

**TERMOKAPİLERİ KONVEKSİYONA BAĞLI  
OLARAK SİLİNDİR KAP İÇERİSİNDEKİ  
AKIŞKANIN REJİM HALİNDE VE  
OSİLASYONLU HALDEKİ SICAKLIK  
VE HIZ DAĞILIMLARININ  
DENEYSEL VE TEORİK İNCELEMESİ**

**Sibel SOLMAZ ÇOPUR**

**Yüksek Lisans Tezi**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI  
ISPARTA 2004**

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOKAPİLER KONVEKSİYONA BAĞLI OLARAK SİLİNDİR  
KAP İÇERİSİNDEKİ AKIŞKANIN REJİM HALİNDE VE  
OSİLASYONLU HALDEKİ SICAKLIK VE HIZ DAĞILIMLARININ  
DENEYSEL VE TEORİK İNCELEMESİ**

**Hazırlayan:  
SİBEL SOLMAZ ÇOPUR**

**Danışman:  
YRD. DOÇ. DR. RAMAZAN SELVER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ISPARTA, 2004**

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne;

Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACAR

Üye : Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ramazan SELVER (Danışman)

### ONAY

Bu tez 23/01/2004 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

...../...../2004

**Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL**  
**ENSTİTÜ MÜDÜRÜ**

## İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yarı İletken Malzemeler, Kullanım Alanları ve Önemi.....	1
1.2. Yarı İletken Malzemelerin Özellikleri.....	2
1.3. Akışkanlar Mekaniğinde Yüzey Geriliminin Tanımlanması.....	5
1.3.1. Kapiler Etki.....	7
1.3.2. Islatma ve Temas Açısı.....	7
1.3.2.1. Temas Açıları.....	9
1.3.2.2. Eğri Yüzeyler Sebebi ile Oluşan Basınçlar.....	10
1.3.2.3. Yüzey Gerilim Gradyenleri Sebebi ile Oluşan Kesme Kuvvetleri.....	10
1.3.2.4. Yüzeylerdeki Kimyasal ve Elektriksel Etkilerin Neden Olduğu Hareketler.....	11
1.4. Yüzey Gerilimli Termal Akış.....	11
1.5. Yarı iletken Malzemelerin Üretimi ve Kristal Büyütme Teknikleri.....	13
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	22
3. MATERYAL ve METOD.....	26
3.1. Matematiksel Modelleme.....	27
3.1.1. Temel Denklemler.....	27
3.1.1.1. Üç Boyutlu Akış Denklemleri.....	29
3.1.1.2. İki Boyutlu Akış Denklemleri.....	30
3.1.2. Matematiksel Modelleme için Önemli Boyutsuz Parametreler.....	31
3.1.3. Sınır Şartları.....	34
3.1.3.1. Üst Sınır Tabaka Bölgesi.....	36
3.1.3.2. Hacimsel Bölge.....	39
3.1.3.3. Çözüm Yöntemi.....	42
3.2. Deneysel Prosedür.....	44

3.2.1. Deneyde Kullanılan Akışkan .....	46
3.2.2. Deney Bölgesi .....	47
3.2.3. Isıtma Sistemi .....	48
3.2.4. Soğutma Sistemi .....	49
3.2.5. Akış Görüntüleme Sistemi .....	49
3.2.6. Sıcaklık Ölçümü .....	50
3.2.6.1. Termokupllar .....	50
3.2.6.2. Sıcaklık Ölçme Cihazı .....	51
3.2.7. 3-D Mikrometreli Kızak .....	51
3.2.8. Deneyde İzlenen Yol .....	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	56
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	78
6. KAYNAKLAR .....	82
ÖZGEÇMİŞ .....	84

## ÖZET

Bu çalışmada, kristal üretiminde kullanılan en önemli konfigürasyonlardan biri olan, merkezinden ısıtıcı bir tel geçirilerek ısıtılan silindirik kaplardaki yüzey gerilimli konveksiyonel akış deneysel ve teorik ayrıca analitik olarak araştırılmıştır. Silindirik kabın boyutları, boyutsal oranlar ve ısıtma sınırı oranları ayrıca akışkanın sahip olduğu viskozitenin yüzey gerilim hareketini oluşturan parametreler üzerine etkileri incelenmiştir. Meydana gelen akışın transport fenomenleri açısından hız ve sıcaklık profili çıkartılmıştır.

Bu konfigürasyonda, silindirik kabın merkezine konulan ısıtıcı tel sabit sıcaklıkta tutularak bu silindirik kabın dış çeperine içinden soğutucu akışkan geçen bir serpantin yerleştirilmiş ve kap içerisindeki sıvı kristalin sıvının serbest yüzeyi boyunca sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareketi gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla bu hareket özel akış çizgilerinin oluşmasına yol açar.

Bu çalışmada, osilasyonların başlangıç şartlarını geciktirmek amacıyla soğutucu sıcaklığı oda sıcaklığından aşağıya çekilerek deneyler yapılmıştır. Tez aşamasının sonucunda elde edilen sonuçlar yerçekimi altında, oda sıcaklığında yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Osilasyon mekanizması incelenerek akışın yapısı ve yerçekimi ivmesinin osilasyonlar üzerine etkisi ortaya konmuştur. Yapılan analitik değerlendirmeler için yine bu çalışma içerisinde tanımlanan boyutsuz parametrelerden yararlanılmıştır. Bu boyutsuz parametreler tez çalışmamızın önemli bir kısmını oluşturacaktır. Sonuçlar, deneysel ve teorik olarak karşılaştırılmıştır. Deneyimizde akışkan olarak, likit kristalin Prandtl sayısına çok yakın bir Prandtl sayısına sahip olan silikon yağı kullanılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Yüzey Gerilimi, Yüzey Gerilimli Konveksiyonel Akış, Hız ve Sıcaklık Profili, Silikon Yağı

**ABSTRACT**

In this study, thermocapillary convection flow is investigated experimentally and theoretically and also analytically in cylindrical containers heated at the center of the free surface is one of the most important configurations in crystal growth process. The effects of container dimensions, aspect ratio and heating zone ratios as well as the effect of viscosity on the thermocapillary convection flow parameters are investigated. Velocity and thermal profile for the flow is investigated.

Heating for thermocapillary convection flow in which, is the configuration we used. In this configuration, the cylindrical container is heated at the center of the free surface by using a wire spreading constant temperature and the cylinder container is surrounded by a cooling bath that keeps the wall temperature constant. The constant heat generates a temperature gradient along the free surface, which causes the fluid motion to move from the hot region to the cold region. This motion causes special streamlines.

In this study, to delay the onset of the oscillations the heat of the cooling system is decreased under the room temperature and experiments are carried out. In the end of this study our results are discussed with the results of other studies done under room temperature conditions under microgravity. After investigating the oscillation phenomena the oscillation mechanism and the effect of the gravity over the oscillations are put forward. In the end as a result we constituted tables for the values and discussed the results. For the analytical analyses we used some dimensionless parameters. And these parameters have an important place in this study. For the experiment silicon oil will be used as test fluid that has a very similar Prandtl number with liquid crystal.

**KEYWORDS:** Surface Tension, Surface Tension Driven Convection Flow, Velocity and Thermal Profile, Silicon Oil

## TEŞEKKÜR

Sayın danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ramazan SELVER'e, yardımlarından ötürü Yrd. Doç. Dr. Selçuk ÇÖMLEKÇİ ve Yrd. Doç. Dr. Ü.Yalçın KALYONCUOĞLU hocalarıma, yönlendirici fikirlerinin yanı sıra verdikleri moral desteği ile bu çalışmama önemli katkıları olan oda arkadaşlarıma, dinleyici olarak verdikleri destekle sıkıntılı günlere ortak tüm arkadaşlarıma şükranlarımı sunar; emeği geçen herkese sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, hayatımın her evresinde, uzak ya da yakın, daima yanımda olan, sevgi ve güvenlerini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili annem Süreyya SOLMAZ'a, dedem Nihat SOLMAZ'a, babam İbrahim SOLMAZ'a, annem Nurşen ÇOPUR'a ve babam Ömer ÇOPUR'a, canım kardeşlerim Özde ve Özer ÇOPUR'a ve en büyük desteğim olan, tezimin her safhasında, çalışmalarımda bana yardım eden ve büyük bir ilgi ile yapıcı eleştiri ile önerilerini esirgemeyen sevgili eşim Özgür ÇOPUR'a minnettarım. Sevgili aileme ayrı ayrı sonsuz sevgilerimi sunarım.

Sibel Solmaz ÇOPUR

İSPARTA, 2004



## SİMGELER DİZİNİ

$A_R$	Boyutsal Oran
$B_d$	Dinamik Bond Sayısı
$B_o$	Statik Bond Sayısı
$D$	Silindirik Kabın Yarıçapı
$D_{HT}$	Merkeze Konulan Isıtıcı Telin Yarıçapı
$\Delta E$	Yasak Enerji Bandı
$g$	Yerçekimi İvmesi
$G_r$	Grashof Sayısı
$H$	Akışkanın Derinliği
$H_r$	Isıtıcı Tel Yarıçapının Silindirik Kabın Yarıçapına Oranı $\left[ \frac{D_{HT}}{R} \right]$
$Ma$	Marangoni Sayısı
$O$	Fonksiyon
$P_{iç}$	İç Basınç
$P_{dış}$	Dış Basınç
$P'$	Boyutsuz Basınç
$P_r$	Prandtl Sayısı
$\Delta P$	Üst Sınır Tabaka Bölgesindeki Maksimum Basınç Değişimi
$\Delta P_b$	Hacimsel Bölgedeki Maksimum Basınç Değişimi
$R$	Silindirik Kabın Yarıçapı İle Isıtıcı Yarıçapı Arasındaki Fark
$r$	Silindirik Kabın $r$ Yönündeki Yön Parametresi
$r'$	Silindirik Kabın $r$ Yönündeki Boyutsuz Yön Parametresi
$Re_\sigma$	Akışkan Yüzey Gerilimi Reynolds Sayısı
$Q$	Isı Akısı
$S$	Şekil Faktörü
$T$	Akışkanın Sıcaklığı
$T'$	Akışkanın Boyutsuz Sıcaklığı
$\Delta T$	Maksimum Sıcaklık Değişimi
$u$	Hız ( $r$ -doğrultusundaki hız)
$u'$	Boyutsuz Hız ( $r$ -doğrultusundaki boyutsuz hız)
$v$	Hız ( $z$ -doğrultusundaki hız)

$v'$	Boyutsuz Hız (z-doğrultusundaki boyutsuz hız)	
$w$	Hız (w-doğrultusundaki hız)	
$w'$	Boyutsuz Hız (w-doğrultusundaki boyutsuz hız)	
$z$	Silindirik Kabın r Yönündeki Yön Parametresi	
$z'$	Silindirik Kabın z Yönündeki Boyutsuz Yön Parametresi	
$\alpha$	Termal Difüzyon Katsayısı	
$\beta$	Hacimsel Genleşme Katsayısı	
$\delta_t$	Termal Sınır Katman	
$\tau$	Yüzey Gerilim Alanı Üzerindeki Kesme Kuvveti	
$\theta$	Islatma Temas Açısı	
$\kappa$	Termal Kondüksiyon	
$\nu$	Kinematik viskozite	
$\mu$	Dinamik viskozite	
$\rho$	Akışkanın Yoğunluğu	
$\sigma$	Akışkan Yüzey Gerilimi	
$\sigma_T$	Yüzey Gerilimi Sıcaklık Katsayısı	$\left  \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right $

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Periyot sisteminde elementlerin sınıflandırılması.....	2
Şekil 1.2.	Değerlik ve iletkenlik bandı arasındaki yasak enerji bandının şematik gösterimi.....	3
Şekil 1.3.	Yalıtkan, yarı iletken ve iletken malzemelerin yasak enerji bantları.....	4
Şekil 1.4.	Yüzey gerilimi.....	5
Şekil 1.5.	Yüzey geriliminde yüzey basınçları.....	6
Şekil 1.6.	Islatma ve temas açıları.....	7
Şekil 1.7.	Akışkanın sınır tabaka teorisi.....	12
Şekil 1.8.	Czochralski yöntemi ile kristal büyütme.....	14
Şekil 1.9.	Yüzey geriliminin belirlenmesinde kullanılan kaplı işlemler için iki farklı yöntem.....	15
Şekil 1.10.	Yüzey geriliminin belirlenmesinde kullanılan kapsız işlemler için iki farklı yöntem.....	16
Şekil 1.11.	Silindir koordinatlar sistemindeki merkezden sabit sıcaklık etkisiyle oluşan yüzey gerilim hareketinin incelendiği deney seti.....	18
Şekil 1.12.	Silindir koordinatlar sistemindeki lazer ısı akısıyla oluşan konfigürasyon.....	18
Şekil 1.13.	Yüzey gerilimli konveksiyonel akış.....	19
Şekil 1.14.	Hız alanının termal alanın ve serbest yüzey deformasyonunun üçlü sistemine sebep olan osilasyon.....	21
Şekil 3.1.	3-Boyutlu silindirik kap.....	27
Şekil 3.2.	2-Boyutlu silindirik kap koordinatları.....	28
Şekil 3.3.	Merkezden sabit sıcaklık etkisiyle oluşan yüzey gerilim hareketini oluşturan deney seti.....	32
Şekil 3.4.	Üst sınır tabaka ve hacimsel bölgelerdeki hız ve termal alanlar.....	36
Şekil 3.5.	Deney düzeneğinin toplu görünüşü.....	44
Şekil 3.6.	Deney düzeneğinin şematik oluşumu.....	45
Şekil 3.7.	Şematik test alanı.....	52

Şekil 4.1.	Soğutucu kalibrasyon deneyi sonuçları.....	57
Şekil 4.2.	Sıcaklık alanının rejim halinde elde edilen grafiği.....	58
Şekil 4.3.	Sıcaklık alanının osilasyon halinde elde edilen grafiği.....	59
Şekil 4.4.	Osilasyonlu ve rejim halindeki termal alanların karşılaştırılması...	59
Şekil 4.5.	Isıtıcının yakınındaki akış alanı.....	61
Şekil 4.6.	Osilasyonlu akış alanı.....	62
Şekil 4.7.	Üç boyutlu osilasyon yapısı .....	63
Şekil 4.8	Farklı çapa sahip kaplar için osilasyon başlangıç şartlarında kritik sıcaklık farkları.....	64
Şekil 4.9.	Farklı çaplardaki kaplar için osilasyon başlangıcı için kritik marangoni sayıları.....	65
Şekil 4.10.	Silindirik kap içerisinde veri alınan 5 nokta.....	66
Şekil 4.11.	Isıtıcı bölgesinde 1 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi.....	67
Şekil 4.12.	Isıtıcı bölgesinde 2 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi.....	67
Şekil 4.13.	Merkezde 3 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi.....	68
Şekil 4.14.	Soğutucu bölgesinde 4 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi .....	68
Şekil 4.15.	Soğutucu bölgesinde 5 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi.....	69
Şekil 4.16.	Tüm bölgede termokuplların 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrilerinin karşılaştırılması.	69
Şekil 4.17.	1-5, 1-3-5 ve 2-4 numaralı termokuplların kendi aralarında karşılaştırılması için elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri.....	70
Şekil 4.18.	Farklı çaplardaki kaplar için osilasyonların başlamasına yakın osilasyon frekans değerleri.....	71
Şekil 4.19.	Aktif periyot.....	72
Şekil 4.20.	Zayıf periyot.....	73
Şekil 4.21.	Düz serbest yüzeye sahip rejim hali akış için tipik nümerik akış çizgileri (a) izoterm (b) ve osilasyon akış yapısı (c) .....	74

Şekil 4.22.	Hesaplanan yüzey hız ve sıcaklık dağılımları.....	75
Şekil 4.23.	Farklı çaplardaki kaplar için osilasyon şekil faktörleri değerleri....	76
Şekil 4.24.	Analitik olarak hesaplanan hız profili	77

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

Çizelge 1.1. Bazı akışkan-hava ara yüzeyleri için yaklaşık yüzey gerilim değerleri.....	8
Çizelge 3.1 Czohralski yöntemi için 5 cSt viskoziteye sahip silikon yağının 25° C'deki fiziksel özellikleri.....	47

## 1.GİRİŞ

### 1.1. Yarı İletken Malzemeler, Kullanım Alanları ve Önemi

İnsanoğlu, varoluşundan bu yana birçok önemli buluş yapmış ve bunları zaman içerisinde geliştirerek bilim tarihine her gün yeni katkılarda bulunmuştur. Yarı iletken malzemelerin üretimi insanlık tarihinin en önemli buluşlarından biri olmuştur. 1729'lu yıllarda iletkenler ve yalıtkanlar sınıflandırılması yapılmaktaydı. Michael Farraday, bundan bir yüzyıl sonra yeni bir malzeme sınıfı tanımlayarak bu sınıfa “Yarı İletken Malzeme” adını vermiştir. 1800'lü yıllardan günümüze yarı iletken malzemelerin gelişimi onu gündelik hayatımızın vazgeçilmezi yapmıştır. Yarı iletken kelimesi bize çok şey anlatmasa da günümüzde yarı iletkenler olmayan bir modern dünya düşünülemez. Hayatımızda yarı iletken malzemeler olmasaydı günlük hayatımızda önem taşıyan birçok cihazdan bugün yararlanamayacaktık. Nano teknolojiler bir yana yarı iletken malzemelerin askeri alandaki uygulamaları yarı iletken malzemelerin geliştirilmesini hızlandırmıştır.

Yarı iletken malzemelerin en çok uygulandığı alan bilgisayar sektörüdür. Yarı-iletken kristaller kullanılarak diyotlar, transistörler ve entegre devreler üretilmektedir. Entegre devrelerin kullanımı, ikinci endüstri devrimini başlatmıştır. Bir entegre devre, bir tek silisyum kristali üzerinde iç bağlantılar ile diyotlar, transistörler, dirençler ve kondansatörün bir araya getirilmiş halidir. Entegre devresini oluşturan çiplerde yüz binlerce devre elemanı bulundurabilmektedir. Bu entegre devreleri bilgisayarların, televizyonların, videoların, saatlerin, kameraların, hesap makinalarının, otomobillerin, uçakların, robotların, uzay araçlarının, tüm haberleşme sistemlerinin anahtarlama devrelerinin kalbini oluşturmaktadır.

Tarihteki ilk uygulama, 19 Mart 1955 tarihinde kısaca TRADIC adı verilen (TRAnsistor-DIgital-Computer) üzerinde 800 transistör ve 11.000 germanyum diyodu bulunduran dev boyutlardaki hesap makinasıdır. Günümüzdeki bilgisayar teknolojisi ile TRADIC karşılaştırılacak olursa yarı iletken malzemelerin ve geliştirilmelerinin önemi daha iyi anlaşılacaktır (Ringer ,1995).

## 1.2. Yarı İletken Malzemelerin Özellikleri

Yarı İletken malzeme olarak adlandırılan, Silisyum (Si), Germanyum (Ge), Brom (Br), İndiyum (In)... gibi saf yarı-iletken kristallere özden yarı-iletken kristaller denir. Şekil 1.1.'de bu elementlerin periyodik cetvel üzerindeki yeri ifade edilmiştir.

Be	B	C	N	O	F
Mg	Al	Si	P	S	Cl
Ca	Ga	Ge	As	Se	Br
Sr	In	Sn	Sb	Te	I

Şekil 1.1. Periyot sisteminde elementlerin sınıflandırılması  
(Yarı iletken malzemeler çerçeve içerisinde belirtilmiştir.)

Yarı iletken malzeme üretiminde en iyi bilinen ve kolaylıkla temin edilen kaynak silikondur. Silikon teknolojisi bugün en üst safhalara ulaşarak en iyi en saf yarı iletken malzeme üretiminde tercih edilmektedir.

Atomların belirli bir düzen içerisinde bir araya gelmeleri ile ortaya koydukları yerleşim düzenlerindeki üç boyutlu tekrarlarına “kristal” denir. Kristallerin her birinin farklı elektronik dağılımları vardır. Kristallerdeki elektronik dağılımlar incelenerek, kristalin iletken, yalıtkan ve yarı-iletken olduğu tespit edilebilir.

