. 3765.

NÜMERİK ÇALIŞMANIN VERİLERİ

$\Delta T = 5^\circ\text{C}$ 'deki nümerik çalışmanın verileri

Grid_No	Gridlerin Sıcaklık Farkı Değerleri(ΔT_g)	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$	Eksenel Yöndeki Mesafe(y)	$Y = \frac{y}{H}$
1	0.129995	1	0	0
2	0.121518	0.934785	0.000291	0.000145
3	0.120840	0.929571	0.000958	0.000479
4	0.116262	0.894356	0.002098	0.001049
5	0.111684	0.859141	0.003801	0.001901
6	0.107106	0.823926	0.006156	0.003078
7	0.102529	0.788712	0.009251	0.004626
8	0.097951	0.753497	0.013129	0.006564
9	0.093373	0.718282	0.017784	0.008892
10	0.088795	0.683067	0.023158	0.011579
11	0.084218	0.647853	0.029105	0.014553
12	0.079640	0.612638	0.039442	0.019721
13	0.075062	0.577423	0.365252	0.182626
14	0.070484	0.542208	1.002253	0.501127
15	0.065907	0.506994	1.488887	0.744443
16	0.061329	0.471779	1.962355	0.981178
17	0.056751	0.436564	1.968786	0.984393
18	0.052174	0.401349	1.974939	0.987469
19	0.047596	0.366135	1.980579	0.990290
20	0.043018	0.330920	1.985534	0.992767
21	0.038440	0.295705	1.989706	0.994853
22	0.033863	0.260491	1.993073	0.996537
23	0.029285	0.225276	1.995668	0.997834
24	0.024707	0.190061	1.997560	0.998780
25	0.020129	0.154846	1.998844	0.999422
26	0.015552	0.119632	1.999617	0.999808
27	0.010974	0.084417	1.999795	0.999898
28	0.006396	0.049202	1.999974	0.999987
29	0	0	2	1

$\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ 'deki nümerik çalışmanın verileri

Grid_No	Gridlerin Sıcaklık Farkı Değerleri(ΔT_g)	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$	Eksenel Yöndeki Mesafe(y)	$Y = \frac{y}{H}$
1	0.120890	1	0	0
2	0.115420	0.954749	0.000291	0.000145
3	0.111158	0.919498	0.000958	0.000479
4	0.106897	0.884246	0.002098	0.001049
5	0.102635	0.848995	0.003801	0.001901
6	0.098374	0.813744	0.006156	0.003078
7	0.094112	0.778493	0.009251	0.004626
8	0.089851	0.743242	0.013129	0.006564
9	0.085589	0.707991	0.017784	0.008892
10	0.081328	0.672740	0.023158	0.011579
11	0.077066	0.637488	0.029105	0.014553
12	0.072805	0.602237	0.039442	0.019721
13	0.068543	0.566986	0.365252	0.182626
14	0.064282	0.531735	1.002253	0.501127
15	0.060020	0.496484	1.488887	0.744443
16	0.055758	0.461232	1.962355	0.981178
17	0.051497	0.425981	1.968786	0.984393
18	0.047235	0.390730	1.974939	0.987469
19	0.042974	0.355479	1.980579	0.990290
20	0.038712	0.320228	1.985534	0.992767
21	0.034451	0.284977	1.989706	0.994853
22	0.030189	0.249726	1.993073	0.996537
23	0.025928	0.214474	1.995668	0.997834
24	0.021666	0.179223	1.997560	0.998780
25	0.017405	0.143972	1.998844	0.999422
26	0.013143	0.108721	1.999617	0.999808
27	0.008882	0.073470	1.999795	0.999898
28	0.005700	0.047147	1.999974	0.999987
29	0	0	2	1

$\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$ 'deki nümerik çalışmanın verileri