Kristal sisteminin enerji düzeyleri bir takım bantlardan (elektronların yerleştiği orbitaller) oluşmuştur. İletken kristaller yüksek yük taşıyıcı yoğunluğuna sahip iken, yalıtkan kristallerin yük taşıyıcı yoğunluğu hemen hemen sıfırdır. Teknolojide önemli bir yeri olan yarı iletkenlerin yük taşıyıcı yoğunlukları iletken ve yalıtkan kristaller arasındadır.



İletken kristallerde elektronların sadece belirli bantları işgal etmelerine izin verilir. İzinli bantlar arasında, elektronlar tarafından işgal edilmeyen enerji bölgeleri (yasak enerji aralığı) bulunur. Şekil 1.2.'de bu bantlar görülmektedir.

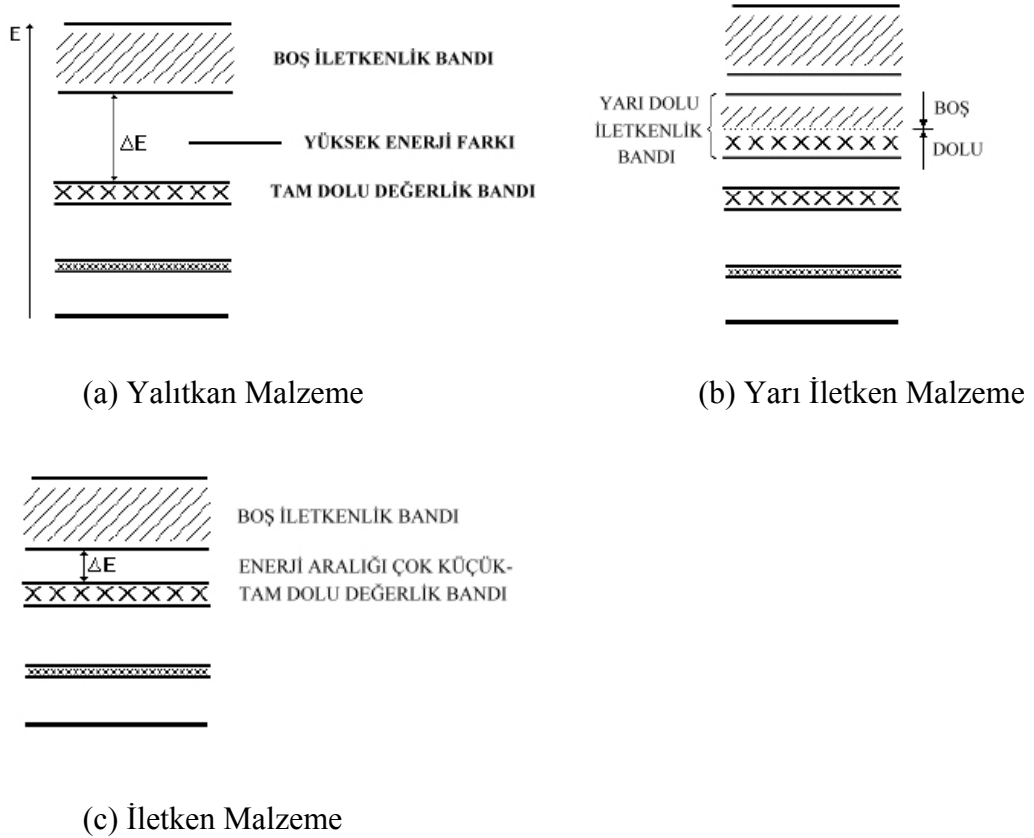


Şekil 1.2. Değerlik ve iletkenlik bandı arasındaki yasak enerji bandının şematik gösterimi

Sisteme ısı şeklinde enerji verilirse, elektronlar dolu olan bantlardan boş olan bantların birisine hareket edebilirler. Yarı-dolu 3s bandındaki elektronlar, boş olan 3p bandına geçmek üzere yeterli enerjiyi soğurabilirler. Kristal iletkenlere çok küçük bir elektrik alanı uygulanarak elektronların boş banları doldurarak kristal içerisinde hareket etmeleri sağlanır.

Yalıtkan kristallerde,  $0^{\circ}$  K de değerlik bandı elektronlarla tamamen dolu iken, iletim bandı ise tamamen boştur. Kristalde boş olan değerlik bandı ile dolu olan bant arasındaki aralığa kristalin enerji aralığı denir ve enerji aralığı  $\Delta E$  ile gösterilir. Yalıtkan kristallerde enerji aralığı büyük ve 10 eV mertebesindedir. Şekil 3.(a)'da yalıtkan kristallerin şematik enerji aralığı görülmektedir. Oda sıcaklığında kristalin enerji değeri 0.025 eV dır. Enerji aralığı çok büyük olduğu için değerlik bandından iletim bandına çok az elektron geçebilir. Bu kristallerin elektriksel iletkenliğe katkıları çok küçük, özdirençleri ise büyüktür.

Yarı iletken kristallerde enerji aralığı 1eV mertebesinde. 0 K sıcaklığında yarı iletken kristalin bütün elektronları değerlik bandında olmasına rağmen iletim bandında hiç elektron yoktur. Bunun için yarı-iletken kristaller düşük sıcaklıklarda zayıf iletkenlerdir. Yüksek sıcaklıklarda ise yarı-iletkenin iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak artış göstermektedir. Şekil 1.3.(b)'de de yarı-iletkenin bant yapısı görülmektedir. Enerji aralığının, ( $\Delta E$ ), küçük olmasından dolayı, elektronlar ısıya bağlı olarak değerlik bandından iletim bandına doğru uyarılırlar. Yarı-iletken kristallerde negatif ve pozitif yük taşıyıcılar mevcuttur. Yarı-iletken kristallerdeki bir elektron değerlik bandından iletim bandına geçtiğinde, deşik (pozitif yük) olarak adlandırılan dolmamış değerlik (valans) bandı bırakmaktadır. Değerlik elektronu deşigi doldurmak üzere hareket etmesi halinde, deşik yük taşıyıcı gibi davranmaktadır. Yarı-iletken kristale elektrik alan uygulanacak olursa yük taşıyıcılar birbirlerine zıt yönlerde hareket ederler. Şekil 1.3.'de yalıtkan, iletken ve yarı iletken malzemeler arasındaki fark açıkça görülmektedir.

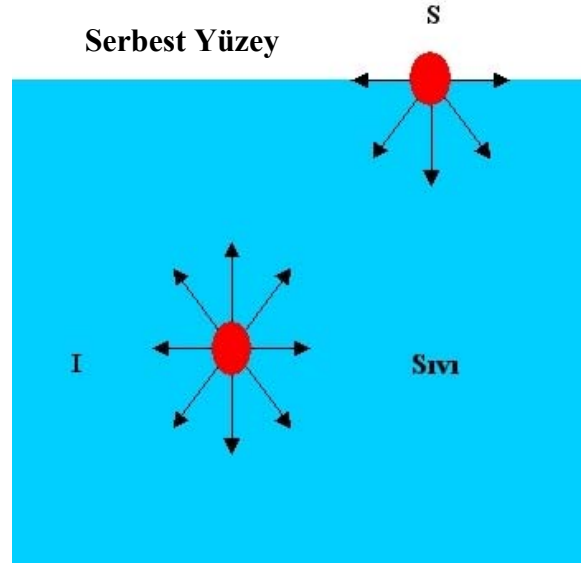


Şekil 1.3. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken malzemelerin yasak enerji bantları

İdeal yarı iletken malzemeler, hatasız ve geometrik olarak tamamen düzenli bir kristal yapıya sahiptirler. Doğada mevcut olan yarı iletken malzemeler ideal yarı iletken malzeme değildir. Bu kadar mükemmel kristal yapıya sahip yarı iletken malzemeleri üretmek de mümkün değildir. Ancak hedef budur. Yapılan tüm araştırmalar ve bilimsel çalışmaların temel hedefi en saf en mükemmel iç yapıya sahip yarı iletken malzemeleri üretmektir (Raymond, 1990).

### 1.3. Akışkanlar Mekaniğinde Yüzey Geriliminin Tanımlanması

Deneysel, teorik ve nümerik çalışmalar yüzey gerilim hareketini daha iyi anlamak amacına yönlendirilmektedir. Bu nedenle yüzey gerilimini basitçe incelemek yararlı olacaktır. Serbest yüzey üzerinde bulunan herhangi bir noktaya etkidiği varsayılan, birim uzunluğa bağlı olan, bu moleküler çekim kuvveti, ‘Yüzey Gerilimi’ olarak ifade edilir ve bir yunan sembolü olan ‘ $\sigma$ ’ sembolü (sigma) ile gösterilir. Birimi (N/m)’dir (Raymond, 1990).



Şekil 1.4. Yüzey gerilimi

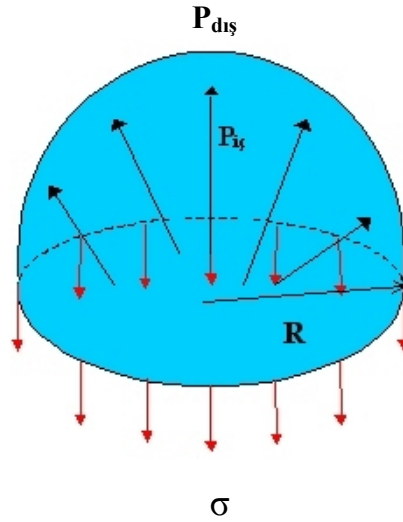
Şekil 1.4.’de görüleceği üzere, sıvı içerisindeki herhangi bir **I** molekülü, her yönden çekici kuvvetlerin etkisi altındadır. Bu kuvvetlerin vektörel toplamı sıfırdır. Ancak sıvı yüzeyindeki bir **S** molekülü, yüzeye dik bir şekilde net dahili yapıştırıcı kuvvet etkisi altındadır.

Bir sıvının yüzey gerilimi ( $\sigma$ ), yeterli sayıda molekülü yüzeye taşıyarak yeni bir birim alan oluşturmak için yapılması gereken iş olarak tanımlanabilir. Ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sigma = \frac{W}{A} = \frac{J}{m^2} = \frac{Nm}{m^2} = \frac{N}{m}$$

Yüzeydeki moleküller, sıvı içindeki moleküllerden daha yüksek enerjiye sahiptir.

Yüzey gerilimi bir sıvının yüzeyinin, gerilmiş elastik bir membran gibi davranma eğilimidir. Sıvılar doğal olarak yüzey alanlarını minimize etme eğilimindedir. Bu nedenle sıvı damlaları yüzey alanlarını küçültmek için küresel bir şekil alırlar. Küçük bir damlacık için yüzey gerilimi, yüzeyde etkili kuvveti dengelemek üzere damlacık içerisindeki iç basıncın artmasına neden olur. Damlacığın içi ile dışı arasındaki basınç farkı,  $\Delta P$  olarak ifade edilirse;  $\Delta P = (P_{iç} - P_{dış})$ , olarak yazılabilir. Yarımküre şeklindeki damlacığa etkiyen yüzey gerilimi,  $\sigma$ 'dır.



Şekil 1.5. Yüzey geriliminde yüzey basınçları

Basınç kuvveti sıvı molekülleri dışa doğru hareket ettirmeye çalışırken, yüzey gerilim kuvveti molekülleri bir arada tutmaya çalışır. Net kuvvet sıfırdır.

Basınç kuvveti  $\Delta P \cdot A = \Delta P \cdot \pi R^2 \quad (N/m^2 \cdot m^2 = N)$

Yüzey gerilim kuvveti  $n \cdot \sigma = 2\pi R \cdot \sigma = (P_{iç} - P_{dış}) \pi R^2 = (\Delta P) \pi R^2 \quad (m \cdot N/m = N)$

### 1.3.1. Kapiler Etki

Akışkanın molekülleri arasındaki çekim iki şekilde gerçekleşir. Bu çekim ‘Kapiler Etki’ olarak adlandırılmaktadır.

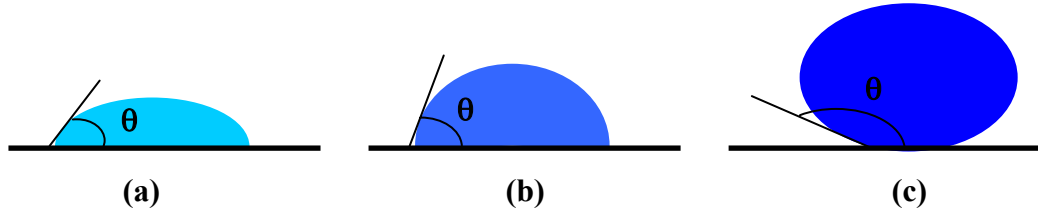
- i. **Adhezyon** : Başka bir kitleye tutunmak için moleküllerin birbirlerini çekmesidir.
- ii. **Kohezyon** : Akışkanın molekülleri arasındaki çekimdir.

Bir sıvının kapiler bir tüp içinde yükselmesi veya alçalması yüzey gerilimi tarafından kontrol edilirken adhezyon ve kohezyonun büyüklüklerine de bağlıdır. Eğer adhezyon  $>$  kohezyon ise sıvı tüp içinde yükselir; kohezyon  $>$  adhezyon ise sıvı tüp içinde alçalır.

### 1.3.2. Islatma ve Temas Açısı

Adhezyon  $>$  Kohezyon  $\longrightarrow$  Islatan sıvıdır.

Kohezyon  $>$  Adhezyon  $\longrightarrow$  Islatmayan sıvıdır.



Şekil 1.6. Islatma ve temas açıları

Şekil 1.6.(a)'da katı bir yüzeyi ıslatan, Şekil 1.6.(c)'de ise ıslatmayan sıvı örnekleri gösterilmektedir. Buradaki  $\theta$  açısı temas açısı olarak adlandırılır ve sıvının ıslatma özelliğinin bir ölçüsüdür. Mükemmel bir ıslatma için temas açısının  $\theta = 0^\circ$  olması gerekir. Bu durumda sıvı katı yüzey üzerine ince bir film halinde yayılır.  $\theta = 180^\circ$  durumu pratikte gözlenmez. Damla üzerine etki eden yerçekimi kuvveti damlayı katı yüzeyine çeker. Teflon üzerinde su, cam üzerinde cıva bu duruma örnektir. Eğer  $\theta < 90^\circ$  ise sıvının katı yüzeyi ıslattığı,  $\theta > 90^\circ$  ise ıslatmadığı söylenebilir.

$\theta < 20^\circ$  güçlü bir ıslatma,  $\theta > 140^\circ$  ise güçlü bir ıslatmama özelliğini gösterir. Kontak açısı ( $\theta$ ) sıvı ve katı yüzeyin bir fonksiyonudur. Su için temiz bir cam yüzeyde  $\theta \approx 0^\circ$ 'dir (Solmaz, 2002).

Tablo 1.1.'de suyun yüzey gerilimi verilmiştir. Bu tabloya belirlenen değer normal şartlar altında, yani 1 bar basınç ve 20 °C sıcaklık için bulunmuş değerlerdir. Akışkanın bu sıcaklıkta sıvı halde bulunduğu sıcaklık aralığındadır. Yani bu değer suyun sıvı haldeki yüzey gerilimi değeridir. Yükselen sıcaklık yüzey gerilimini düşürür (Munson, 1994).

Çizelge 1.1. Bazı akışkan-hava ara yüzeyleri için yaklaşık yüzey gerilim değerleri (Munson, 1994)

AKIŞKAN	YÜZEY GERİLİMİ (dyn/cm)
SU	73
TUZLU SU	75
SABUNLU SU	20-30
ETER	17
ALKOL	23
KARBON TETRA KLORİD	27
YAĞ	25-35
CİVA	480
METAN (-170 °C için)	$15.8 \times 10^5$
ETAN (-130 °C için)	$22.91 \times 10^5$
PROPAN (-90 °C için)	$22.0 \times 10^5$
n-OKTAN	$132 \times 10^5$
İZOOKTAN	$18.32 \times 10^5$
n-NONAN	$22.96 \times 10^5$
n-DEKAN	$23.89 \times 10^5$
n-UNDEKAN	$24.78 \times 10^5$
n-OKTADEKAN (30 °C için)	$27.59 \times 10^5$
n-NONADEKAN	$28.7 \times 10^5$

Yüzeylerde yüzey gerilimi kuvveti akışkanı farklı şekil ve hareketler göstermeye zorlar. Bu zorlama etkileri üç genel kural altında özetlenebilir:

- Temas açıları
- Eğri yüzeyler sebebi ile oluşan basınçlar
- Yüzey gerilim gradyenleri sebebi ile oluşan kesme kuvvetler

### 1.3.2.1. Temas Açıları

Yüzeylerin kesiştiği noktada temas açıları, ara yüzeylerin enerjileri yardımıyla tanımlanır. Temas açıları genellikle ‘YOUNG DENKLEMİ’ denilen bir denklem yardımıyla tespit edilir.

$$\sigma_{\text{katı/gaz}} = \sigma_{\text{katı/sıvı}} + \sigma_{\text{gaz/sıvı}} \cos(\text{temas açısı})$$

Bu denklem, gaz, sıvı ve katı ara yüzey arasında oluşan üç yüzey geriliminin yüzey boyunca dengesini sağlamak için kullanılan bir ifadedir. Yüzey gerilim değerleri,  $\sigma$ , sırayla üç ara yüzeyin serbest yüzey enerjileri olarak tanımlanabilir. Sabit ara yüzeyler arasında, katı, sıvı ve gaz yüzeylerden herhangi birinin diğerine karışması halinde yüzeylerin toplam serbest enerjilerini artırır.

‘Young Denklemi’ teorikte kullanışlı olsa da uygulamada bu denklem pek kullanışlı bir denklem değildir. Genellikle katıların gerçek yüzey enerjileri bilinemez. İleriye doğru hareket eden bir akışkanın yüzeyinde görülen yüzey enerjisi ile akışkanın geri dönüş hareketi ile yine aynı yüzeyde görülen yüzey enerjisi genellikle birbirinden farklıdır. Temas açıları termodinamik açıdan incelenecek olursa, temas açısının tüm sistem için en az enerjiye ulaşmasını sağlayan bir açı olması tercih edilir. Ancak uygulamada bu durumun ‘Young Denklemi’ ile ifade edilmesi zordur. Bu nedenle temas açıları önceden bilinmiyorsa genellikle ölçülerek tespit edilirler (Solmaz, 2001).

### 1.3.2.2. Eğri Yüzeyler Sebebi ile Oluşan Basınçlar

Şayet bir ara yüzey eğri ise, ara yüzeylerin her iki tarafında kalan akışkanlar arasında bir basınç farkı oluşur. Konkav yüzeylerde bu basınç farkı açıkça görülmektedir. Akışkan yüzeyinin konkav tarafındaki basıncı diğer yüzeylere göre daha yüksektir. Eğri bir yüzey için kuvvet dengesi basınç farkı, denklem 1.1. de görüldüğü şekildedir:

$$\Delta P = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.1.)$$

Burada,  $\sigma$ , yüzey gerilmesi,  $\Delta P$ , basınç farkı, ve  $R_1$  ve  $R_2$  ise yüzey üzerindeki bir noktanın eğriliğini belirlemek için gerekli olan iki değerdir (Solmaz, 2001).

### 1.3.2.3. Yüzey Gerilim Gradyenleri Sebebi ile Oluşan Kesme Kuvvetleri

Akışkan serbest yüzeyi boyunca, yüzey gerilmelerinin değişmesi halinde akışkan hareket etmek zorunda kalır. Sıcaklık etkisiyle akışkanın fiziksel özelliklerinden viskozitesinin değişmesi halinde akışkanı dengede tutan kuvvetler akışkanın durgun kalmamasına sebep olur. Sıvı ile gaz gibi iki akışkan arasındaki ara yüzeyin birim alanı üzerinde kuvvetler olduğu düşünülerek, yüzeyin, iki akışkan içerisinde viskoz kuvvetler üretecek hızla, yüksek yüzey gerilimine sahip yöne doğru hareket etmek zorunda olduğu görülür.