Grid_No	Gridlerin Sıcaklık Farkı Değerleri(ΔT_g)	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$	Eksenel Yöndeki Mesafe(y)	$Y = \frac{y}{H}$
1	0.129018	1	0	0
2	0.119950	0.929716	0.000291	0.000145
3	0.115398	0.894432	0.000958	0.000479
4	0.110846	0.859149	0.002098	0.001049
5	0.106294	0.823865	0.003801	0.001901
6	0.101741	0.788581	0.006156	0.003078
7	0.097189	0.753297	0.009251	0.004626
8	0.092637	0.718014	0.013129	0.006564
9	0.088085	0.682730	0.017784	0.008892
10	0.083532	0.647446	0.023158	0.011579
11	0.078980	0.612162	0.029105	0.014553
12	0.074428	0.576879	0.039442	0.019721
13	0.069876	0.541595	0.365252	0.182626
14	0.065323	0.506311	1.002253	0.501127
15	0.060771	0.471027	1.488887	0.744443
16	0.056219	0.435744	1.962355	0.981178
17	0.051667	0.400460	1.968786	0.984393
18	0.047114	0.365176	1.974939	0.987469
19	0.042562	0.329892	1.980579	0.990290
20	0.038010	0.294609	1.985534	0.992767
21	0.033458	0.259325	1.989706	0.994853
22	0.028905	0.224041	1.993073	0.996537
23	0.024353	0.188757	1.995668	0.997834
24	0.019801	0.153474	1.997560	0.998780
25	0.015249	0.118190	1.998844	0.999422
26	0.010696	0.082906	1.999617	0.999808
27	0.006144	0.047622	1.999795	0.999898
28	0.003682	0.028541	1.999974	0.999987
29	0	0	2	1

$\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ 'deki nümerik çalışmanın verileri

Grid_No	Gridlerin Sıcaklık Farkı Değerleri(ΔT_g)	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$	Eksenel Yöndeki Mesafe(y)	$Y = \frac{y}{H}$
1	0.124279	1	0	0
2	0.110553	0.889559	0.000291	0.000145
3	0.106149	0.854118	0.000958	0.000479
4	0.101744	0.818677	0.002098	0.001049
5	0.097339	0.783236	0.003801	0.001901
6	0.092935	0.747795	0.006156	0.003078
7	0.088530	0.712353	0.009251	0.004626
8	0.084126	0.676912	0.013129	0.006564
9	0.079721	0.641471	0.017784	0.008892
10	0.075317	0.606030	0.023158	0.011579
11	0.070912	0.570589	0.029105	0.014553
12	0.066507	0.535148	0.039442	0.019721
13	0.062103	0.499707	0.365252	0.182626
14	0.057698	0.464266	1.002253	0.501127
15	0.053294	0.428825	1.488887	0.744443
16	0.048889	0.393384	1.962355	0.981178
17	0.046349	0.372942	1.968786	0.984393
18	0.041323	0.332501	1.974939	0.987469
19	0.035675	0.287060	1.980579	0.990290
20	0.031271	0.251619	1.985534	0.992767
21	0.026866	0.216178	1.989706	0.994853
22	0.022462	0.180737	1.993073	0.996537
23	0.018057	0.145296	1.995668	0.997834
24	0.013653	0.109855	1.997560	0.998780
25	0.009248	0.074414	1.998844	0.999422
26	0.004843	0.038973	1.999617	0.999808
27	0.001060	0.008532	1.999795	0.999898
28	0.001033	0.008311	1.999974	0.999987
29	0	0	2	1

$\Delta T = 25^{\circ}\text{C}$ 'deki nümerik çalışmanın verileri

Grid_No	Gridlerin Sıcaklık Farkı Değerleri(ΔT_g)	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$	Eksenel Yöndeki Mesafe(y)	$Y = \frac{y}{H}$
1	0.125488	1	0	0
2	0.107270	0.854829	0.000291	0.000145
3	0.102857	0.819658	0.000958	0.000479
4	0.098443	0.784487	0.002098	0.001049
5	0.094030	0.749316	0.003801	0.001901
6	0.089616	0.714144	0.006156	0.003078
7	0.085203	0.678973	0.009251	0.004626
8	0.080789	0.643802	0.013129	0.006564
9	0.076376	0.608631	0.017784	0.008892
10	0.071962	0.573460	0.023158	0.011579
11	0.067549	0.538289	0.029105	0.014553
12	0.063135	0.503118	0.039442	0.019721
13	0.058722	0.467947	0.365252	0.182626
14	0.054308	0.432776	1.002253	0.501127
15	0.049894	0.397605	1.488887	0.744443
16	0.045481	0.362434	1.962355	0.981178
17	0.041067	0.327262	1.968786	0.984393
18	0.036654	0.292091	1.974939	0.987469
19	0.032240	0.256920	1.980579	0.990290
20	0.027827	0.221749	1.985534	0.992767
21	0.023413	0.186578	1.989706	0.994853
22	0.019000	0.151407	1.993073	0.996537
23	0.014586	0.116236	1.995668	0.997834
24	0.011427	0.091065	1.997560	0.998780
25	0.008269	0.065894	1.998844	0.999422
26	0.005110	0.040723	1.999617	0.999808
27	0.001952	0.015551	1.999795	0.999898
28	0.001099	0.008754	1.999974	0.999987
29	0	0	2	1