Bir ara yüzey boyunca yüzey geriliminin değişimi, sınırlanan hava-akışkan ara yüzeylerindeki kesme kuvvetleri ile dengelenir. Bu kuvvetler, sıcak akışkanın viskozite değerleri ile soğuk akışkanın viskozite değerleri arasında, yüzey gerilme gradyanları ile ifade edilen bir kuvvet dengesiyle dengelenir. Denklem 1.2.'de bu ifade yer almaktadır.

$$\Delta \sigma = \tau_A + \tau_B \quad (1.2.)$$



$\tau_A$  ve  $\tau_B$  yüzey gerilim alanı üzerindeki kesme kuvvetlerinin toplamları (akışkan ve hava için) yine aynı normal gerilme kuvvetlerinin yani yüzey gerilmelerinin, farklarına eşittir.

Yukarıda kısaca anlatılan bu üç durum, yüzey geriliminin akışkan üzerine etkileyen faktörleri belirler ve akışkanlar mekaniğindeki denklemlerin de yardımıyla şekil ve hareketlerini tanımlamak için gereklidirler.

Bu üç faktör dışında bir de yüzeylerdeki kimyasal ve elektriksel etkilerin neden olduğu hareketler vardır. Bu çalışmada bu faktör detaylı olarak incelenmeden kısaca izah edilecektir (Solmaz, 2001).

#### **1.3.2.4. Yüzeylerdeki Kimyasal ve Elektriksel Etkilerin Neden Olduğu Hareketler**

Manyetik alana duyarlı akışkanlar için elektriksel yükler de yüzey gerilimi etkilerler. Ancak bu etkilerden bahsedebilmek için akışkan mutlaka manyetik alana duyarlı akışkan olmalıdır. Elektriksel yükler genellikle birbiri üzerine etkileyen kendi itici kuvvetlerinin yüzey gerilmelerinden meydana geldiği yüzeylerde toplanır.

Sonuç olarak, değişik temas açıları yüzey geriliminin şeklini ve yüzey alanını, ara yüzeylerdeki kesme kuvvetlerinin değerinin aynı yüzey boyunca normal doğrultudaki yüzey gerilim kuvvetlerinin farklarını oluşturması halinde dengede olan bu gerilim değerleri ile birlikte sıcaklık etkisiyle akışkanın fiziksel özelliklerinden viskozite gradyeni bize akışkanın hareketini oluşturur (Solmaz, 2001).

#### **1.4. Yüzey Gerilimli Termal Akış**

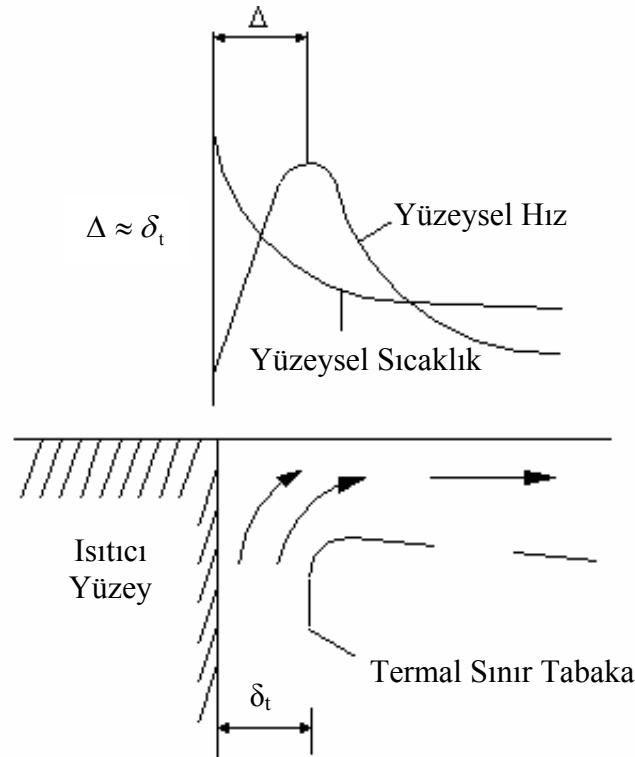
Akışkan hareketine neden olan yer çekiminin yüzey kuvvetlerine oranı olarak bilinen

Bond sayısı,  $\frac{\rho g L^2}{\sigma}$  ve atalet kuvvetlerinin yüzey kuvvetlerine oranı olarak bilinen

Weber sayısı,  $\frac{\rho g L^2}{\sigma}$ , gibi boyutsuz sayıların etkilerinin küçük olması sebebiyle

ağırlıklı olarak yüzey etkileri üzerinde durulmaktadır. Burada,  $\rho$ , akışkanın yoğunluğu;  $g$ , yer çekimi ivmesi;  $\sigma$ , yüzey gerilimi;  $L$ , yer çekimine dik doğrultudaki

herhangi bir karakteristik uzunluk ve  $V$  ise akışkanın hareket doğrultusundaki hızıdır. Boyutlar küçüldükçe akışkan hareketine sebep olan gradyenler, yüzey gerilim hareketinde büyürken akışkan hareketine sebep olan diğer kuvvetlerde ise bu gradyen küçülmektedir. Dolayısıyla mikro seviyedeki boyutlar kullanılarak yüzey gerilim hareketinin diğer kuvvetlere kıyasla daha etkili olduğu görülmektedir. Bu ifadeler Şekil 1.7.'de şematik olarak açıklanan sınır tabaka teorisine dayanılarak çıkartılmıştır.



Şekil 1.7. Akışkanın sınır tabaka teorisi

Yüzey hareketleri, akışkan yüzeyinde bulunan akışkan molekülleri üzerine etki eden ve denge halinde olmayan kuvvetlere bağlıdır. Akışkan bünyesinde yer alan moleküller, birbirini eşit şekilde çekme kuvveti uygulayan moleküllerle çevrelenmiştir. Yine de yüzeyde bulunan moleküller, akışkan içerisinde oluşan iç kuvvetlere karşı oluşacak net bir kuvvete bağımlı olarak hareket ederler. Yüzey boyunca oluşan ve denge halinde olmayan bu kuvvetlerin en önemli fiziksel sonucu, varsayıma dayanan bir yüzey gerilimi oluşturmaktadır. Bu gerilim kuvvetinin akışkan serbest yüzeyinde bulunan herhangi bir düzlemi etkilediği varsayılmıştır (Solmaz, 2002).

Mekanikte kullanılan bütün gözlemler kuvvet veya enerji terimleriyle açıklanabildiğinden beri akışkan yüzeyler hakkında yapılan tahminler de benzer olarak tarif edilir. Ancak bu kez yüzey gerilimi veya yüzey enerjisi kavramları kullanılır. Yüzey enerjisi, yüzeydeki moleküllerin enerjisinin akışkanın içindeki moleküllerin enerjisinden fazla olmasından kaynaklanır.

Yüzey gerilim gradyanları sıcaklık gradyanlarını ortaya çıkarır. Eğer bir silikon yağı tabakası ince metal plaka üzerine uygulanırsa, plakanın altına sıcak lehimlenen demir sürülürse plaka üzerindeki akışkan içersinde bariz bir nokta belirir. Demir, plakanın altında hareket ettirildiğinde bu nokta da demirin hareketine göre aynı şekilde hareket eder. Sıcaklığı yükseltmek her zaman yüzey gerilimini düşürür. Çünkü molekülleri yüzeye çekmek kolaylaşır. Lehimlenen demirin üzerinde, sıcak akışkanın onu çevreleyen soğuk akışkana kıyasla daha düşük bir yüzey gerilimine sahip olduğu görülür. Böylece sıcak yüzey soğuk bölgelere çekilir. Bu da gösterir ki yüzey boyunca sıcaklık gradyanları bazı hareketlere ister istemez yol açar.

### **1.5. Yarı iletken Malzemelerin Üretimi ve Kristal Büyütme Teknikleri**

Endüstriyel olarak yarı iletken malzemelerin kullanımı için mümkün olduğunca saf kristaller büyütülmelidir. Bu malzemelerin doğada saf olarak bulunmaması çeşitli kristal büyütme teknikleri ve yöntemleri uygulanarak ideal yarı iletken malzeme üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla yeryüzünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarına uzay çalışmalarıyla da destek verilmektedir. Uzay çalışmalarında öne çıkan bir konu yerçekimsiz bir ortamda doğal konveksiyonun etkisi olmadan saf ve ideal yarı iletken malzeme üretilmesidir. Elde edilen veriler ile yeryüzündeki verilerin karşılaştırılması sonuçların irdelenerek yeryüzünde de aynı kalitede üretim yapabilmek için çalışmalarda olumsuz etkenlerin nasıl azaltılacağına çareleri aranmalıdır. Kristaller farklı şekillerde üretilir:

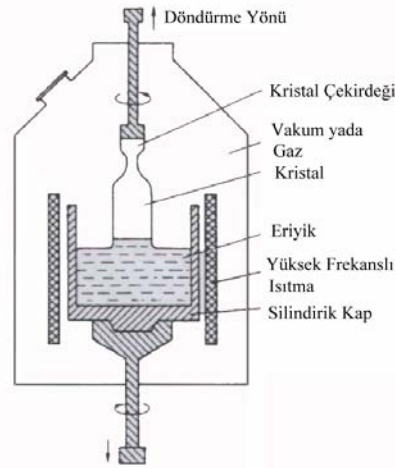
- ⊙ Çözültiden Kristal Büyütme
- ⊙ Gaz Fazdan Kristal Büyütme
- ⊙ Hidro Termal Sentez ile Kristal Büyütme
- ⊙ Eriyikten Kristal Büyütme
- ⊙ Faz Değişimlerinden Kristal Yapı Elde Etme

Günümüzde endüstriyel kullanım alanında, eriyikten kristal büyütme tekniği ön plandadır. Bu tekniklerin yanı sıra farklı kristal büyütme yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler çok kapsamlı olmakla beraber aşağıda bazı yöntemler belirtilmiştir.

- ⊙ Czochralski Yöntemi
- ⊙ Bridgman Yöntemi
- ⊙ Stockbarger Yöntemi
- ⊙ Nacken ve Kyropoulos Yöntemi
- ⊙ Verneuil Yöntemi

Bu yöntemlerde başlıca üç etken göz önünde bulundurulmalıdır. En önemli etken yarı iletken malzeme üretiminde kullanılan birçok malzemenin toksitli olmasıdır. Bu nedenle üretim esnasında çok dikkatli davranılmalı ve gerekli güvenlik önlemleri alınmalıdır.

Yukarıda sıralanan yöntemler arasında, uygulama da kolaylıkları açısından Bridgman ve Stockbarger yöntemleri öne çıksa da, günümüzde en çok tercih edilen yöntem 'Czochralski Yöntemi'dir. Bu yöntem, laboratuvar çalışmalarının yanı sıra endüstriyel amaçlı üretimlerde için de tercih edilmektedir.



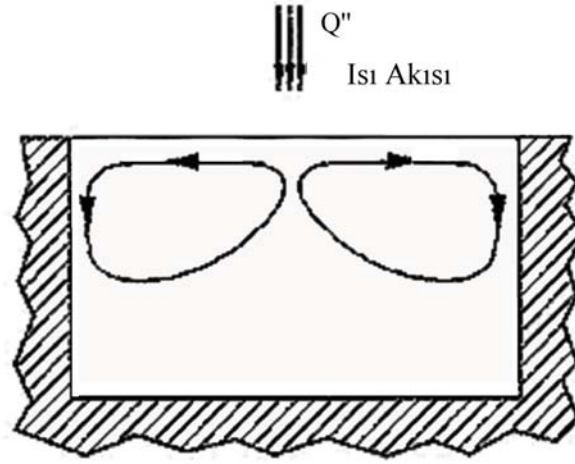
Şekil 1.8. Czochralski Yöntemi ile kristal büyütme

Czochralski Yöntemi ile kristal büyütülürken, silindirik kap dolayısıyla içerisindeki kristal dakikada ortalama 10 defa dönerek eşit sıcaklık dağılımı sağlanır (Ringer,1995).

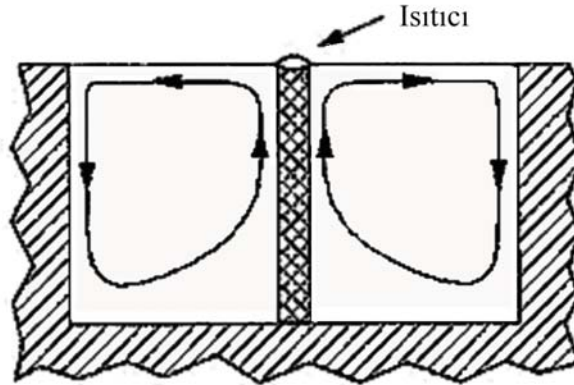
Bu yöntemlerde yüzey gerilimli akış kendi arasında şu şekilde sınıflandırılabilir:

a) Silindirik kap içerisinde yüzey gerilimli akışın incelenmesi (Şekil 1.9.):

- i. Sabit ısı akısına sahip sistemler (CF) (Şekil 1.9.(a))
- ii. Sabit sıcaklığa sahip sistemler (CT) (Şekil 1.9.(b))
- iii. Açık kaplar içerisinde akışkan yüzeyi boyunca sıcaklığa sahip sistemler



(a) CF Konfigürasyonu



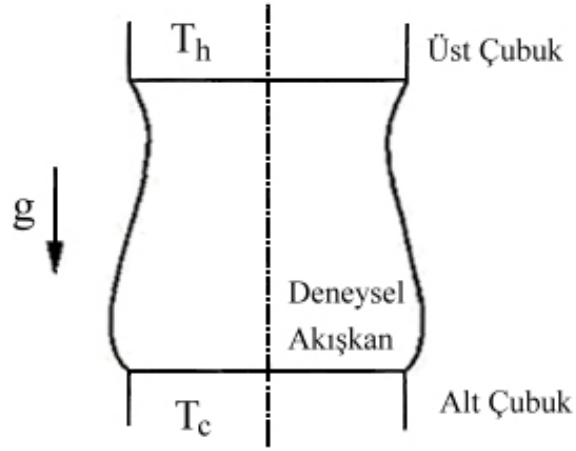
(b) CT Konfigürasyonu

Şekil 1.9. Yüzey geriliminin belirlenmesinde kullanılan kaplı işlemler için iki farklı yöntem (Lee ,1994)

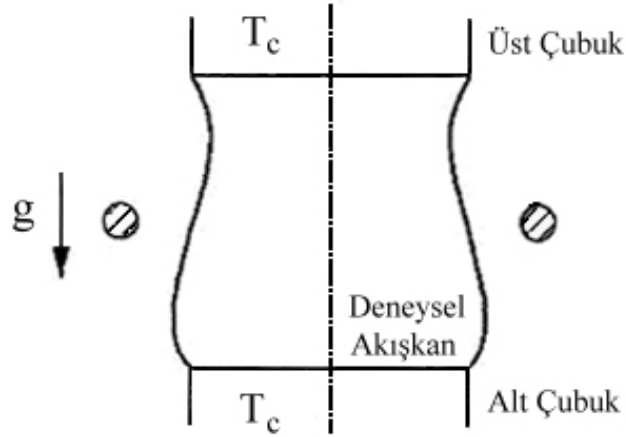
b) Yüzey gerilimli akışın kapsız olarak incelenmesi:

Yüzey geriliminin kapsız olarak incelenmesi akışkanın herhangi iki yüzeyi arasında oluşan sıcaklık farkı ile meydana gelen yüzey gerilim hareketlerini inceleyen konfigürasyonlar (Şekil 1.10.):

- i. Yarım bölge yüzen sistem (Half-zone tekniği) (Şekil 1.10.(a))
- ii. Tam bölge yüzen sistem (Full-zone tekniği) (Şekil 1.10.(b))



(a) Half-Zone Konfigürasyonu



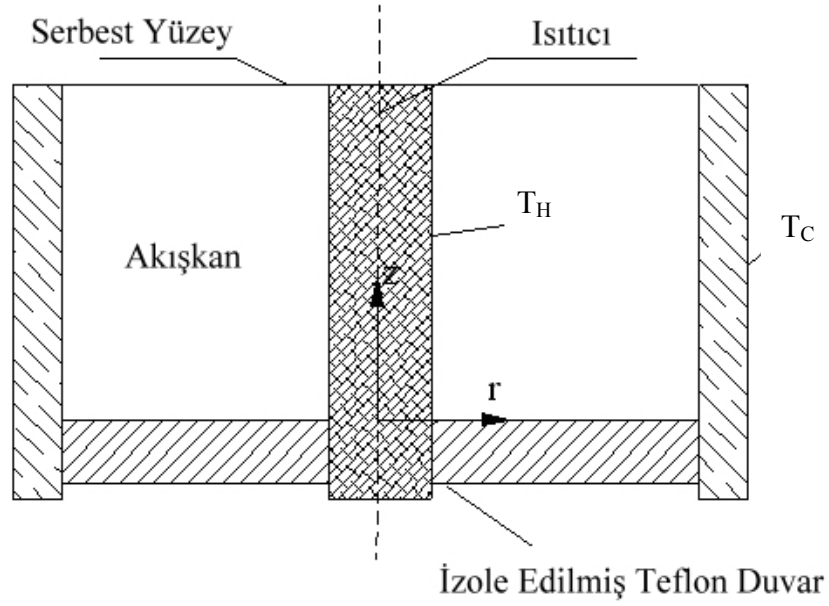
(b) Full-Zone Konfigürasyonu

Şekil 1.10. Yüzey geriliminin belirlenmesinde kullanılan kapsız işlemler için iki farklı yöntem (Lee ,1994)

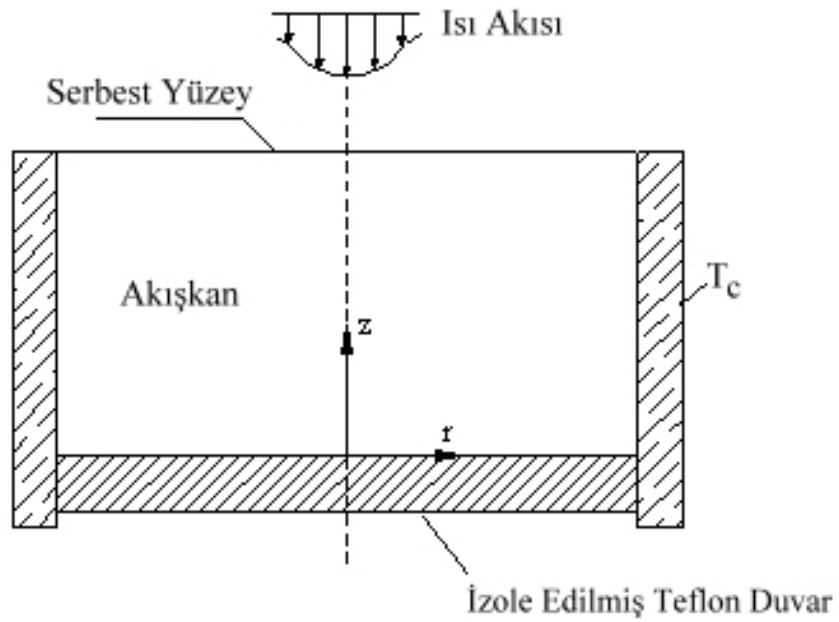
Genel olarak normal şartlar altında termal gerilimli konveksiyonun etkileri üzerine yapılan çalışmalar, yer çekimi ivmesinin etkisini azaltmak için deney düzeneğinin de mümkün olduğunca küçük tutulmasını gerektirir. Deney konfigürasyonlarından biri olan Şekil 1.10.'da verilen yüzen bölge sistemi (floating-zone tekniği), diğer konfigürasyonlara göre nispeten daha büyük bir serbest yüzeye sahip olduğu için geçmişte daha çok irdelenmiştir. Kapsız işlemde kaplı işleme karşı akışkanın kap ile temas noktasındaki sıvı ile katı yüzey arasında yüzey gerilimi gibi bir problemin olmamasını sağlar.

Yüzey gerilimini gözlemlemek ve nümerik olarak hesaplamak için kullanılan farklı yöntemlerden bahsettik. Bu konfigürasyonlar arasından, bu çalışmada, 'Czochralski Yöntemi'ne benzer bir yöntem ile, silindirik kaplı sabit sıcaklığa sahip (CT) yüzey gerilimli konveksiyon akışı ele alınmıştır.

Kısaca izah edecek olursak, silindirik bir kap içerisine akışkan konulur. Bu kabın dış çeperi içerisinden soğutucu akışkan geçen bir serpantin ile çevrelenmektedir. Silindirik kabın merkezinde ise sabit sıcaklık sağlayan bir tel kullanılmıştır. Bu tel akışkanın ısı kaynağı olarak iki taraftan verilen artı ve eksi uçlar sayesinde bir güç kaynağı ile kademeli şekilde ısıtma sağlanmaktadır. Akış serbest yüzey boyunca akışkanın fiziksel özelliklerinin değişmesiyle sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru gerçekleşir. Şekil 1.11.'de silindirik koordinatlar sisteminde, merkezden sabit sıcaklık etkisiyle oluşan yüzey gerilim hareketinin incelendiği deney seti görülmektedir.



Şekil 1.11. Silindir koordinatlar sistemindeki merkezden sabit sıcaklık etkisiyle oluşan yüzey gerilim hareketinin incelendiği deney seti



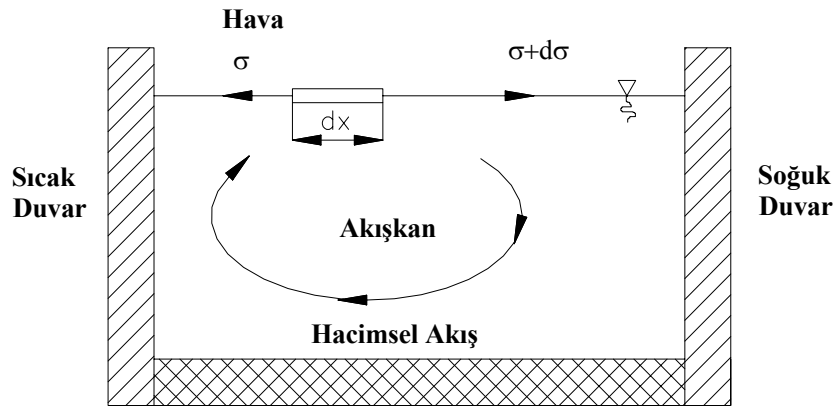
Şekil 1.12. Silindir koordinatlar sistemindeki lazer ısı akısıyla oluşan konfigürasyon



Şekil 1.11. ve Şekil 1.12.'de,  $z$ , silindir koordinat sisteminin dikey doğrultudaki yönü,  $r$ , silindir koordinat sisteminin radyal doğrultudaki yönü,  $T_C$ , soğutucu bakır duvar sıcaklığı ve  $T_H$ , ısıtıcı sıcaklığıdır.

Deney aşamasında, oluşturulan bu tertibat içerisinde kullanacağımız tel yarıçapı sabit kalmak üzere silindir çapları değiştirilerek,  $Hr$  oranı yani tel yarıçapının silindirik kabın yarıçapına oranı değişecektir. Dolayısıyla yüzey gerilimlerini hesaplamak için oluşturacağımız boyutsuz parametreler bu değerlere göre şekillenecek ve analitik bir analiz yapılmıştır. Deneyimizde kullanacağımız boyutsuz sayılar, ileriki konularda açıklanarak matematiksel modelleme yapılacaktır.

Şekil 1.13.'de şematik resmi görülen termal yüzey gerilimli akışın, normal yer çekim ivmesine sahip ortam şartları altında, kristal büyütme sistemlerinde ısı ve kütle transferi için ihmal edilebilir bir yüzey etkisi olduğu düşünülüyordu. Ancak bazı kristal büyütme teknikleri için termal gerilim konveksiyonlarında, sıvı akışkan içinde, özellikle sıcaklık gradyanlarını çok büyük ise, termal gerilimli akış çok önemlidir ve ihmal edilemez.

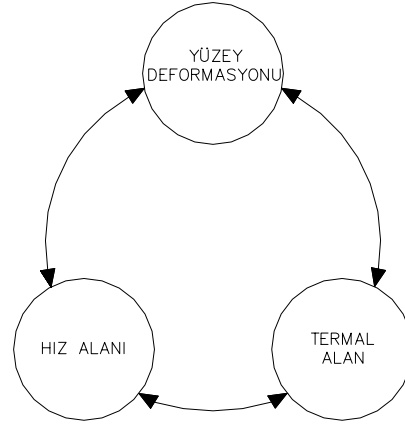


Şekil 1.13. Yüzey gerilimli konveksiyonel akış

Transport Fenomenlerinde yüzey gerilim kuvvetleriyle hareket eden konveksiyonlardan biri olarak bilinen, silindirik kap içersine doldurulan akışkanın silindirik kabın merkezinden itibaren aksel olarak ısıtılan silindirin radyal yöndeki çeperlerinden soğutulan bir konfigürasyon kullanılacaktır. Bu konfigürasyonda sıcak ve soğuk bölgeler arasındaki yüzey gerilim modelinde değişik boyutsal oranlarda ısıtıcı ile silindirin soğutucu dış çeperi arasındaki mesafe ve silindirin aksel doğrultudaki derinliği silindir içerisinde bulunan akışkanın yüzey gerilim hareketindeki boyutsuz parametrelerin değişmesi ile akışkanın hareketi incelenecektir. Bu hareket yukarıda bahsedilen parametreye bağlı olarak akışkanın rejim hali (steady state) olan ve rejim hali olmayan (unsteady state) değerlere geçiş noktası araştırılmıştır. Bu iki durum için akışkanın hız ve sıcaklık dağılımı araştırılmıştır.

Akışkana verilen ısı miktarı belirli bir kritik noktaya ulaştıktan sonra termokapiler yüzey gerilimli akış periyodik olarak osilasyonlu harekete geçmektedir. Osilasyon olayı ilk olarak Schwabe (1978), Chun ve Wuest (1978) tarafından yarım bölge yüzen sistemler için keşfedildikten sonra birçok araştırmacı bu konu üzerine eğilerek farklı konfigürasyonlarda bu olayı teorik ve deneysel olarak araştırmaya başlamışlardır. Bu hareket kristalin mükemmelliğini ve homojenliğini bozmaktadır. İstenmeyen bu osilasyonlu hareketin nedenleri, nedenlerinin azaltılması osilasyonlu akışın oluşum mekanizması ve iyileştirme çareleri üzerinde çalışılmıştır.

Şekil 1.14.'de görüleceği üzere osilasyonlar hız alanı, termal alan ve serbest yüzey deformasyonlarından oluşan bağlantılı üç yola bağlıdır. Bu mekanizma bu tez çalışmasının bir özeti niteliğindedir.



Şekil 1.14. Hız alanının termal alanın ve serbest yüzey deformasyonunun üçlü sistemine sebep olan osilasyon

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Chun ve Wuest (1978) ayrıca Schwabe (1978), yüzen bölge konfigürasyonunda sadece yüzey gerilimli konveksiyona rastlamışlardır. Yüzen bölge konfigürasyonunun, yarım yüzen bölge (half-zone) denilen konfigürasyonunda oluşan sıcaklık ve hız alanlarını incelemiştirler (Bkz. Şekil 1.10.(a)). Yüzey gerilimli akışın önemli bir özelliği olan önceden bilinen şartlar altında durağan bir akıştan, akışın osilasyonlu (zaman-periyotlu) bir akışa geçiş göstermesini ilk kez gözlemleyen bilim adamları olmuşlardır. Osilasyonlu yüzey gerilimli akış için yapılan deneysel araştırmaların çoğunda kolaylık sağlama açısından yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanlar kullanılarak yüzen bölge sistemlerinden biri olan yarım yüzen bölge simülasyonunu uygulamışlardır. Genel olarak, yüzen bölge tekniğinin mikro yer çekimi ivmesine sahip ortamlarda yüksek kaliteli kristal üretimi için uygun bir metot olduğu düşünülüyordu. Ancak osilasyon hareketinin kaliteli kristal üretiminde ters etki yarattığı ve kristalin kalitesini düşürdüğü gözlemlendi.

Ostrach (1977 ve 1979), 70'li yıllarda, rejim halindeki yüzey gerilimli akış için analitik bir analiz yapılmıştır. Hem viskoz ve hem de sıcaklık gradyanlarının her ikisinin de bir arada bulunduğu durumlar için kompleks yüzey gerilimli akış alanını tanımlamak amacıyla önemli boyutsuz parametrelerin kullanılmasını önermiştir.

Ostrach (1982) çalışmasında düşük yerçekimi olan ortamlardaki akış hareketlerini ele alarak, yerçekiminin akışkanlar üzerindeki etkisini, yüzme etkisinin akışkanlar üzerindeki etkisini, konveksiyonların düşük yerçekimi olan ortamlardaki konveksiyonel etkiyi ve termokapiler konveksiyon etkisini ana başlıklar altında inceleyerek uzay çalışmalarının önemini dile getirmiştir. Bu çalışma literatürde yapılan tüm çalışmalar için önemli bir kaynak niteliğini taşımakla beraber uzay çalışmalarına bir yol çizmiştir.

Preisser ve Schwabe (1983), osilasyonların oluştuğu durumları incelemiştirler. Temel parametre olarak Marangoni sayısını ( $Ma$ ) kullanmışlardır. Belirli bir Prandtl sayısı ( $Pr$ ) ve belirli boyutlar için osilasyon hareketinin başladığı kritik bir Marangoni sayısı ( $Ma_{kr}$ ) olduğunu keşfetmişlerdir. Yüksek Prandtl sayısına ( $Pr$ ) sahip akışkanlar için bu kritik Marangoni sayısının ( $Ma_{kr}$ )  $10^4$  mertebesinde olduğunu tespit etmişlerdir.

Kamotani (1984), deneysel olarak Marangoni sayısının tek başına hareket durumlarını ifade etmek için yeterli olmadığını göstermiştir. Hareketi kontrol eden başka bir faktörün serbest yüzeyin şekil değiştirmesi olabileceği ortaya koyulmuş ve hız ve sıcaklık alanlarının serbest yüzey hareketini etkileyerek osilasyonlara sebep olduğu öne sürülmüştür.

Ostrach (1985), bu fikre dayanarak, osilasyonlu termal yüzey gerilimli konveksiyonel akışa teorik olarak bir açıklama getirmiş ve bu akışı etkileyen parametrenin şekil faktörü,  $S = \frac{1}{Pr} \frac{\sigma_T \Delta T}{\sigma}$ , olduğunu ortaya koymuştur. S, şekil faktörü, serbest yüzeyin şekil değiştirmesini etkileyen faktördür. Yüksek Prandtl sayısına (Pr) sahip 6 farklı akışkan için yapılan deneylerin sonuçları 'S' şekil faktörünün termal yüzey gerilimli konveksiyonel akış hareketini etkilediği kanıtlanmıştır.

Raymond (1990) kitabında fiziğin temellerine üst düzeyde yer vermiştir.

Monti ve Fortezza (1991), mikro yer çekimi ivmesi altında yüzen bölge konfigürasyonunda silikon yağı kullanarak yaptıkları başka bir deneyde büyüklük açısından daha yüksek bir kritik Marangoni sayısı ( $Ma_{kr}$ ) elde etmişlerdir.

Lee ve Kamotani (1991), bir silindirik kap yardımıyla termal yüzey gerilimli akışın osilasyona geçişi üzerine çalışmışlardır.

Lee (1991) ise sabit ısı akışı altında yüzen bölge konfigürasyonunu incelemiştir.

Munson (1991), genel olarak akışkanlar mekaniğinin temellerini ele aldığı bir kitap sunmuştur.

Ostrach ve Kamotani (1992), silindirik kaplar kullanılarak yapılan deneylerinde Marangoni sayısı (Ma)  $3 \times 10^5$  gibi yüksek değerler elde ettikleri halde osilasyona rastlamamışlardır.

Kamotani (1992), silindirik kabın merkezine konulan bir tel ile ısıtma sağlanan bir sistem içerisinde termal yüzey gerilimli akışı için osilasyon şartlarını araştırmıştır.

Bu çalışmalar sonucunda, 'S' şekil faktörünün akış hareketini olumlu yönde etkilediği ve osilasyon safhasında half-zone konfigürasyonundan çok daha farklı bir akış yapısına sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Lee (1994), tez çalışmasında küçük boyutlu silindirik kaplar içerisinde serbest yüzeyi CO<sub>2</sub> lazer yardımıyla ısıtarak, termokapiler konveksiyon altında osilasyonların başlama sürecini araştırmıştır. Osilasyonun başlama sürecine etken olan sebepleri araştırmışlardır. Rejim hali akış nümerik olarak hesaplanmıştır. Ve sonuçlar sabit ısıtma yapılan konfigürasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Ringer (1995)'de yaptığı çalışmada yarı iletken malzemeleri detaylı olarak inceleyerek insanlık için önemini vurgulamıştır. Çalışmasında yarı iletken malzeme sınıflarını, kullanım alanlarını tayin etmiştir.

Kamotani, Ostrach ve Pline (1995) yılında yaptıkları çalışmalarında merkezinden ısıtıcı bir tel yardımıyla ısıtma yapılan silindirik kaplar içerisindeki termokapiler akışı inceleyerek hız alanını belirleyerek Marangoni sayısının hız alanı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Akışın nümerik analizi yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmışlardır.

Kamotani, Lin ve Ostrach (1995) yılında yaptıkları ortak çalışmalarında küçük silindirik kaplar içerisinde oluşan rejim halindeki ve osilasyonlu termokapiler akışları deneysel olarak incelemişlerdir. Kritik sıcaklık farklarını tayin ederek akış frekansları üzerine araştırmalar yapmışlardır. 'S' şekil faktörünün termal yüzey gerilimli konveksiyonel akış hareketi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Tüm bu çalışmalar sonucunda, 'S' şekil faktörünün osilasyonlar üzerindeki şekil değiştirmesini nasıl etkilediğini gözlemleyebilmek için ancak çok küçük deney alanlarının (serbest yüzeylerin) kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Kamotani, Chang ve Ostrach (1996)'da yaptıkları çalışmada simetrik olmayan termokapiler akışları yer çekimli ortamda ele alarak, CT ve CF konfigürasyonlar için ayrı ayrı deneyler yapmış sonuçları karşılaştırmışlardır.

Kamotani (1999) yılında yayınladığı çalışmasında, uzay laboratuvarlarında yerçekimsiz olarak açık silindirik kaplar içerisinde elde ettiği sonuçları bir araya getirmiştir. Osilasyonların başlama şartlarını tayin ederek ısıtma tiplerinin osilasyonlar üzerine etkisini araştırmıştır.

Kamotani, Ostrach ve Masud, (2000) yılındaki yayınların da ise, Kamotani'nin 1999 yılındaki çalışmasını genişleterek yine silindirik kaplar üzerine çalışma yapmışlardır. Üç farklı silindirik kap içerisinde bizim de çalışmamızda kullandığımız konfigürasyonu ele alarak osilasyonlar esnasında serbest yüzey deformasyonunu incelemişlerdir. Serbest yüzey deformasyonunu etkileyen parametreleri araştırmışlardır.

Lavalley, Amberg ve Alfredson (2001) yaptıkları çalışmada, yine silindirik kapları ele alarak yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanları kullanmışlardır. Akışı gözlemleyerek detaylı sonuçlar elde etmişlerdir.

Solmaz (2001), yaptığı seminer çalışmasında silindirik hacim içerisinde oluşan yüzey gerilim kuvvetlerindeki boyutsuz sayıları incelemiştir.

Solmaz (2002), yaptığı seminer çalışmasında silindirik hacim içerisinde akışkan yüzey gerilim hareketi anındaki hız profilini incelemiştir.

### 3. MATERYAL VE METOD

Silindirik kaplarda yüzey gerilimli konveksiyonel akış bu çalışmanın esas konusudur. Sabit sıcaklık altında yüksek Prandtl sayısına sahip ( $Pr=67$ ) silikon yağının serbest yüzeyindeki hareketi araştırılmıştır (Bkz. Çizelge 3.1.). Sıcaklık, akışkan içerisinden geçirilen ve ısı verecek olan bir tel vasıtasıyla arttırılmıştır. Soğutucu bir akışkan ise sistemi çevreleyerek, istenilen sıcaklık altında akışkanın hareketi incelenmiştir. Soğutucu ise akışkanı çevreleyen silindirin çeperlerindeki serpantin sayesinde silindirik kabın dış çeperlerini soğutacak dolayısıyla akışkanın serbest ara yüzeyindeki sıcaklık gradyeni akışkan hareketini gerçekleştirmiştir. Serbest yüzey boyunca artan sıcaklık gradyeni ile birlikte akışkanın viskozitesinin gradyeninin de azalmasıyla oluşan yüzey gerilimi sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru gerçekleşmiştir.

Şekil 1.9.'da farklı ısıtma sistemleri uygulanan silindirik kaplar içerisinde oluşan rejim halinde yüzey gerilimli konveksiyonel akış için oluşabilecek akış çizgileri görülmektedir. Şekil 1.10.(a)'da ve sabit ısı akısı (CF) ile akışkan yüzeyinde yüzey gerilimi sayesinde oluşan akışkan içerisindeki yüzey gerilim hareketinin akış ipçikleri; Şekil 1.9.(b) ve Şekil 1.11.'de de ise silindirik kabın merkezine dikey olarak yerleştirilen sabit sıcaklığa sahip (CT) ısıtıcı bir tel sayesinde oluşan yüzey gerilim hareketinin akış ipçikleri görülmektedir.

Osilasyonlar esnasında akışkan içersine yerleştirilen bir telle ısıtma sağlanan sistemde rejim hali akışta düzenli bir şekilde hareket ederken ısıtıcı ile soğutucu arasındaki sıcaklık farkı kademeli olarak arttırıldığında bu akış ipçiklerinin hareketinin zamandan bağımsız olma şartının bozularak değişik periyodik ve zamana bağımlı şekilde hareket ettiği görülmektedir. Bu hareket ise bize akışkanın osilasyonlu hareketin başladığını gösterir. Bu osilasyonlu hareket değişik şekillerde (geri-ileri, çarpmalı, dönel) meydana gelmektedir. Oysa diğer sistemde, CF'de, dışarıdan bir lazer kullanılarak kap içerisindeki akışkan yüzeyinin bölgesel olarak ısıtılması durumunda, toplam ısı akısı sabit kalır ancak sıcaklık farkı değişir. Bu çalışmada CT konfigürasyon için deney yapılarak, sonuçlar öncelikle matematiksel olarak irdelenmiştir.

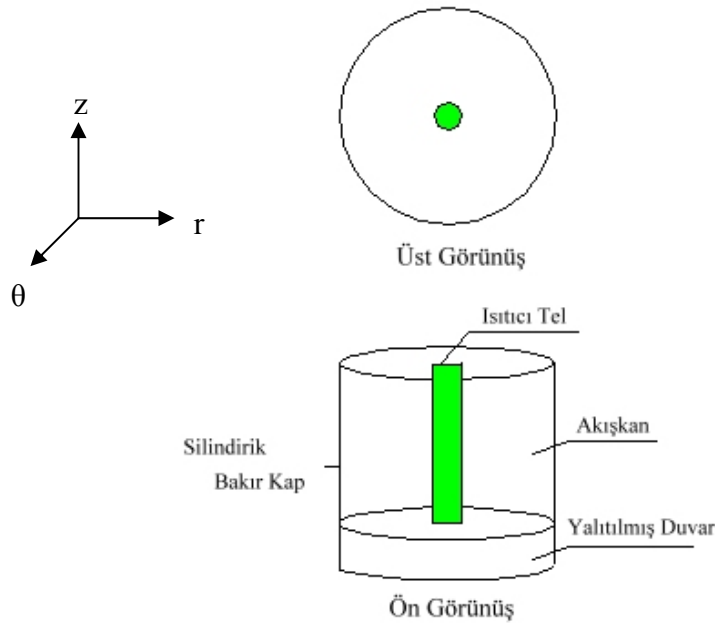


### 3.1. Matematiksel Modelleme

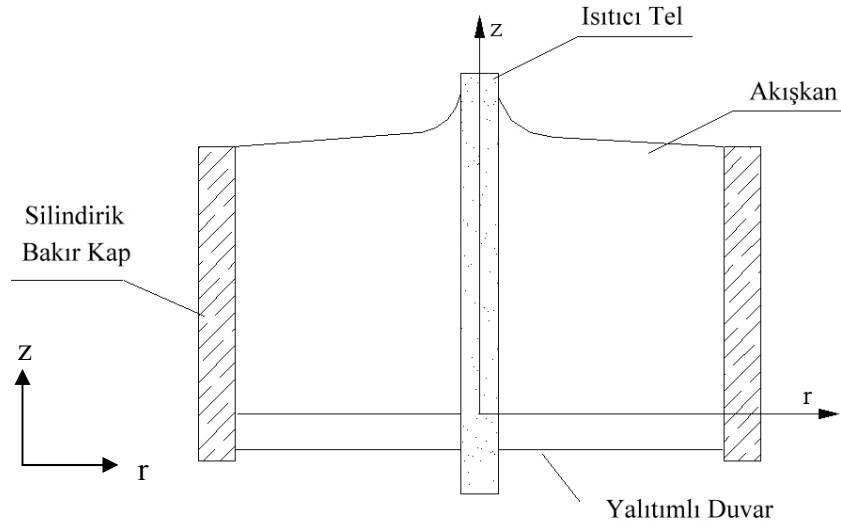
#### 3.1.1. Temel Denklemler

Deneysel çalışmamızı desteklemek amacıyla matematiksel bir analiz yapılmıştır. Analitik analiz, deney hakkında detaylı bilgi verecektir. Analiz sadece rejim hali durumlar için geçerlidir. Akışın rejim hali laminer, sıkıştırılmaz ve asimetric olduğu kabul edilmektedir. Serbest yüzeyin her zaman düz ve viskozite haricinde akışkan özelliklerinin daima sabit olduğu düşünülmüştür.