DENEYSEL ÇALIŞMANIN VERİLERİ $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ 'deki deneysel çalışmanın verileri

S_No	Ch1(Th)	Ch2(Tc)	Ch3(T)	Ch4(Tr)	$Y = \frac{y}{H}$	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$
1	30.33636	25.40000	28.58484	21.36364	0.04200	0.64518
2	30.41818	25.40909	28.32939	21.49091	0.05600	0.58300
3	30.46363	25.40000	28.21031	21.18182	0.07100	0.55500
4	30.55455	25.42727	28.21651	21.51818	0.08889	0.54400
5	30.56364	25.46363	28.20744	21.67273	0.11111	0.53800
6	30.68182	25.42727	28.23845	21.56364	0.13333	0.53500
7	30.68182	25.44545	28.22596	21.59091	0.15556	0.53100
8	30.60000	25.47272	28.18505	21.66364	0.17778	0.52900
9	30.48182	25.46363	28.09818	21.61818	0.20000	0.52500
10	30.44545	25.46364	28.06913	22.01818	0.22222	0.52300
11	30.33636	25.46364	27.99745	21.59091	0.24444	0.52000
12	30.30909	25.48182	27.97752	21.68182	0.26667	0.51700
13	30.28182	25.48182	27.94422	21.98182	0.28889	0.51300
14	30.23636	25.49091	27.91109	21.73636	0.31111	0.51000
15	30.14546	25.49091	27.86473	21.10909	0.33333	0.51000
16	30.06364	25.48182	27.80938	21.35455	0.35556	0.50800
17	30.09091	25.48182	27.80480	21.63636	0.37778	0.50400
18	30.20000	25.44545	27.84174	21.04545	0.40000	0.50400
19	30.29091	25.48182	27.88637	21.63636	0.42222	0.50000
20	30.44545	25.47272	27.94914	21.40000	0.44444	0.49800
21	30.29091	25.50000	27.87629	21.56364	0.46667	0.49600
22	30.24546	25.50000	27.84426	21.37273	0.48889	0.49400
23	30.24545	25.50000	27.83476	21.56364	0.51111	0.49200
24	30.27273	25.51818	27.84791	21.28182	0.53333	0.49000
25	30.34545	25.48182	27.85527	21.83636	0.55556	0.48800
26	30.40909	25.50000	27.89073	21.53636	0.57778	0.48700
27	30.48182	25.49091	27.88655	21.55454	0.60000	0.48000
28	30.52727	25.53637	27.92701	21.60909	0.62222	0.47900
29	30.52727	25.52728	27.90228	21.91818	0.64444	0.47500
30	30.54546	25.50909	27.88122	21.64545	0.66667	0.47100
31	30.62728	25.53637	27.92401	21.28182	0.68889	0.46900
32	30.55455	25.55455	27.88955	21.56364	0.71111	0.46700
33	30.19091	25.26364	27.54497	21.40909	0.73333	0.46300
34	30.50000	25.51818	27.80982	21.82727	0.75556	0.46000
35	30.46364	25.51818	27.77331	21.84545	0.77778	0.45600
36	30.51818	25.55455	27.79811	21.62727	0.80000	0.45200
37	30.50909	25.57273	27.78422	21.73636	0.82222	0.44800
38	30.50909	25.53637	27.73431	21.52727	0.84444	0.44200
39	30.54545	25.56364	27.75564	21.47273	0.87000	0.44000
40	30.40909	25.56364	27.68110	21.25455	0.88800	0.43700
41	30.43636	25.56364	27.66378	21.58182	0.91111	0.43100
42	30.42727	25.58182	27.64114	21.70000	0.93333	0.42500
43	30.41818	25.57273	27.56421	21.61818	0.95556	0.41100
44	30.44545	25.55455	27.34462	21.51818	0.97800	0.36600
45	30.33636	25.58182	27.09376	21.66364	0.98278	0.31800
46	30.30909	25.60000	26.60115	21.56364	0.99178	0.21260
47	30.32727	25.59091	25.59091	21.30909	1.00000	0.00000