Çapı  $R$  olan bir silindirik kap sıkıştırılmaz ve viskoz bir akışkan ile tamamen doldurulmuştur. Konfigürasyon esas olarak üç boyutludur (Şekil 3.1.). Silindirik koordinatlarda radyal simetriden ötürü akış yapısında değişiklik olmaz ve akış yapısı denklemleri birbirine benzer. Akışkan rejim halindeyken iki boyutlu denklemlerin çözümü üç boyutlu denklemlerin çözümüne nazaran daha kolaydır ve daha az zaman alır. Dolayısıyla biz, hız profilini iki boyutlu denklemler ile çalışarak elde edeceğiz. Başka bir deyişle sistemin asimetric olmasından dolayı iki boyutlu hesaplama tercih edilmiştir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.1. 3-Boyutlu silindirik kap



Şekil 3.2. 2-Boyutlu silindirik kap koordinatları

Rejim hali akış için önemli parametrelerin belirlenmesinde akışın rejim halinde ayrıca serbest yüzeyin, akışkan rejim halinde iken, düz olduğu kabul edilir. Yukarıda bahsedilen akışkan hareketleri temelde akışkanlar mekaniğindeki hareket denklemleri ile ifade edecek olursak, bu hareket denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- i. Süreklilik Denklemi (The Continuity Equation)
- ii. Navier-Stokes Denklemi (The Navier-Stokes Equations)
- iii. Enerji Denklemi (The Energy Equation)

Akışın rejim halinin laminar, sıkıştırılamaz ve asimetric olduğu kabul edilmektedir. Serbest yüzeyin her zaman düz ve viskozite haricinde akışkan özelliklerinin daima sabit olduğu düşünülmüştür. Şimdi bu denklemleri üç ve iki boyutlu akış için tek tek yazalım.

### 3.1.1.1. Üç Boyutlu Akış Denklemleri

Silindirik koordinatlarda (r,  $\theta$ , z), süreklilik denklemi denklem 3.1.'de görüldüğü gibidir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (3.1.)$$

Silindirik koordinatlarda (r,  $\theta$ , z), hareket denklemleri sırasıyla aşağıda denklem 3.2., denklem 3.3. ve denklem 3.4. olarak verilmiştir:

r-bileşeni,

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \rho g_r \quad (3.2.)$$

$\theta$ -bileşeni,

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u v}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \rho g_\theta \quad (3.3.)$$

z- bileşeni,

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (3.4.)$$

Üç boyut için silindirik koordinatlarda (r,  $\theta$ , z), enerji denklemi denklem 3.5.'de görülmektedir.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2\mu \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left[ \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v}{\partial \theta} + u \right) \right]^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \mu \left\{ \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \right) \right]^2 \right\} \quad (3.5.)$$

Eğer  $\theta$  koordinatını simetriden dolayı ihmal edilirse, bu üç boyutlu denklemler iki boyutu denklemlere dönüşür ve aşağıda görüldüğü gibidir.

### 3.1.1.2. İki Boyutlu Akış Denklemleri

Silindirik koordinatlarda  $(r, z)$ , süreklilik denklemi denklem 3.6.'da görüldüğü gibidir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.6.)$$

Silindirik koordinatlarda  $(r, z)$ , hareket denklemleri sırasıyla aşağıda denklem 3.7. ve denklem 3.8. olarak verilmiştir:

r-bileşeni,

$$\left( u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (3.7.)$$

z-bileşeni,

$$\left( u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (3.8.)$$

İki boyut için silindirik koordinatlarda  $(r, z)$ , enerji denklemi denklem 3.9.'da görülmektedir:

$$\rho C_p \left( u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2\mu \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \mu \left\{ \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (3.9.)$$

### 3.1.2. Matematiksel Modelleme için Önemli Boyutsuz Parametreler

Düz bir serbest yüzeye sahip mevcut akışkanda yüzey gerilimli akış hareketi için önemli bazı boyutsuz parametreler kullanılmıştır. Bu denklemler ve sınır şartları esas alınarak çözüme gidilmiştir. Boyutsuz denklemlerin elde edilmesinde aşağıdaki başlıca dört parametre önemlidir.

Şimdi kısaca bu boyutsuz parametreleri ele alalım. Boyutsuz rejim hali ve yüzey gerilimli akış denklemleri aşağıdaki gibidir:

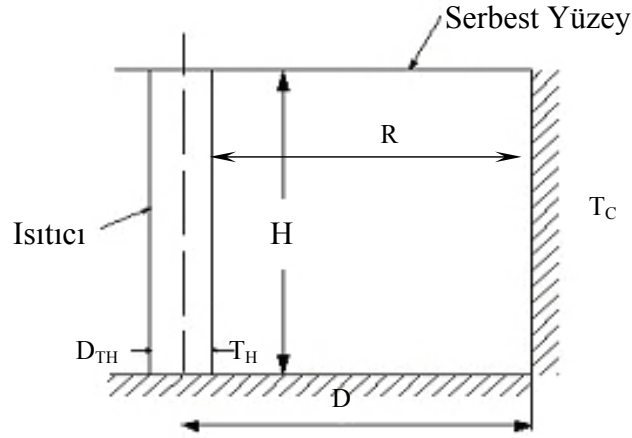
Boyutsal Oran, 
$$Ar = \frac{H}{R}$$

Yüzey Gerilim Reynolds Sayısı, 
$$Re_{\sigma} = \frac{\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| (\Delta T) H}{\mu \nu}$$

Prandtl Sayısı, 
$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Grashof Sayısı, 
$$Gr = \frac{\beta g (\Delta T) R^3}{\nu^2} \quad (\text{Ostrach, 1982})$$

Bu ifadelerde, R silindirik kabın yarıçapı, H akışkanın derinliği, g yerçekimi ivmesi,  $\Delta T$  yüzey boyunca maksimum sıcaklık farkı ayrıca akışkanın fiziksel özellikleri olarak da,  $\nu$  akışkanın kinematik viskozitesi,  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesi,  $\alpha$  termal difüzyon katsayısı,  $\sigma$  akışkanın yüzey gerilim değeri,  $\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right|$  yüzey gerilimi sıcaklık katsayısı ve  $\beta$  hacimsel genişleme katsayısıdır. Bu ifadeler Şekil 3.3.'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Merkezden sabit sıcaklık etkisiyle oluşan yüzey gerilim hareketini oluşturan deney seti

Şekil 3.3.'de,  $R$ , ısıtıcı çubuk ile soğutucu silindir arasındaki yarıçap;  $T_c$ , soğutucu silindirin yüzey sıcaklığı;  $T_H$ , ısıtıcı silindirin yüzey sıcaklığı;  $D_{TH}$ , ısıtıcı telin çapı ve  $H$  ise akışkanın dikey derinliği olarak belirlenmiştir.

Akışkanın fiziksel özelliklerinden olan viskozitenin yine akışkanın fiziksel özelliklerinden olan difüzyon katsayısına oranı olarak bilinen Prandtl sayısı, akışkanın yüzey gerilim hareketinin başlamasında önemli bir boyutsuz sayı olması akışkan seçiminde etkili bir parametredir. 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 oksidini oluşturmaktadır. Oluşan akışkan oksidi yüzey gerilim hareketinin 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 içerisine yerleştirilen hassas sıcaklık ölçer cihazlar ile belirlenebilir. Ancak bu durumda akışkan içerisinde bulunan sıcaklık ölçerler yüzey gerilim deformasyonuna neden olmakta, bu deformasyon gerçekten akışkanın osilasyona başlamasına neden olan bir faktör olması henüz tespit edilememiştir. Bu nedenle bu araştırma Hidro-karbon (H-C) grubu akışkanlar simule edilerek gerçekleştirilecektir.

Bu dört ana parametrenin yanı sıra akışkanın konveksiyon yoluyla transfer edilen ısı değerinin kondüksiyon yoluyla transfer edilen ısı değerine oranı olan ve yüzey gerilimli akışların analizinde kullanılan Marangoni sayısı da yüzey gerilimli akışların analizinde sıkça kullanılmaktadır.

Bu sayı boyutsuz olarak,  $(Ma=PrRe_\sigma)$ , şeklinde ifade edilir. Peclet sayısının farklı bir şekli olan sayı sıcaklık ve hız alanının tanımlanması için önemli bir parametredir. Bu çalışmada silindirik kabın serbest yüzeyin merkezinden sabit sıcaklık yayılmaktadır

(CT konfigürasyonu). Bu çalışmada Marangoni sayısı  $Ma = -\frac{|\partial\sigma}{\partial T}| \frac{(\Delta T)R}{\mu\alpha}$  şeklinde

kullanılmıştır.

Oysa serbest yüzeyin merkezinden yayılan sabit bir ısı akısı dağılımı ve belirli bir ısıtma sınır çapı üzerinde çalışılacaksa, sabit ısı akısına sahip sistemler için ısı kaynağından yayılan ısı sabit olduğuna göre  $\Delta T$  sıcaklık farkı yerine  $Q$  toplam ısı akısını kullanmak daha uygun olacaktır. Bu nedenle CF sistemlerde Marangoni sayısı

$Q$ 'ya bağlı olarak  $Ma_Q = \frac{|\partial\sigma}{\partial T}| Q}{\mu\alpha\kappa}$  şeklinde kullanılacağı tespit edilmiştir (Lee, 1994).

Bizim çalışmamızda, silindirin boyutları belirlenmiş olduğundan dolayı ısıtmada kullanılan telin yarıçapının silindirik kabın çapına oranı olan,  $Hr= D_{HT}/R$  oranı da, çok viskoz gradyeni ve sıcaklık gradyeninden ötürü önemli bir parametredir. Bu nedenle ısıtıcı tel yarıçapının silindirik kabın yarıçapına oranı olan  $Hr$  oranı da aşağıda belirtilmemiş olsa da önemli bir parametredir.

Yerçekimli bir ortamda iç yüzeyin şekli statik Bond sayısı,  $Bo (= \frac{\rho g R}{\sigma})$ , kaynak ile akışkan arasındaki temas açısı ve akışkan içerisinde bulunan akışkanın miktarı ile belirlenir. Bond sayısı şekil faktöründen kaynaklanan bir parametre olarak önümüze çıkar. Yerçekimli ortamda yapılan deneylerde yüzey gerilim kuvvetinin akış üzerine etkisinin öne çıktığı durumlarda,  $R$ , çap küçük tutulmalıdır. Ancak akışı gözlemlemek için bu durum bu çalışma için geçerli değildir.

Momentum denkleminde yola çıkarak, doğal konveksiyonun yüzey gerilimli akışa etkisini temsil eden dinamik Bond sayısı  $Bo_d$ ,  $\frac{Gr.Ar^{1/3}}{Re_\sigma^{4/3}}$  olarak verilir (Ostrach, 1977). Dinamik bond sayısı yüzme etkisini azaltmak amacıyla olabildiğince küçük tutulmalıdır.

Bu sayı yüzme ve yüzey gerilim gradyen kuvvetleri arasındaki ilişkiyi belirler. Yüzey gerilimli akışı gözlemlenmek için silindirik kabın hacminin mümkün olduğunca küçük tutulması gereklidir. Aynı zamanda, yüzey gerilimli akışı sağlamak ve yüzme etkilerinin minimum düzeyde tutmak amacı ile  $Bo_d$  sayısı da mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır.

Yüzey gerilimli akışı belirlemede kullanılan bir başka parametre ise şekil faktörü olan  $S$ 'dir. (Monti ve Forteza, 1991)Yüzey deformasyon süresinin akış periyoduna

oranlanmasıyla elde edilen deformasyon parametresi,  $S = \frac{1}{Pr} \frac{\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \Delta T}{\sigma}$  olarak tanımlanır (Ostrach vd.,1985)

Dışarıdan ısıtılan ve ısı akışı oluşan sistemlerde silindirik kaplar için bu parametre

toplam ısı akısına bağlı olarak,  $S_Q = \frac{\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right|}{\sigma} \frac{Q}{\kappa H} (Hr) Pr^{-1/2}$ , şeklinde ifade edilir (Kamotani vd.,1996)

Yukarıdaki parametre tanımlarından, bu parametrelerin akışkanın termo-fiziksel özelliklerinden, sıcaklık farkından ve uzunluk değerlerinden meydana geldiği görülmektedir. Akışkanın termo-fiziksel özellikleri Çizelge 3.1.'de görülmektedir.

### 3.1.3. Sınır Şartları

Uzunluğu  $R$ , yüksekliği  $H$  ve boyutsal oranı  $A_R=H/R$  olan iki boyutlu silindirik bir kap düşünelim. Sol duvar  $T_H$  ve sağ duvar  $T_C$  sıcaklığında tutulmuş, alt duvar izole edilmiş ve serbest bırakılan üst duvar ise düşük yoğunluk ve viskoziteli pasif bir gaz ile çevrelenmiştir (Bkz. Şekil 3.3.).



Bu kap için sınır şartları aşağıdaki şekildedir:

- i. Sıcaklık nedeniyle oluşan kesme gerilmeleri ve yüzey gerilim gradyanları arasındaki dengenin serbest yüzey boyunca uniform olmaması
- ii. Isıtıcı telin konumunun sabit olması
- iii. Isıtıcıdan yayılan ısının sabit kalması (uniform ısı)
- iv. Kabın yan kenarlarında soğutucudan gelen ısının sabit tutulması (uniform ısı)
- v. Tabanın izole edilmesi
- vi. Serbest yüzey ile ortamdaki hava arasındaki ısı transferinin ihmal edilmesi
- vii. Serbest yüzey ile ortamdaki hava arasındaki radyasyonun ihmal edilmesi

Serbest yüzeyi düz olan sınırlandırılmış bir akışkanın yüzey gerilimli akışı için önemli boyutsuz parametreler, yukarıda ifade edilen hareket denklemleri ve sınır şartları temel olarak ele alınarak elde edilebilir. Ancak akışkan hareketi simetrik olduğundan dolayı silindirik koordinatlarda bulunması gereken üç boyutu almak yerine sadece iki ana boyutu,  $r$  ve  $z$  yönlerini almak yeterlidir.

Daha önce bahsedilen süreklilik denklemi, iki boyutta  $r$  ve  $z$  yönlerindeki momentum denklemleri ve enerji denklemleri boyutsuz hale getirilerek her terimin önündeki ifadeler akışkan hareketini etkileyen boyutsuz sayılara dönüştürülmüştür. Bu boyutsuz sayılar denklem 3.10., denklem 3.11., 3.12. ve 3.13.'de görülecektir. Daha önceki çalışmalarında Ostrach (1977,1979 ve 1985), kullandığımız sınır şartlarını ve sınırlamaları kullanmıştır.

Süreklilik denklemi;

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (3.10.)$$

$r$  yönündeki momentum denklemi;

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{(\text{Re}_\sigma \text{Ar}^2)^{2/3}} \times \left[ A_r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right] \quad (3.11.)$$

z yönündeki momentum denklemi;

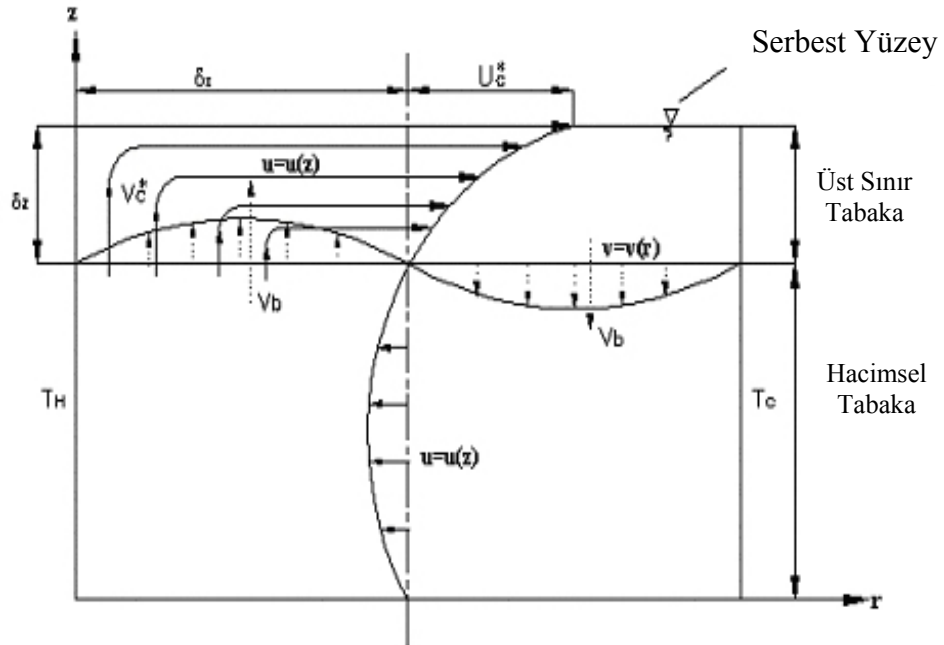
$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{Ar} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{GrAr^{1/3}}{Re_\sigma^{4/3}} + \frac{1}{(Re_\sigma Ar)^{2/3}} \times \left[ Ar^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right] \quad (3.12.)$$

Enerji denklemi;

$$V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{Pr.(Re_\sigma Ar^2)^{2/3}} \times \left[ Ar^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.13.)$$

### 3.1.3.1. Üst Sınır Tabaka Bölgesi

Temel denklemler aşağıdaki dönüşümler kullanarak üst sınır tabaka için boyutsuzlandırılmıştır. Aşağıda boyutsuz sıcaklık, denklem 3.14. ile, boyutsuz hızlar, her konum için ayrı ayrı denklem 3.15. ve denklem 3.16. ile, boyutsuz konumlar (r, z) ayrı ayrı denklem 3.17. ve 3.18. ile, boyutsuz basınç ise denklem 3.19. ile ifade edilmiştir. Burada, v, hız vektörünü, T, sıcaklığı, P, basıncı, g, yerçekimi hız vektörünü ve üst indisli ifadeler boyutsuz değerleri ifade eder.



Şekil 3.4. Üst sınır tabaka ve hacimsel bölgelerdeki hız ve termal alanlar

$$T' = \frac{T - T_C}{T_H - T_C} = \frac{T - T_C}{\Delta T} \quad (3.14.)$$

$$u' = \frac{u}{u_C^*} \quad (3.15.)$$

$$v' = \frac{v}{v_C^*} \quad (3.16.)$$

$$r' = \frac{r}{H} \quad (3.17.)$$

$$z' = \frac{z}{\delta z} \quad (3.18.)$$

$$P' = \frac{P}{\Delta P_I^*} \quad (3.19.)$$

Rejim hali problemler için temel denklemler, kütle, momentum ve enerji eşitliklerden elde edilmektedir.