$\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 'deki deneysel çalışmanın verileri

S_No	Ch1(Th)	Ch2(Tc)	Ch3(T)	Ch4(Tr)	$Y = \frac{y}{H}$	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$
1	35.2818	25.10909	31.95534	22.10909	0.02174	0.67300
2	35.1636	25.12728	31.06881	22.16364	0.04348	0.59200
3	35.1455	25.09091	30.47009	21.99091	0.06522	0.53500
4	35.0909	25.10000	30.37520	22.57273	0.08696	0.52800
5	35.0546	25.09091	30.32182	21.92727	0.10870	0.52500
6	35.1091	25.08182	30.29601	22.04545	0.13043	0.52000
7	35.1727	25.10000	30.31767	22.36363	0.15217	0.51800
8	35.0909	25.08182	30.23650	22.08182	0.17391	0.51500
9	35.1	25.09091	30.19555	22.28182	0.19565	0.51000
10	35.12727	25.07273	30.15027	21.87273	0.21739	0.50500
11	35.19091	25.08182	30.18691	22.26364	0.23913	0.50500
12	35.10000	25.14545	30.15259	22.46364	0.26087	0.50300
13	35.20909	25.09091	30.17024	22.54545	0.28261	0.50200
14	35.20000	25.10909	30.13436	22.41818	0.30435	0.49800
15	35.25455	25.04545	30.08875	22.61818	0.32609	0.49400
16	35.15454	25.07273	30.01282	22.19091	0.34783	0.49000
17	35.13637	25.06364	29.97913	22.63636	0.36957	0.48800
18	35.07273	25.10000	29.94675	22.60000	0.39130	0.48600
19	35.10909	25.07273	29.91026	22.11818	0.41304	0.48200
20	35.11819	25.06364	29.88982	22.10909	0.43478	0.48000
21	35.10910	25.07273	29.87011	22.20909	0.45652	0.47800
22	35.12727	25.05455	29.82902	22.25455	0.47826	0.47400
23	35.12727	25.07273	29.81847	21.98182	0.50000	0.47200
24	35.10000	25.07273	29.78555	22.37273	0.52174	0.47000
25	35.13637	25.06364	29.76760	22.59091	0.54348	0.46700
26	35.17273	25.05455	29.74939	22.50000	0.56522	0.46400
27	35.11818	25.09091	29.71348	22.60909	0.58696	0.46100
28	35.15455	25.07273	29.70029	22.21818	0.60870	0.45900
29	35.21818	25.08182	29.69386	22.42727	0.63043	0.45500
30	35.18182	25.11818	29.65688	21.90909	0.65217	0.45100
31	35.17273	25.09091	29.61765	21.95455	0.67391	0.44900
32	35.18182	25.10909	29.61160	22.01818	0.69565	0.44700
33	35.13637	25.10000	29.54611	22.34546	0.71739	0.44300
34	35.13637	25.13636	29.53636	22.25455	0.73913	0.44000
35	35.13636	25.10000	29.47585	22.18182	0.76087	0.43600
36	35.12727	25.10909	29.43694	22.40000	0.78261	0.43200
37	35.08182	25.10000	29.37222	22.12727	0.80435	0.42800
38	35.07273	25.09091	29.33318	22.41818	0.82609	0.42500
39	35.07273	25.12727	29.30436	22.47272	0.84783	0.42000
40	35.14546	25.11818	29.29956	22.16364	0.86957	0.41700
41	35.15455	25.13636	29.25384	22.78182	0.89130	0.41100
42	35.15455	25.10909	29.17750	22.40909	0.91304	0.40500
43	35.10909	25.13637	29.04568	22.16364	0.93478	0.39200
44	35.10000	25.12728	28.73740	22.56364	0.95652	0.36200
45	35.14546	25.10909	28.18022	21.99091	0.97826	0.30600
46	35.02727	25.09091	27.04539	22.61818	0.99178	0.19670
47					1.00000	0.00000