Yukarıdaki denklemleri süreklilik, r-momentum ve z-momentum denklemlerini boyutsuz olarak ifade etmek için kullanıldığında aşağıdaki denklemler elde edilir. Süreklilik denklemi denklem 3.20., r-momentum denklemi, denklem 3.23. ve z-momentum denklemi, denklem 3.24. olarak aşağıda görülmektedir.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{u_C^*}{H} \frac{(u')}{(r')} + \frac{v_C^*}{\delta z} \frac{(v')}{(z')} = 0 \quad (3.20.)$$

Bu boyutsuz denklemdeki her katsayı terimi yaklaşık olarak eşit olmalıdır. Bu durum denklem 3.21. ile ifade edilebilir.

$$\frac{u_C^*}{H} \cong \frac{v_C^*}{\delta z} \quad (3.21.)$$

Denklem 3.21.'de hızlar bir tarafta toplanacak olursa denklem 3.22. elde edilir.

$$\frac{\delta_z}{H} \cong \frac{v_c^*}{u_c^*} \quad (3.22.)$$

r-Momentum Denklemi:

$$u' \frac{\partial u'}{\partial r'} + v' \frac{\partial u'}{\partial z'} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P_r^*}{u_c^{*2}} \frac{\delta P'}{\delta r'} + \frac{v}{u_c^* H} \left( \frac{\partial^2 u'}{\partial r'^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial z'^2} \right) \quad (3.23.)$$

z-Momentum Denklemi:

$$u' \frac{\partial v'}{\partial r'} + v' \frac{\partial v'}{\partial z'} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P_r^*}{v_c^{*2}} \frac{\delta P'}{\delta r'} + \frac{v}{u_c^* H} \left( \frac{\partial^2 v'}{\partial r'^2} + \frac{\partial^2 v'}{\partial z'^2} \right) \quad (3.24.)$$

Dengede olduğu varsayılan serbest yüzeyde bir ara yüzey gerilimi dengesi vardır. Sıcaklığın lineer bir fonksiyonunu olduğu varsayılan yüzey gerilimi, ' $\sigma$ ' denklem 3.25.'de verilmiştir:

$$\sigma'(T) = \sigma - \sigma_T \left( T' - T_R' \right) \quad (3.25.)$$

Burada,  $\sigma$  ve  $\sigma_T = \frac{\partial \sigma}{\partial T'}$  değerlerinin sabit olduğu ve referans sıcaklığında ( $T_R$ ) değerlendirildiği kabul edilmiştir.

Hız değeri için literatürde sık sık rastlanan üç seçenek sıralanacak olursa;  $u^* = \alpha/L$  (kondüksiyonel eşit konveksiyon),  $u^* = v/L$  (düşük batmazlık) ve  $v^* = \frac{\Delta T}{\mu}$  (Marangoni akışları)'dır.

Temel denklemler ve onların üst sınır şartlarını başta Marangoni sayısı,  $Ma$ , olmak üzere, Prandtl sayısı,  $Pr$ , Reynolds sayısı,  $Re_\sigma$ , ve boyutsal oran,  $A_R$  tarafından karakterize edilebildiği düşünülebiliriz.

### 3.1.3.2. Hacimsel Bölge

Temel denklemler aşağıdaki dönüşümler kullanarak hacimsel tabaka için boyutsuzlandırılmıştır. Aşağıda boyutsuz sıcaklık denklem 3.26 ile, boyutsuz hızlar her konum için ayrı ayrı denklem 3.27. ve denklem 3.28. ile, boyutsuz konumlar (r, z) ayrı ayrı denklem 3.29. ve 3.30. ile, boyutsuz basınç ise denklem 3.31. ile ifade edilmiştir.

$$T' = \frac{T - T_C}{T_H - T_C} = \frac{T - T_C}{\Delta T} \quad (3.26.)$$

$$u' = \frac{u}{u_C^*} = \frac{u}{u_b} \quad (3.27.)$$

$$v' = \frac{v}{v_C^*} = \frac{v}{v_b} \quad (3.28.)$$

$$r' = \frac{r}{H} \quad (3.29.)$$

$$z' = \frac{z}{H} \quad (3.30.)$$

$$P' = \frac{P}{\Delta P_{bulk}^*} \quad [\Delta P_{bulk} = \Delta P_b] \quad (3.31.)$$

Yukarıdaki süreklilik, r-momentum ve z-momentum denklemlerini boyutsuz olarak ifade edilir ise aşağıdaki denklemler elde edilir. Süreklilik denklemi denklem 3.32., r-momentum denklemi, denklem 3.33. ve z-momentum denklemi, denklem 3.34. olarak aşağıda görülmektedir.

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{u_b}{H} \frac{\partial(u')}{\partial(r')} + \frac{v_b}{H} \frac{\partial(vu')}{\partial(r')} = 0 \quad (3.32.)$$

“b” alt indisi hacimsel tabakayı ifade etmektedir. Ve denklem 3.32.’den yola çıkarak  $u_b \cong v_b$  eşitliği yazılabilir.

r-Momentum Denklemi:

$$u' \frac{\partial u'}{\partial r'} + v' \frac{\partial u'}{\partial z'} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P_b}{u_b^2} \frac{\delta P'}{\delta r'} + \frac{v}{u_b H} \left( \frac{\partial^2 u'}{\partial r'^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial z'^2} \right) \quad (3.33.)$$

z-Momentum Denklemi:

$$u' \frac{\partial v'}{\partial r'} + v' \frac{\partial v'}{\partial z'} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P_b}{v_b^2} \frac{\delta P'}{\delta r'} + \frac{v}{u_b H} \left( \frac{\partial^2 v'}{\partial r'^2} + \frac{\partial^2 v'}{\partial z'^2} \right) \quad (3.34.)$$

Dengede olduğu varsayılan her iki (Hacimsel Bölge ve Üst Sınır Tabaka) bölgede, r-doğrultusu ve z-doğrultusu arasında bir basınç dengesi vardır. r-momentum denkleminde mevcut bulunan her terim  $\left[ \frac{\partial P_z}{\partial z} \right]$  ile ve z-momentum denkleminde mevcut bulunan her terim  $\left[ \frac{\partial P_r}{\partial r} \right]$  ile çarpıldıktan sonra bu iki denklem (r-momentum denklem ve z-momentum denklemini) taraf tarafa çıkartılır. Kalan terimlerden denklem 3.35. yazılır. Bu denklem akış yapısının ilk şartıdır.

$$-\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = v \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} \quad (3.35.)$$

Bu çalışmada silindirik kabın kenarlarında ki sıcaklık  $T_H$  ve  $T_C$  sabit alınmış ve alt kenarının da mükemmel biçimde izole edildiği düşünülmüştür. Bu nedenle süreklilik, r-momentum ve z-momentum eşitliklerini çözerken bu durumu göz önüne almalıyız. (Bkz. Şekil 3.4.)’de gösterildiği gibi hız gradyeni de sabit olmalıdır.

$$\text{Sınır Şartı 1:} \quad Z=H, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\sigma_T}{\mu} \frac{\partial T}{\partial r} = \text{Sabit}$$

$$\text{Sınır Şartı 2:} \quad Z=0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

$$\text{Sınır Şartı 3:} \quad \int_0^H u dz = u \delta_{TH} = 0$$

Buradan ilk sınır şartı denklem 3.36.’daki gibidir.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\sigma_T}{\mu} \frac{\partial T}{\partial r} = \text{Sabit} \quad (3.36.)$$

Akışkan mekaniğine göre rijit duvarlardaki hız gradyenleri sıfır olmalıdır. Dolayısıyla ikinci üst sınır denklem 3.37.’de görülmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (3.37.)$$

Ve akış yapısı için üst tabaka bölge için yer değiştirme kalınlığı birim uzunluk için sıfır olmalıdır. Dolayısıyla üçüncü üst sınır koşulu denklem 3.38.’de görülmektedir.

$$\int_0^H u dz = 0 \quad (3.38.)$$

### 3.1.3.3. Çözüm Yöntemi

Bu asimetrik konveksiyonların çözümü aşağıda gösterildiği gibi elde edilmiştir.

$$-u \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} \quad (3.39.)$$

Hacimsel bölge için z doğrultusunda ki hız profilinin ikinci türevi sabit olmalıdır. Dolayısıyla denklem 3.39.'un ikinci türevi denklem 3.40.'ı verir. Ve bu terim bir "A" sembolüne eşitlenir.

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = A \quad (3.40.)$$

Başlangıç terimini denklem 3.41.'deki gibi ifade edebiliriz. Elde ettiğimiz denklem 3.41.'de denklem 3.40.'ın bulunduğu yere "A" sembolü yerine konularak denklem 3.42. elde edilir.

$$\frac{\partial^3 u}{\partial z^3} - u \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = 0 \quad (3.41.)$$

$$\frac{\partial^3 u}{\partial z^3} - uA = 0 \quad (3.42.)$$

Başlangıç teriminde önceden belirlenen sınır şartları da (S.Ş. 1, S.Ş. 2, S.Ş. 3) yani denklem 3.36., 3.37., 3.38.' de yerlerine konularak başlangıç terimi son şeklini alır. Elde edilen bu son denklem, denklem 3.43. olarak aşağıdaki gibi çözümlere düzenlenir;

$$U_{(z)} = -\frac{2\sigma_T \Delta T}{\alpha H \mu} e^{\frac{\alpha H}{2}} \frac{1}{(A^* B^* + d)} \left[ \left\{ -\left( e^{\alpha H} \right) A^* - \left( e^{-\frac{\alpha}{2} z} \cos \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha z \right) A^* \right\} + \left\{ e^{-\frac{\alpha}{2} z} \sin \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha z \right\} \right] \quad (3.43)$$



Bu denklem son şeklini alırken bazı kısaltmalar yaptık. Bu denklemin açık halini görmek için bu ifadeler denklem 3.43.'de yerine konulmalıdır. Ana kısaltmalarımız (A) denklem 3.44.'de, ( $\alpha$ ) denklem 3.45.'de ve (B) denklem 3.46.'de görülmektedir. Şimdi bu denklemleri verelim:

$$A^* = \frac{a - \sqrt{3}e^{\frac{\alpha H}{2}}}{c + 3e^{\frac{\alpha H}{2}} - 2e^{\frac{\alpha H}{2}}} \quad (3.44.)$$

Ve yukarıda daha önceden açıklandığı üzere;

$$\alpha = A^{\frac{1}{3}} \quad (3.45.)$$

$$B^* = b + 2e^{\frac{3}{2}\alpha H} \quad (3.46.)$$

Bu ana kısaltmalar içerisinde kullanılan kısaltmalar ise sırasıyla denklem 3.47., denklem 3.48., denklem 3.49. ve denklem 3.50.'de görülmektedir.

$$a = \sin \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha H + \sqrt{3} \cos \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha H \quad (3.47.)$$

$$b = \sqrt{3} \sin \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha H + \cos \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha H \quad (3.48.)$$

$$c = \sqrt{3} \sin \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha H - \cos \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha H \quad (3.49.)$$

$$d = \sin \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha H - \sqrt{3} \cos \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha H \quad (3.50.)$$

Analitik metodun sonucunda, rejim hali akış için, elde edilen grafik Şekil 4.24.'de verilmiştir (Bkz. Şekil 4.24.).

### 3.2. Deneysel Prosedür

Deneyde kullanılan tüm cihazlar, silindirik kaplar içerisine yerleştirilen akışkanın serbest yüzeyinin merkezinden ısıtıcı bir tel geçirilerek oluşturulan konfigürasyonda başta osilasyon olayı olmak üzere termokapiler akış üzerine çalışmalar yapmak amacıyla en uygun şekilde seçilmiştir. Bu aparatlar, akışı net olarak gözlemleyebilmek, sıcaklık ve hız alanını ölçmenin yanı sıra yüzey gerilimi etkisini artırırken aynı zamanda da yüzme etkisini en aza indirgeyecek şekilde dizayn edilmiştir.

Şekil 3.5.'de tüm deney düzeneği toplu şekilde görülmektedir.

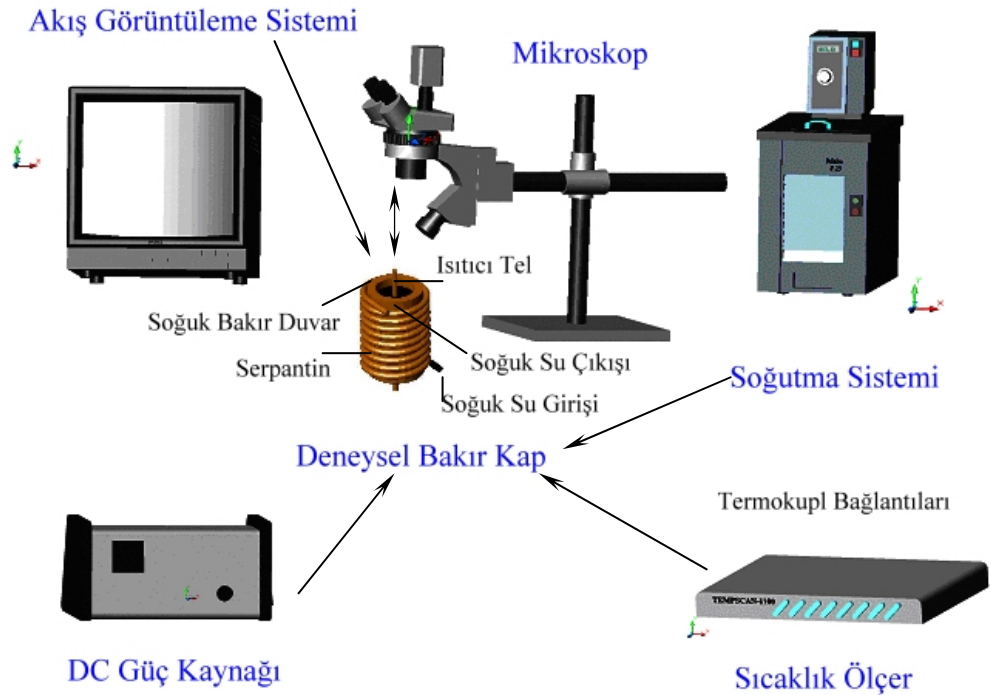


Şekil 3.5. Deney düzeneğinin toplu görünüşü

Deneysel aparatlar dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; deneyde kullanılan akışkan, deney bölgesi, ısıtma sistemi ve soğutma sistemidir. Bu dört ana bileşene ek olarak dört ayrı tanımlama sistemi kullanılarak tüm deney düzeneği tamamlanmıştır.

Bunlar ise, akış görüntüleme sistemi, termokupllar, sıcaklık ölçer cihazı ve akışkanın yüksekliğini hassas olarak ayarlayan deney aparatıdır. Deneyde kullanılan akışkan, silindirik bir kap içerisine yerleştirilerek serbest yüzeyinin merkezinden geçen ısıtıcı bir tel yardımıyla ısıtılmıştır. Bu kabın etrafından geçirilen serpantin duvar sıcaklığını sabit tutacak şekilde ayarlanan su sıcaklığına bağlı olarak soğutulmuştur. Isıtıcı tel ile ısıtılan serbest yüzey merkezi ile duvar arasında sıcaklık farkı meydana gelmesi sağlanmıştır.

Diğer üç tanımlama sistemi verilerin elde edilmesi açısından önem taşımaktadır. Bir video sistemi monitöre bağlanarak akışın görüntülenmesinde kullanılmıştır. Akışın durgun halden osilasyona geçişi öncelikle akış görüntüleme sistemi ile belirlenir. Sıcaklıkların ölçülmesi için bir termokupl ısıtıcı tele, bir termokupl ise silindirik kabın duvarına tespit edilir. Durgun ve osilasyonlu akış, akış görüntüleme sistemi ile ayırt edilerek sıcaklık ölçümleri kaydedilir. Termokupllar, bilgisayar bağlantısı yapılan bir veri algılama sistemine bağlıdır. Şekil 3.6.'da deney setinin şematik gösterimi yer almaktadır. Deneysel aparatlar aşağıda daha detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 3.6. Deney düzeneğinin şematik oluşumu

### 3.2.1. Deneyde Kullanılan Akışkan

Bu çalışmada kullanılacak akışkan belirlenirken birkaç önemli konu göz önünde bulundurulmuştur. Yüzeydeki aktif maddeler akışta önemli değişiklikler meydana gelmesine yol açarlar. Çünkü pratikte temiz yüzeylerin korunması çok zordur. Seçilen akışkanın yüzey gerilimi termokapiler akışın havadan ve deney bölgesinden pisliklerle karşı karşıya kalmasını önlemek amacıyla çevreden gelebilecek kirlenme etkisine karşı hassas olmalıdır.

Gerekli parametrelerin hesaplanabilmesi açısından deneyde kullanılan akışkanın termo fiziksel özellikleri iyi bilinmelidir. Sıcak ve soğuk bölgeler arasında sıcaklık farkının çok yüksek olması durumunda, sıcaklık-viskozite ilişkisi iyi tanımlanmalıdır. Deneyde akışkanın içerisinde bulunduğu kap eğer çok küçük tutulmuş ise düşük evaporasyon oranına ihtiyaç duyulur. Veriler alınırken, iç serbest yüzey şekli evaporasyona bağlı olarak değişmeyecek mertebede düşük tutulmalıdır. Akışın rahatlıkla gözlenebilmesi için akışkan saydam olmalıdır. Bu şartlara ek olarak akışkan zehirsiz, taşıma açısından kolay taşınabilir ve kimyasal açıdan hareketsiz olmalıdır.

Tüm bu sıralanan sebeplerden ötürü deneyde kullanılacak akışkan olarak Silikon yağı tercih edilmiştir. Genel olarak kirlenmeye karşı hassastır, saydam çalışmak açısından uygun ve güvenli bir akışkandır. Bu çalışmada kullanılan akışkan, “Dow Corning Midland” firması tarafından ticari olarak alınan 5 cSt’luk kinematik viskoziteye sahip silikon yağı (polydimethylsiloxane polimers) kullanılmıştır. Kullanılan deney akışkanının Prandtl sayısı ( $Pr=67$ ) dir. Tablo 1.1.’de silikon yağının 25 °C sıcaklıktaki fiziksel özellikleri verilmiştir (Bkz. Çizelge 1.1.).

Çizelge 3.1. Czohralski yöntemi için 5 cSt viskoziteye sahip silikon yağının  
25° C deki fiziksel özellikleri (Lee, 1994)

Sistem Parametreleri	Birimler	Değerler
Yoğunluk ( $\rho$ )	[gr/cm <sup>3</sup> ]	0.913
Dinamik viskozite ( $\mu$ )	[gr/cm s]	0.0488
Kinematik viskozite ( $\nu$ )	[cm <sup>2</sup> /s]	0.05345
Termal kondüksiyon katsayısı (k)	[W/cm K]	0.00116
Termal difüzyon katsayısı ( $\alpha$ )	[cm <sup>2</sup> /s]	7.42x10 <sup>-4</sup>
Yüzey gerilim sıcaklık katsayısı $ \sigma_T , \left  \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right $	[dyn/cm/K]	-0.059
Prandtl sayısı (Pr)	Birimsiz	67
Sıcaklık Genleşme Katsayısı ( $\beta$ )	[cc/cc/°C]	0.00105
Özgül Isı (C <sub>p</sub> )	[cal/g/°C]	0.41
Akışkanın kinematik viskozitesinin sıcaklıkla 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. Sıcaklıkların birimi (°C) dir.		

### 3.2.2. Deney Bölgesi

Deney bölgesi genel olarak saf bakırdan yapılan silindirik bir kaptır. Silindirik kabın tabanı teflon malzeme kullanılarak izole edilmiştir. Deneyimizde kullanılan silindirik kap için öncelikle bakır malzeme temin edilerek, bir torna tezgahında silindirik olarak işlenmiş, daha sonra önceden temin edilen teflon malzeme bu silindirik aksamın içerisine silikon yağının sızmaması için sıkı geçme olarak yerleştirilerek deney bölgesi meydana getirilmiştir. Teflon taban boyutsal oranın değiştirilebilmesini mümkün kılabilmek için dikey doğrultuda hareket etmektedir. Silindirik kabın bakır olarak seçilmesi bakırın yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayıdır. Bu bakır kap, akışkanın yüzey gerilim hareketinin homojen olarak gerçekleşmesinde önemli rol oynamaktadır. Bakır malzemenin seçiminde, bakırın ısı iletkenliğine önem verilirken, teflon malzemenin iyi bir izolasyon malzemesi olarak kullanılması tercih nedenidir. Teflon malzeme ise tabandan ısı kaybı olmaması düşüncesiyle yani  $\frac{dq}{dt} = 0$  değişiminin sıfıra eşit olması istendiği için seçilmiştir. Teflon malzemenin ortalama kalınlığı 10mm civarındadır.