$\Delta T = 15^\circ\text{C}$ 'deki deneysel çalışmanın verileri

S No	Ch1(Th)	Ch2(Tc)	Ch3(T)	Ch4(Tr)	$Y = \frac{y}{H}$	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$
1	40.13637	25.26364	36.32895	22.42727	0.02174	0.74400
2	40.23636	25.28182	34.28445	22.41818	0.04348	0.60200
3	40.30000	25.26364	33.12766	22.68182	0.06522	0.52300
4	40.08182	25.30909	32.78409	22.35455	0.08696	0.50600
5	40.14546	25.30909	32.75695	22.98182	0.10870	0.50200
6	40.18182	25.29091	32.73637	22.90909	0.13043	0.50000
7	40.10000	25.29091	32.66584	22.30000	0.15217	0.49800
8	40.18182	25.29091	32.64702	22.44545	0.17391	0.49400
9	40.14546	25.30909	32.57891	22.80909	0.19565	0.49000
10	40.09091	25.30000	32.51796	22.93636	0.21739	0.48800
11	40.18182	25.30909	32.47775	22.75455	0.23913	0.48200
12	40.25454	25.29091	32.47345	22.68182	0.26087	0.48000
13	40.23636	25.30909	32.42940	22.52727	0.28261	0.47700
14	40.33636	25.28182	32.40262	22.72727	0.30435	0.47300
15	40.42727	25.31818	32.43456	22.52727	0.32609	0.47100
16	40.21818	25.30909	32.27164	22.33636	0.34783	0.46700
17	40.30000	25.33636	32.29445	22.70000	0.36957	0.46500
18	40.41818	25.30909	32.28949	22.90000	0.39130	0.46200
19	40.35454	25.31818	32.20483	22.54545	0.41304	0.45800
20	40.32727	25.30000	32.18249	22.65454	0.43478	0.45800
21	40.30000	25.35454	32.16967	22.52727	0.45652	0.45600
22	40.29090	25.33636	32.12572	23.14545	0.47826	0.45400
23	40.37273	25.34546	32.13779	22.41818	0.50000	0.45200
24	40.41818	25.31818	32.08298	23.14545	0.52174	0.44800
25	40.41818	25.30909	32.07796	22.86364	0.54348	0.44800
26	40.51818	25.32727	32.07203	23.16364	0.56522	0.44400
27	40.26364	25.34545	31.93929	22.37273	0.58696	0.44200
28	40.33636	25.33636	31.90636	22.70909	0.60870	0.43800
29	40.39090	25.38181	31.88825	22.99091	0.63043	0.43350
30	40.39091	25.34545	31.79995	22.64545	0.65217	0.42900
31	40.42727	25.32727	31.81725	22.74545	0.67391	0.42980
32	40.40000	25.33636	31.76853	22.87273	0.69565	0.42700
33	40.45454	25.34545	31.73660	22.66364	0.71739	0.42300
34	40.47273	25.31818	31.69825	22.71818	0.73913	0.42100
35	40.48182	25.33636	31.69745	23.00909	0.76087	0.42000
36	40.53636	25.33636	31.64436	23.09091	0.78261	0.41500
37	40.25455	25.36363	31.49869	22.61818	0.80435	0.41200
38	40.37272	25.32727	31.45077	22.83636	0.82609	0.40700
39	40.38181	25.32727	31.42436	22.68182	0.84783	0.40500
40	40.45454	25.32727	31.39331	22.41818	0.86957	0.40100
41	40.42727	25.32727	31.29177	22.70000	0.89130	0.39500
42	40.41818	25.34545	31.23889	22.71818	0.91304	0.39100
43	40.39091	25.31818	31.00060	23.51818	0.93478	0.37700
44	40.43636	25.33636	30.55794	22.92727	0.95652	0.34580
45	40.34545	25.31818	29.60847	23.00909	0.97826	0.28550
46	40.32727	25.34545	28.13656	22.93636	0.99178	0.18630
47	40.33636	25.34545	25.34545	23.01818	1.00000	0.00000

$\Delta T = 20^\circ\text{C}$ 'deki deneysel çalışmanın verileri

S_No	Ch1(Th)	Ch2(Tc)	Ch3(T)	Ch4(Tr)	$Y = \frac{y}{H}$	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$
1	45.37272	25.45455	39.82887	22.54546	0.02222	0.72167
2	45.38182	25.48182	36.00892	22.70000	0.04444	0.52900
3	45.45454	25.43636	35.28530	22.90000	0.06667	0.49200
4	45.44545	25.48182	35.18414	23.20909	0.08889	0.48600
5	45.54546	25.45455	35.09819	22.60000	0.11111	0.48000
6	45.32727	25.47273	34.94335	22.89091	0.13333	0.47700
7	45.40000	25.47273	34.93818	22.46364	0.15556	0.47500
8	45.39091	25.44545	34.83976	22.72727	0.17778	0.47100
9	45.22727	25.31818	34.61573	22.49091	0.20000	0.46700
10	45.33636	25.47273	34.64973	22.96364	0.22222	0.46200
11	45.30000	25.48182	34.59818	22.41818	0.24444	0.46000
12	45.31818	25.40909	34.48764	23.12727	0.26667	0.45600
13	45.36363	25.41818	34.43352	22.68182	0.28889	0.45200
14	45.30000	25.47273	34.37517	23.01818	0.31111	0.44900
15	45.31818	25.45455	34.29387	22.84546	0.33333	0.44500
16	45.30909	25.46363	34.29486	22.87273	0.35556	0.44500
17	45.35454	25.49091	34.29050	23.28182	0.37778	0.44300
18	45.39090	25.47273	34.23672	22.97273	0.40000	0.44000
19	45.34545	25.45455	34.18666	22.60000	0.42222	0.43900
20	45.42727	25.49091	34.20310	23.26364	0.44444	0.43700
21	45.40000	25.48182	34.08647	22.96364	0.46667	0.43200
22	45.37273	25.44545	34.01418	22.73636	0.48889	0.43000
23	45.21819	25.46363	33.87907	22.66364	0.51111	0.42600
24	45.37273	25.47272	33.91032	22.49091	0.53333	0.42400
25	45.32727	25.46364	33.88582	22.59091	0.55556	0.42400
26	45.38182	25.49091	33.88487	22.60000	0.57778	0.42200
27	45.40000	25.48182	33.78770	22.64545	0.60000	0.41700
28	45.40000	25.46364	33.73723	22.95455	0.62222	0.41500
29	45.35454	25.47272	33.64415	23.11818	0.64444	0.41100
30	45.36363	25.47272	33.60810	22.55455	0.66667	0.40900
31	45.32727	25.50000	33.51022	22.90000	0.68889	0.40400
32	45.23637	25.50000	33.43402	22.52727	0.71111	0.40200
33	45.23636	25.49091	33.31011	22.48182	0.73333	0.39600
34	45.29999	25.50000	33.38040	22.83636	0.75556	0.39800
35	45.38181	25.49091	33.32792	22.57273	0.77778	0.39400
36	45.42727	25.43636	33.25281	22.85455	0.80000	0.39100
37	45.52728	25.48182	33.31959	23.27273	0.82222	0.39100
38	45.47273	25.50000	33.22945	23.14545	0.84444	0.38700
39	45.35454	25.49091	33.11854	23.06364	0.86667	0.38400
40	45.49091	25.49091	33.09091	22.74545	0.88889	0.38000
41	45.44545	25.49091	32.99382	22.82727	0.91111	0.37600
42	45.50909	25.49091	32.89764	22.91818	0.93333	0.37000
43	45.50000	25.49091	32.63416	22.97273	0.95556	0.35700
44	45.44545	25.49091	31.71673	23.20909	0.97778	0.31200
45	45.55455	25.49091	31.08867	22.40000	0.98278	0.27900
46	45.42727	25.46364	28.97724	23.00000	0.99178	0.17600
47					1	0