Silindirik kabın duvarı mümkün olduğunca ince ancak sabit sıcaklık şartını sağlayacak kadar kalın olmalıdır. Sabit duvar sıcaklığı silindirik kabın çevresine sarılan ve yine saf bakırdan yapılan bir serpantinden geçen soğutucu su ile sağlanmaktadır. Soğutma sistemi, akışkanın duvarla olan ısı transferini ve duvar sıcaklığının artmasını engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Silindirik kabın çapı ve yüksekliği dinamik Bond sayısını küçültmek amacıyla mümkün olduğunca minimize edilmiştir.

Bu deneyde 1 adet deney bölgesi kullanılmıştır. Bu deney bölgesinin iç çapı 31 mm'dir. Silindirik kabın iç çeperleri zımparalanarak, akışın etkilenmemesi için temiz bir yüzey elde edilmiştir. Derinlik, boyutsal orana bağlı olarak teflonun hareket ettirilerek 1 olarak ayarlanmıştır.

Silindirik bakır duvarların her birinin tam merkezinden akışkan yüzeyine derinliği 0.5 mm kalacak şekilde termokupllar yerleştirilmek için 1 mm çapında kanallar açılmıştır. Duvarlar üzerindeki çentikler ise ısıtma yüzeyinin azaltılması için yapılmıştır.

### **3.2.3. Isıtma Sistemi**

Deneyde kullanılan akışkanın serbest yüzeyi silindirik kabın merkezinden geçirilen ısıtıcı bir telle sağlanmaktadır. 4 mm çapında bakır bir çubuk içerisinde 0.5 mm çapında krom-nikel bir rezistans geçirilmiş ve rezistansın uçları "Phillip Harris" firması tarafından üretilen AC-DC akımı veren 0-25 volt arasında çalışan güç kaynağına bağlanmıştır. Bu bakır boru alt ve üst uçlarından bir güç kaynağına bağlanarak ,güç kaynağı öncelikle her iki Ar oranı için adım adım en yüksek Volt değerine getirilerek telin 102 °C; 120 °C ve 135 °C sıcaklıklara gelmesi sağlanmıştır. Akışkan ile temas halinde bulunan ısıtılmış bakır iyi bir iletken olduğu için akışkanın temas yüzeyini homojen bir şekilde ısıtmaktadır.

### 3.2.4. Soğutma Sistemi

Soğutulan duvar sıcaklığının sabit tutulabilmesi amacıyla bir soğutma sisteminin kullanılması zorunludur. Soğutma sistemi olarak hazırlanan silindirik kabın etrafına bakır bir serpantin sarılarak, serpantin uçlarına boru bağlantısı yapılmıştır. Borular ise su ile soğutma yapan ve sabit bir sıcaklıkta tutulabilen bir soğutma cihazı ile bağlantılıdır. Soğutucu bakır duvarın soğutulması, 0-300 °C aralığında soğutma ve ısıtma yapabilen, “Heto HMT 200” model 0.1 °C hassasiyetli su sirkülasyon cihazı ile sağlanmıştır. Sirküle edilen su serpantin içerisinden geçerek dış duvar sıcaklığını sabit tutmaktadır. Bu cihazın yerleştirilmesi konusunda önemli bir noktaya dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu cihaz çalışması sırasında titreşim yapacaktır. Bu nedenle deney düzeneğinin kurulu olduğu platformdan ayrı bir yere yerleştirilmiştir. Bu şekilde deneyin titreşimin zararlı etkilerinden korunması sağlanmıştır.

Biz deneylerimiz için bu soğutma cihazını 10 °C sıcaklık değerine ayarlayarak serpantin içerisine bu sabit sıcaklıklarda su geçmesini sağladık.

### 3.2.5. Akış Görüntüleme Sistemi

Osilasyonun başlaması ve akış çizgilerinin belirlenmesinde bir akış görüntüleme sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Akışkan saydam olduğu sürece, akışkan partikülünün hareketinin izlenebilmesi için akışkana 3 mikron çapında  $Al_2O_3$  partikülleri eser miktarda ilave edilmiştir. Silindirik konumdaki akışkanın deney anında homojen bir yapıya sahip olmasından dolayı, üç boyutlu akışkan hareketi, simetriden dolayı akışkanın her bölgesinde ve her açısında sabit kalmaktadır. Silindirik saydam akışkana, akışkanın merkezinden dikey geçecek şekilde ve dalga boyu 630-670  $\mu m$  olan kırmızı lazer ışığı uygulanmıştır. Ve silindirik kabın iç çeperleri mat siyah spreyci boya ile boyanmıştır. Lazer perdesi üzerindeki akış hareketinin rahatlıkla gözlenebilmesi için, perdeye dik olacak şekilde “Western Electric” firması tarafından üretilen ve büyütme oranı 26 olan mikroskop yerleştirilmiştir.

Bu mikroskop ile lazer perdesi üzerindeki 3 mikron çapındaki  $Al_2O_3$  partiküllerinin izleri takip edilerek akışkanın akış hareketinin kararlı Marangoni konveksiyon hareketinden birden bire periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyon hareketine geçtiği noktaların dikkatle izlenmesi sağlanır. Ayrıca mikroskop üzerine “Edmund optics” firmasından alınan “Panasonic GP-KR222” marka bir CCD-Video Kamera bağlanarak alınan görüntüler bilgisayar ortamında kayıt edilebilirken aynı zamanda izleme kolaylığı sağlayan bir “Sony Trinitron” ekrandan akış görüntülenmiştir.

### **3.2.6. Sıcaklık Ölçümü**

Sıcaklık ölçümü iki farklı cihaz yardımıyla tayin edilmektedir. Termokupllar ve sıcaklık ölçer cihaz sıcaklık ölçümünün önemli iki aparatıdır. Termokupllar sıcaklık ölçer cihaza bağlıdır ve sıcaklık ölçümünün temelini oluşturmaktadır. Akış görüntüleme sistemi ile sıcaklık ölçer cihaz bir arada osilasyonların başlama şartlarını belirlememize yarar.

#### **3.2.6.1. Termokupllar**

Isıtılan bakır telin ve soğutulan kabın dış çeperlerinin sıcaklıklarının ölçülmesi amacıyla bu silindirik duvarların merkezinde açılmış bulunan kanallara 0.25 mm çapında 0.015 °C hassasiyete sahip Copper-Constantan T tipi izoleli sıcaklık algılayıcı teller yani termokupllar yerleştirilmiştir. Bu sistemde üçüncü bir termokupl da daha önceden bizim tarafımızdan hazırlanan 3D mikrometreli kızıağın ucuna diğer iki termokupl da olduğu şekilde bağlanmıştır. Kanallara yerleştirilen termokuplların çevresindeki boşluklar “Omega” firması tarafından üretilen yüksek ısı iletim katsayısına sahip bir yapıştırıcı ile doldurulmuştur. Soğutucu duvar ile ısıtıcı tel arasındaki sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerleri arasındaki hassasiyeti, akışkanın yüzey gerilim hareketinin başlayıp periyodik osilasyonlu hale geçinceye kadarki hassasiyeti belirler. T tipi termokupl seçmemizin ana sebebi de budur. Termokupllar yüzeydeki akıştan etkilenmeyecek derecede rijit bağlanmalıdırlar.



### 3.2.6.2. Sıcaklık Ölçme Cihazı

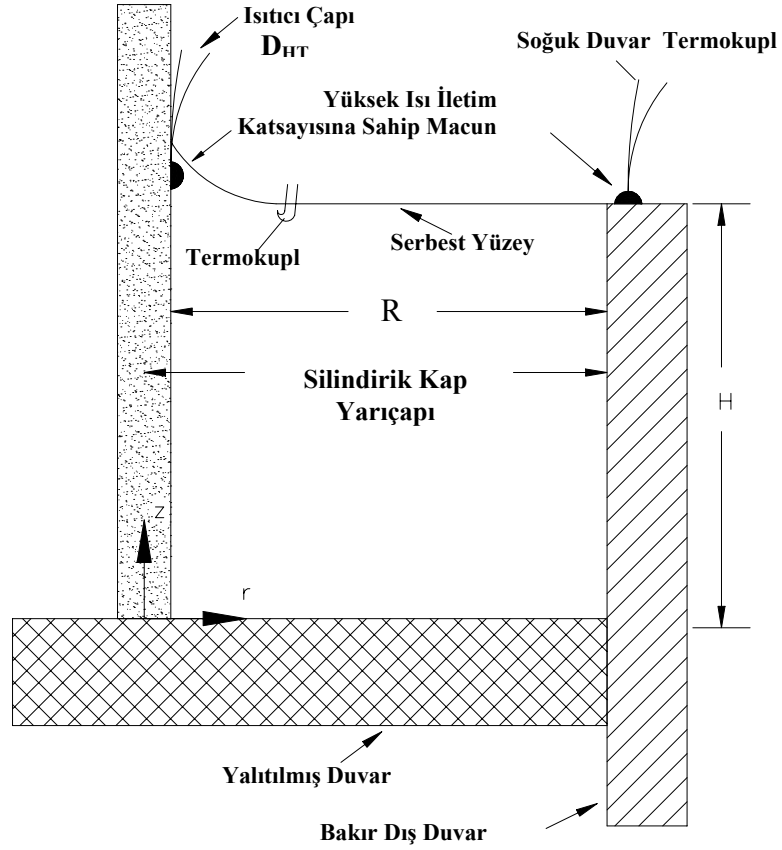
Bu deneyde önem kazanan diğer bir cihaz “Omega” firması tarafından üretilen ve 0.1 °C hassasiyette olan “Tempscan/1100” adı verilen üzerine termokupllar takılan sıcaklık verilerini almamıza yarayan sıcaklık ölçme cihazdır. Bu cihaz çok kanallı olup, kanallar arasındaki sıcaklık farkını veren özelliğinden dolayı, deney anında gerekli olan ve ihtiyaç duyulan ısıtıcı ve soğutucu duvarlar arasındaki sıcaklık farkının anlık hassasiyetini verir. Bu cihazın bir tarafı algılayıcı sistem olarak kullanılarak, diğer tarafındaki teller bir bilgisayara bağlanarak dataların bilgisayar ortamına kaydı sağlanmıştır. Algılayıcı sistem olarak yapılan bağlantı için üç ayrı termokupl kullanılmıştır. Bunlardan birincisi ısıtıcı bakır telle, ikincisi silindirik kabın çeperine, üçüncüsü ise su ile çepere kadar doldurulan suyun yüzeyine yerleştirilmiştir ve yüzeyin sıcaklık dataları bilgisayara aktarılarak tablolar oluşturulmuş, sonuca gidilmiştir.

Bilgisayara aktarılan sıcaklık verileri Windows tabanlı bir software aracılığı ile kaydedilmiştir. “ChartView” isimli bu program birçok veri algılama ve kaydetme uygulaması için uygundur. Aşağıda verilen şekilde de görüleceği üzere sıcaklık dijital olarak algılanmakta, istenen zaman aralıklarında kaydedilmekte ve ani sıcaklık değişimleri ile osilasyon başlama süreci rahatlıkla algılanabilmektedir.

### 3.2.7. 3-D Mikrometreli Kızak

Bu deneydeki kullanılan önemli bir sistem de, bir freze tezgahında iki alüminyum parça kırlangıç kuyruğu açılarak oluşturulan, x ve y koordinatlarında hareket edebilen ölçme sistemidir. x ve y koordinatlarındaki kayma hareketlerinin hassas olması için her koordinat doğrultusunda mikrometreler yerleştirilmiştir. 3D mikrometreli kızak 0,01 mm hassasiyettedir. Üçüncü sıcaklık algılayıcı tel bu sisteme bağlanmıştır. Ve deneysel akışkanımızın yüzeyi boyunca sıcaklık algılayıcı telin istenen ölçülerde hassas olarak hareketi sağlanmıştır. Yüzey üzerindeki sıcaklığın sabit ölçülebilmesi için yüzeyden 0,1 mm derinlikte ölçüm yapılmıştır.

Deneysel bölgenin, termokuplların, ısıtıcı ve soğutucu sistemin bir araya getirildiği şematik gösterim şekil 3.7.'de görülmektedir.



Şekil 3.7. Şematik test alanı

Deney steril ve nispeten sabit sıcaklığa sahip bir ortamda gerçekleştirilmiş, kirlenme etkisini azaltmaya özen gösterilmiştir. Deney bölgesi üzerine çok az da olsa bir titreşim etkisi mevcuttur. Titreşim etkisini meydana getirebilecek tüm cihazlar deney bölgesinin bulunduğu platformdan farklı bir platforma yerleştirilmelidir. Deneysel çalışma aşağıdaki prosedüre uyularak yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar titreşimsiz ve homojen sıcaklığa sahip bir deney odasında gerçekleştirilmiş olup deney odası sıcaklığı +23 °C dır.

### 3.2.8. Deneyde İzlenen Yol

Deneysel düzeneğin her türlü çevresel etkiden izole edilmesi gerektiği göz önünde bulundurularak, silindirik bakır kap, ısıtma sistemi, soğutma sistemi, deney bölgesi ve termokupllardan oluşan ana düzenek düz bir platform üzerine yerleştirilir. Bu deneyde platformun hassas derecede düz olması çok önemli bir konudur.

Deneysel çalışmalarda önemli olan parametrelerden biri de akışkanın boyutsal oranı olduğu daha önce ifade edilmişti. Boyutsal oran, akışkan yüksekliğinin akışkan çapına oranı olup, akışkanın akış karakterinin değişim noktasını etkilemektedir. Deneysel çalışmalar sırasında, değişik boyutsal oranlar için akışkanın çapının sabit tutulması yüksekliğinin değişimi ile önem kazanmaktadır. Deneysel çalışmalar esnasında, akışkan yüksekliğinin hassas olarak ölçülmesi bu çalışmanın hassasiyetini belirlemektedir. Deney akışkanının yüksekliğini tabandaki teflon malzeme vermektedir. Bu aparatın dikey yüksekliği belirlenirken, 0.01 mm hassasiyete sahip komparatör ile kalibrasyon yapılmıştır. Deney bölgesindeki akışkan yüksekliği akışkanın boyutsal oranına bağlı kalınarak ( $Ar= H/R= 1$  için) 1.5 mm ye göre komparatör ile ayarlanır.

Boyutsal oran ayarlandıktan sonra, bir diğer önemli konu akışkan kirliliği açısından ısıtıcı ve soğutucu duvar yüzeylerinin temizlenip deneye hazır hale getirilmesidir. Bu aşama çok büyük titizlik ve dikkat gerektirir. Silindirik bakır kabın iç cidarları etilalkole batırılan bir pamuklu çubuk yardımıyla daha önceden tespit edilen termokupllara zarar vermeden özenle temizlenir. Silindirik kap içerisinde alkol kalıntılarının kalmamasına dikkat edilmelidir. Bu amaçla küçük bir hava pompası yardımıyla deney bölgesine hava basılarak kuruma hızlandırılır. Silindirik bakır duvarlar üzerindeki etilalkol kuruduktan sonra bir hava kompresörü ile tekrar temizlenir. Silikon yağının kap içerisine doldurulduktan sonra taşma yapmasını önlemek amacıyla silindirik kabın sadece üst yüzeyinde kalan cidar bölgesine pamuklu kür ile akışkan bariyeri ( “Scotch Guard” Akışkan Engelleyici) adı verilen özel bir madde uygulanır.

Bu uygulamada dikkat edilecek konu akışkan bariyerinin sadece tespit edilen bölgeye uygulanarak, silindirik kabın iç cidarlarına akmasını veya bulaşmasını önlemektir. Bu konuya dikkat edilmemesi düz bir serbest yüzeyin oluşmamasına ve deneysel konfigürasyonun değişmesine neden olacaktır.

Deney bölgesine deneyde kullanılan akışkan yani silikon yağı enjekte edilmeden önce akışkan bariyerinin tam olarak kurummasını sağlamak için bir süre beklenir. Sürülen malzeme kuruduktan sonra deney bölgesi hava kompresörü ile bir defa daha temizlenir. Artık deney bölgemiz, deney akışkanı doldurulmaya hazır hale getirilmiştir.

Akışkan, camdan yapılmış steril bir enjektör ile yukarıda bahsedilen silindirik bakır kap içerisine doldurulur. Video sisteminin de yardımıyla akışkan serbest yüzeyi düz olana dek silindirik bakır kap içerisine silikon yağının doldurma işlemi sürecektir. Bu işlem esnasında silindirik kabın üst cidar yüzeyine silikon yağı teması olmaması için özen gösterilmelidir. Akışkanın akış hareketinin rahat bir şekilde izlenebilmesi için, eser miktarda  $Al_2O_3$  partikülleri iğne ucu ile akışkana ilave edilir. Mikroskop silindirik kabın tam üzerine konumlandırılarak video sistemi, sony trinitron ekran ve bilgisayar açılır. Akış ekrandan izlenebilir veya mikroskoptan gözlenebilir. Bilgisayar ortamına aktarılan bu görüntü aynı zamanda kaydedilebilir. Akışkanın merkezinden geçecek şekilde lazer perdesi oluşturulur ve daha sonra mikroskop akışkan perdesine odaklanır.

Silindirik kabın merkezinden geçirilen ısıtıcı telin başlangıç ve bitiş noktalarına güç kaynağının artı ve eksi uçları bağlanarak güç kaynağı çalıştırılır. Güç kaynağı kullanılarak akışkan ile temas halindeki sıcak duvarın sıcaklığı ( $T_H$ ) kademeli olarak artırılır. Güç kaynağının voltajı adım adım yükseltilmelidir. Aksi halde cihaz kendi kendini kapatacaktır. Ayrıca güç adım adım artırılırken her adımda akışkan rejime girmiş olmalıdır. Bu adımlar arasındaki geçiş süresi,  $t = \frac{L}{\alpha}$ , ifadesi ile tanımlanabilir.

Burada,  $L$ , cm cinsinden uzunluk,  $\alpha$ ,  $cm^2/sn$  cinsinden termal difüzyon katsayısıdır. İstenilen voltaj ayarına gelindiğinde ısıtma sistemi çalışmaya başlamıştır.

Deney aparatları kendi hassasiyetleri ölçüsünde güç kaynağı, (soğutucu duvarın sıcaklığını sabit tutan) soğutucu su sirkülasyon cihazı, lazer, sıcaklık ölçer cihazı teker teker açılır. Bunlardan sabit sıcaklıktaki soğutucu sirkülasyon cihazı istenilen  $T_C=+10$  °C sıcaklığa ayarlanır ve  $T_C$  sıcaklığının kararlı duruma geçmesi için beklenir.