$\Delta T = 25^\circ\text{C}$ 'deki deneysel çalışmanın verileri

S_No	Ch1(Th)	Ch2(Tc)	Ch3(T)	Ch4(Tr)	$Y = \frac{y}{H}$	$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}$
1	50.44545	25.56364	45.77265	22.77273	0.00800	0.81220
2	50.40909	25.69091	41.23865	22.68182	0.02200	0.62900
3	50.56364	25.56364	37.66364	23.18182	0.04700	0.48400
4	50.50000	25.60909	37.20825	22.60909	0.08889	0.46600
5	50.54546	25.57273	36.97778	22.65455	0.11111	0.45670
6	50.55455	25.60000	36.95432	22.68182	0.13333	0.45500
7	50.54546	25.60000	36.77557	22.33636	0.15556	0.44800
8	50.49091	25.58182	36.71618	23.00909	0.17778	0.44700
9	50.39091	25.59091	36.55251	22.97273	0.20000	0.44200
10	50.35454	25.57273	36.47673	23.31818	0.22222	0.44000
11	50.38181	25.59091	36.44932	23.07273	0.24444	0.43800
12	50.33636	25.59091	36.30569	23.25455	0.26667	0.43300
13	50.30000	25.59091	36.24053	23.20909	0.28889	0.43100
14	50.28181	25.60000	36.23786	23.25455	0.31111	0.43100
15	50.19091	25.60000	36.14950	23.34545	0.33333	0.42900
16	50.35454	25.60000	36.17019	23.13637	0.35556	0.42700
17	50.45454	25.57273	36.14750	23.27273	0.37778	0.42500
18	50.48182	25.60909	36.05564	23.19091	0.40000	0.42000
19	50.54546	25.61819	36.08764	22.87273	0.42222	0.42000
20	50.52727	25.59091	35.96444	23.15454	0.44444	0.41600
21	50.51818	25.60000	35.96596	23.38182	0.46667	0.41600
22	50.34546	25.60000	35.77038	22.91818	0.48889	0.41100
23	50.34546	25.61818	35.75636	22.98182	0.51111	0.41000
24	50.40000	25.60909	35.69899	23.05454	0.53333	0.40700
25	50.35454	25.60000	35.62559	22.98182	0.55556	0.40500
26	50.34546	25.60000	35.49818	23.08182	0.57778	0.40000
27	50.35454	25.60000	35.45231	22.97273	0.60000	0.39800
28	50.36364	25.60909	35.36238	22.66364	0.62222	0.39400
29	50.39091	25.61819	35.25478	22.90909	0.64444	0.38900
30	50.31818	25.63637	35.18823	22.90000	0.66667	0.38700
31	50.29090	25.62728	35.12277	23.16364	0.68889	0.38500
32	50.38181	25.60000	34.99231	23.30000	0.71111	0.37900
33	50.34546	25.61818	34.96509	23.04545	0.73333	0.37800
34	50.37273	25.60000	34.91455	23.36364	0.75556	0.37600
35	50.41818	25.61819	34.94299	23.31818	0.77778	0.37600
36	50.33636	25.60909	34.83236	23.19091	0.80000	0.37300
37	50.34546	25.60000	34.78057	23.02727	0.82222	0.37100
38	50.34546	25.60000	34.68158	23.20000	0.84444	0.36700
39	50.40909	25.63637	34.60409	22.82727	0.86400	0.36200
40	50.50909	25.62728	34.51009	23.45455	0.88889	0.35700
41	50.44546	25.60909	34.30182	22.92727	0.91111	0.35000
42	50.42727	25.63636	34.09006	23.30000	0.93333	0.34100
43	50.51818	25.59091	33.56764	22.88182	0.95556	0.32000
44	50.50000	25.61818	32.51044	23.17273	0.97400	0.27700
45	50.42727	25.62728	31.20728	22.87273	0.98240	0.22500
46	50.42727	25.61819	29.31474	23.23637	0.99178	0.14900
47					1	0

ÖZGEÇMİŞ**HASAN MAZLUM**

Çünür Mah. 246 Cd. No:45
(32200) ISPARTA

Kimlik ve Adres Bilgileri

Doğum Yeri : ISPARTA
Doğum Tarihi : 02.01.1974
Sosyal Statü : Evli
Yabancı Dil : İngilizce
İş Adresi : S.D.Ü. Bucak Hikmet Tolunay Meslek Yüksek Okulu
Telefon (İş) : 0 248 325 58 43
Telefon (Mobil) : 0 533 432 38 19
Faks No : 0 248 325 52 30
E-mail Adresi : hmazlum@sdu.edu.tr

Öğrenim Durumu

Lise : 1988-1991 Isparta Teknik Lisesi-Bilgisayar Bölümü
Yüksek Öğrenim : 1991-1996 Marmara Ün. Teknik Eğt. Fak. Bilgisayar Öğrt.

İş Tecrübesi ve Akademik Görevler

Bilgisayar Prog.	2002-	S.D.Ü. Bucak Hikmet Tolunay MYO Öğretim Görevlisi
	1999-2002	Isparta End. Mes. Lisesi - Bilgisayar Bölümü Bilgisayar Öğretmeni

Seminer ve Kurslar

MELT (The Methodology of English Language Teaching),
British Council, 1999

CISCO Systems Networking Academy,
BİM-SDÜ, 2001