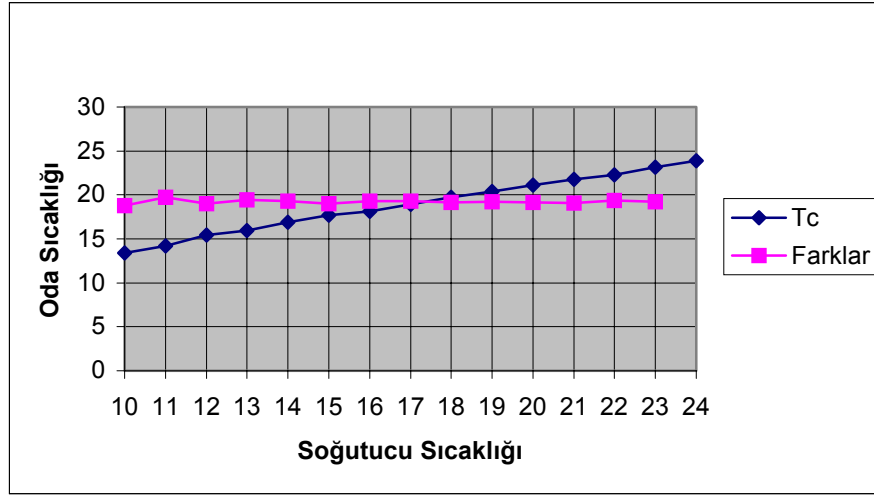
Periyodik osilasyonun başladığı kritik sıcaklık farkı ise sıcaklık ölçer cihazından ölçülür. Deneyler aynı şartlarda üçer defa tekrarlanarak ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak, deneydeki akışkanın periyodik osilasyona başlama noktaları elde edilmiştir. Akışkan hareketinde, kritik sıcaklık farkının altındaki değerlerde kararlı konveksiyon, üstündeki değerlerde ise periyodik osilasyonlu konveksiyon gözlenmiştir. Hazırlanan deney aparatları sayesinde, değişik şartlarda kararlı haldeki yüzey gerilim hareketleri ile başlayan akışkanın akış hareketlerinin, periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketlerine başladığı nokta üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyimiz için öncelikle deney düzeneğimiz ve kullanılacak tüm aparatlar hazırlanarak laboratuvar ortamına yerleştirildi. Silindirik kap ısıtıcı sistem ile ısıtılırken aynı anda soğutma sistemi ile soğutulup akışkanın yüzeyindeki sıcaklık alanını oluşturacak veriler kaydedildi. Akışkan yüzeyinin sıcaklık alanını oluşturabilmek için, üçüncü sıcaklık algılayıcı tel, ısıtıcı telin hemen yanına gelecek şekilde 3D mikrometreli kızağa yerleştirildi ve ölçme sistemimiz kalibre edildi. Serbest yüzey boyunca bir termal sınır tabakası varolduğu sürece ve ısıtıcı tel tam merkezden geçtiği için silindirik kabın tam merkezindeki sıcaklığı ölçmek imkansızdır. Merkezdeki sıcaklık sadece nümerik bir çözümle elde edilebilir. Silindirik kabın simetrik olduğu düşünülerek alınacak datalar ısıtıcı tel ile silindirik kabın çeperi arasındaki mesafe boyunca ölçülmüştür. Bu mesafe hesap edilerek yüze bölünmüş ve 3D mikrometreli kızak ile hassas olarak 100 adımlık bir süreçte akışkanın yüzeyinde, bu mesafe boyunca datalar toplanmıştır. Bu datalar yine bilgisayar ortamında birleştirilerek akışkan serbest yüzeyindeki sıcaklık gradyanlerinin maksimum değişimi grafiksel olarak tanımlanmış, sonuçlar irdelenmiştir. Tablolar ve araştırma bulguları kısmında görülmektedir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Deney aşamasının ilk adımı temel bir kalibrasyon yapmaktır. Yüzde yüz hatasız bir deney elbette imkansızdır. Ne kadar hassas çalışılırsa çalışılsın, örneğin termokupllarda, imalattan, sıcaklık ölçer cihazdan yada deneyi yapan kişinin hatasından kaynaklanan bir takım yanlış ölçümler mevcut olabilir. Kullanılan tüm cihaz ve malzemeler üzerinde üretici firmalar tarafından, ürünlerinin hassasiyeti belirtilmiştir. Bu çalışmada da tüm gerekli kalibrasyonlar gerçekleştirilmiştir. Amaç, deneysel hataları en aza indirmektir. Termokupl olarak isimlendirilen sıcaklık ölçer tellerin buzla kalibrasyonu yapılarak doğruluğu kanıtlanmıştır. Önem taşıyan kalibrasyonlardan bir tanesi de boyutsal oranın hassas olarak ölçülerek ayarlanmasıdır. Kullanılan kaplarda bu işlem hassas ölçüm yapılarak sağlanmıştır.

Deneyin yapıldığı ortam da deneyi etkileyen önemli bir faktördür. Konumsal olarak deneyin yapıldığı şehrin rakımı bile diğer çalışmalarla çalışmamızı kıyaslarken göz önünde bulundurulması gereken bir etkidir. Bulunulan konumdaki atmosferik basınç yüzey şeklini etkileyecektir. Dolayısıyla direkt olarak statik Bond sayısı değişecek düşen basınçla beraber yer çekimi ivmesinin etkisi buna bağlı olarak azalacaktır. Havadaki nem artışı ile hava sıcaklığı düşecek ve deneysel bölge ile nemli hava arasında ısı transferi oluşacaktır. Ortamdaki nem veya hafif hava sirkülasyonu bile  $\Delta T_{kr}$  değerini etkileyecektir. Yapılan karşılaştırmalarda bu etkenler göz önünde bulundurulacaktır.

Bizim için önem taşıyan en önemli konu soğutma sisteminde kullanılan su sirkülasyon cihazının kalibrasyonudur. Rejim hali akıştan osilasyonlu akışa geçişi dolayısıyla da kritik sıcaklık farkını geciktirme çarelerinin başında diğer çalışmaların aksine soğutma sistemi sıcaklığını oda sıcaklığının altına çekmek gelmektedir. Cihazımızın kapasitesi de göz önünde bulundurularak soğutucu sıcaklığı, 10°C ile oda sıcaklığı olan 23 °C arasında değiştirilerek kalibrasyon yapılmıştır. Şekil 4.1.'de soğutucu için yapılan bu kalibrasyon deneyinden elde edilen veriler sunulmuştur. Şekilde oda sıcaklığı ile soğutucu sıcaklığının değişimi termokupllar yardımıyla ölçülerek farklar veri olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.1. Soğutucu kalibrasyon deneyi sonuçları

Farkların oluşturduğu üçgensel alan taşınım momentini vermiştir. Görüleceği üzere üçgensel alanlar yani taşınım momentleri birbirine eşittir. Bu eşitlik başarılı bir kalibrasyon yapıldığının ispatıdır.

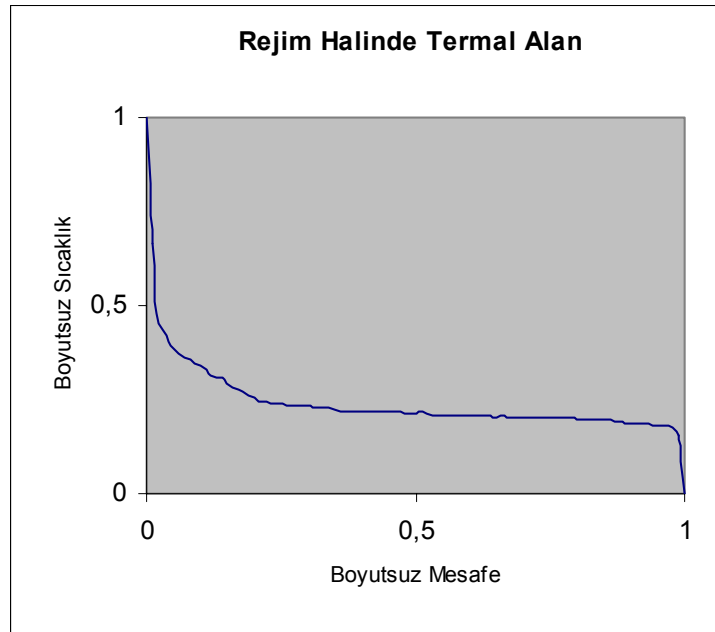
Isıtıcı telin ve deneyin yapıldığı silindirik kap çeperleri boyunca üniform olma hata payı 3 % ve osilasyonların başlamasındaki hata payının ortalama 1.4 % olduğu tahmin edildi.

Deneysel prosedüre uygun olarak güç adım adım artırılarak ve her adımda akışın rejim haline girmesi beklenerek osilasyona girme süreci sıcaklık ve süre olarak tayin edilmiştir. Osilasyon görsel olarak ekranda gözlemlendiğinde sıcaklık verisi kaydedilmiştir. Güç kaynağının voltajı bir adım daha artırıldıktan sonra osilasyondan rejim haline tekrar geri dönüş gözlemlenene kadar voltaj yine adım adım düşürülerek veri alınmıştır. Akışın osilasyona girmesinden sonra voltajın tekrar artırılması ile birlikte osilasyonun şekli ve çeşidi incelenmiştir.

Deney aşamasında,  $Ar$  ve  $H_r$  sırasıyla 1.0 ve 0.1 olarak ayarlanmıştır. Akışkanın  $Pr=67$  alınarak Marangoni sayısı ise  $Ma = \frac{\sigma_T \Delta T R}{\mu \alpha}$  denklemi yardımıyla  $Ma=1.6 \times 10^5$  olarak hesaplanmıştır.

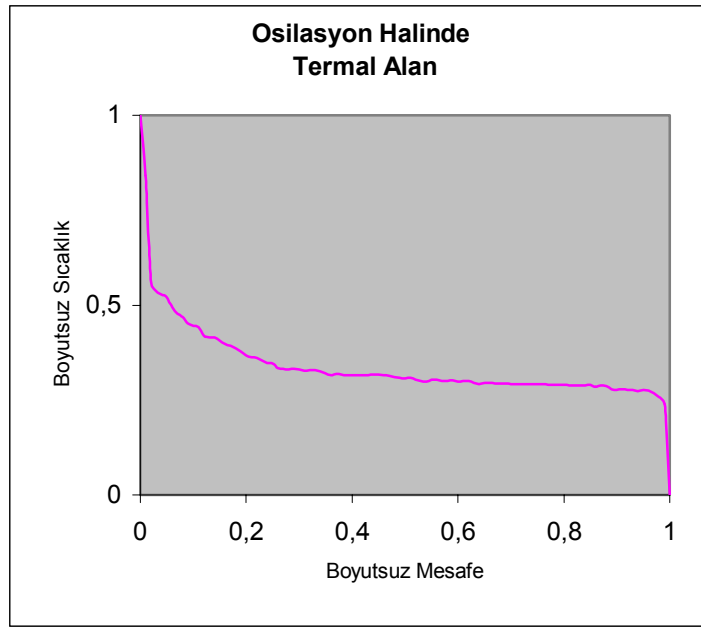
Akışkanın viskozitesi,  $Ma$  ve  $Pr$  için önem taşımaktadır. Kullanılan silikon yağının fiziksel özellikleri daha önce Çizelge 3.1’de belirtilmişti (Bkz. Çizelge3). Deneyimizde  $Ma$  ve  $Pr$  gibi boyutsuz parametrelerin hesaplanmasında bu çizelge kullanılmıştır. Genel olarak serbest yüzey düz olarak kabul edilmiştir. Ancak deney aşamasında yüzeyde derin ve sığ konkav yüzeyler de oluşmuştur. Isıtıcı yüzeyindeki temas açısı gözleme dayanarak  $5^\circ$  olarak belirlenmiştir.

Rejim halindeki sıcaklık alanı (Şekil 4.2.) ile osilasyon halindeki sıcaklık alanları (Şekil 4.3.) ile bu iki grafiğin karşılaştırmalı örneği  $R=31$  mm’lik silindirik kap için aşağıda (Şekil 4.4.) ifade edilmiştir.

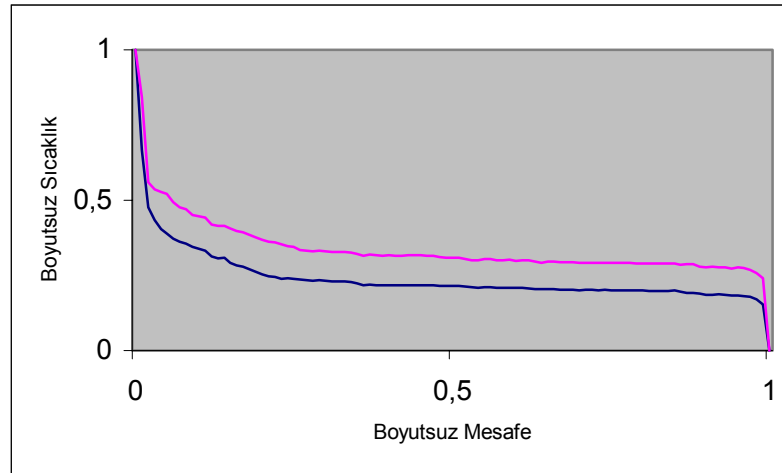


Şekil 4.2. Sıcaklık alanının rejim halinde elde edilen grafiği  
( $T_C=10^\circ\text{C}$ ,  $T_H=102^\circ\text{C}$ ,  $Ar=1,0$ ,  $R=31$  mm)





Şekil 4.3. Sıcaklık alanının osilasyon halinde elde edilen grafiği  
( $T_C=10\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_H=135.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Ar=1,0$ ,  $R=31\text{ mm}$ )



Şekil 4.4. Osilasyonlu ve rejim halindeki termal alanların karşılaştırılması  
( $R=31\text{ mm}$ ,  $Ar=0,1$ )

Grafiklerde boyutsuz sıcaklık değeri;  $\frac{T - T_C}{T_H - T_C}$ , boyutsuz uzunluk değeri;  $\frac{x}{R}$ , olarak

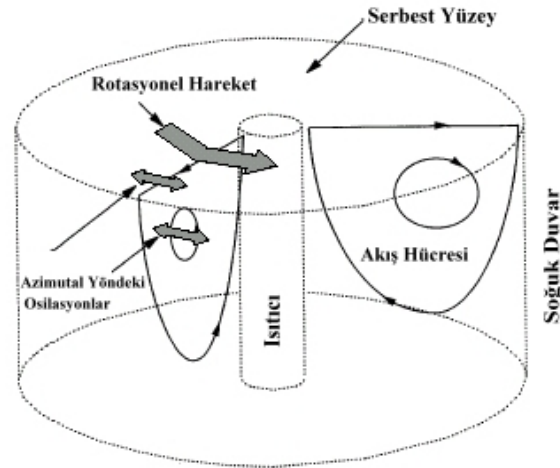
alınmıştır. Bu tanımlamalar içerisinde T, yarıçap boyunca farklı noktalarda ölçtüğümüz sıcaklık değerlerini,  $T_C$ , silindirin cidar sıcaklığını,  $T_H$ , silindir merkezindeki ısıtıcı yüzey sıcaklığını, x, yarıçap boyunca veri aldığımız noktaların uzunluklarını ve R, yarıçap uzunluğu ile ısıtıcı tel yarıçapının farkını ifade etmektedir.

Şekil 4.4.'deki karşılaştırmada da görüleceği gibi, rejim halinde olan akışkanın termal alanı sıcaklık artıp osilasyon başladığında oluşan termal alan ile kıyaslandığında, transport fenomenleri doğrultusunda aradaki farkın kinetik enerjiye yani momentuma dönüştüğü görülür.

Termokapiler kuvvet genel olarak iki köşe bölgesine yakın olarak gelişse de bu kuvvet  $Ma$  sayısını da artmasına bağlı olarak sıcak bölgede etkisini göstermiştir. Serbest yüzeyde mevcut bulunan ince sınır tabaka nedeni ile ısıtıcıya yakın bir bölgede, yüzey sıcaklığı yüksek radyal sıcaklık gradyanlarının oluşmasına neden olur. Bunun sonucu olarak da bu bölgede yüzey hızı oldukça yüksektir. Yine bunun bir sonucu olarak akış alanı ikiye bölünmüştür. Radyal sıcaklık gradyanının ve hızın yüksek olduğu ısıtıcı-akışkan temas noktasında bulunan bölge sıcak bölge (köşe) olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgenin dışında kalan kısım ise hacimsel bölge olarak anılır. Yüzey gerilimi, oldukça yüksek değerlere ulaştığında serbest yüzeyin, sıcak bölgeyi de içine alan belirli bir kısmında viskoz sınır tabakası oluşmuştur.

Daha sonrasında ince bir sınır tabakaya sınırlandırılan kütle akısı, hacimsel bölgeye kıyasla oldukça düşük olacak ve sıcak bölgedeki termokapiler kuvvet tüm akış için süreklilik ve önem kazanmıştır. Osilasyonlar, hacimsel bölgedeki termokapiler akışın tüm akışı etkilediği bölgelerde parametrik oranlarda ortaya çıkmıştır.  $Ar$  ve  $Hr$ 'nin sabit olarak alınarak basitlik açısından tek bir uzunluk ölçüsü (R) kullanılmıştır.



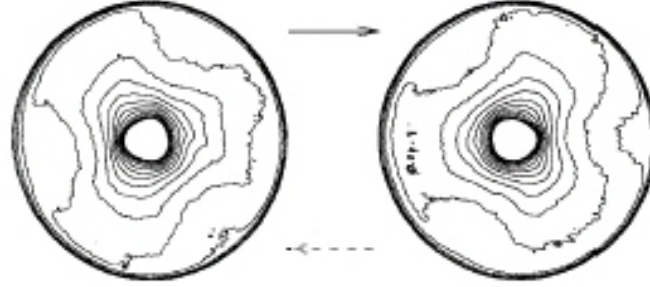


Şekil 4.6. Osilasyonlu akış alanı

Osilasyonlar esnasında akış çizgilerinin, belirli bir zaman aralığında, azimutal doğrultuda, sınır boyunca periyodik olarak değiştiği önceki çalışmalardan bilinmektedir (Preisser vd., 1983). Osilasyonlu akışta, akışkan partikülleri akışkan hücresi içerisindeki döngülerinde akışkan azimutal doğrultuda ileri geri hareket etmiştir. Azimutal yöndeki osilasyonlu hareketin yanı sıra akış alanının genelinde de çok yavaş bir rotasyonel hareket söz konusudur. Bu rotasyonel hareketin zaman periyodu azimutal doğrultudaki osilasyonlu akışın zaman periyodundan çok daha büyüktür. Biz de deneyimizde Kamotani'nin (Kamotani vd., 1992, 1996) çalışmalarında üzerinde durduğu akış yapısına benzer akış yapısına rastladık (Şekil 4.7.).

Bir osilasyon döngüsünün başında, aktif bölgelerden azimutal yönde eşit açılı üç yönde radyal olarak dışa doğru bir sıcaklık dağılımı gözlemlendi. Bunu takiben aktif bölgeden tekraren azimutal yönde eşit açılı üç yönde radyal olarak dışa doğru bir sıcaklık dağılımı gözlemlendi ancak bu kez azimutal önceden sıcaklık dağılımı olan üç bölgenin tam ortasından gerçekleşti. Sıcak bölge ile soğuk bölge arasında oluşan azimutal yönlü, azimutal sıcaklık gradyeni sebebiyle sanki ikinci bir termokapiler etki ile serbest yüzey yukarı-aşağı hareket eder. Osilasyonların bu aşağı-yukarı ileri geri hareketi bu azimutal osilasyonlu akışın bir sonucudur.

Çapı 3.0 cm'yi geçen silindirik kaplarda yapılan deneylerde daha yüksek sıcaklık farkı olması durumunda gözlemlenen osilasyon izleri Şekil 4.7.'de verilmiştir. Bu şekil kızıl ötesi sıcaklık ölçer cihazla alınmış bir veridir ve bizim osilasyon izlerimizi ifade eder. (Kamotani vd., 2000)



Şekil 4.7. Üç boyutlu osilasyon yapısı (Kamotani vd., 1992, 1996)

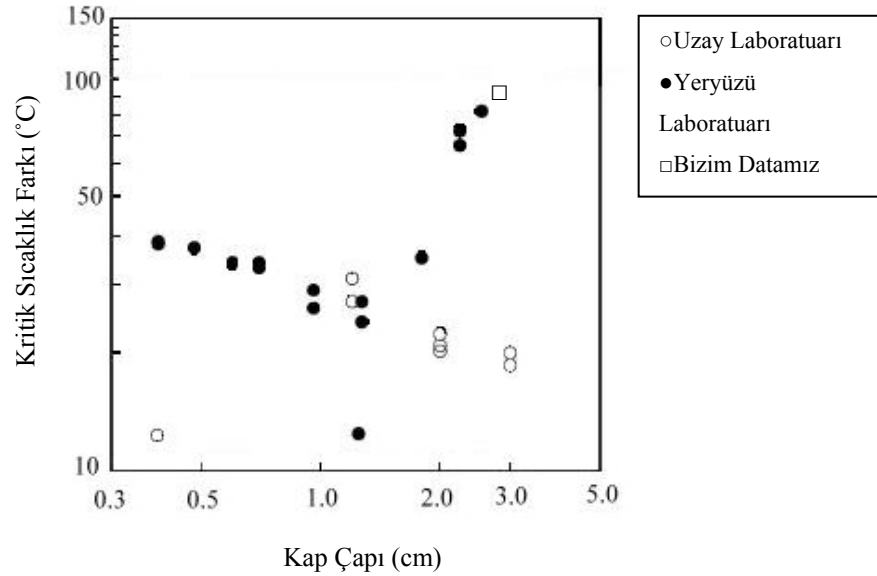
Daha önce osilasyonların başlaması sürecinde etken olan diğer bir parametrenin de yüzey deformasyon parametresi olduğu belirtilmişti. Osilasyonların ilk adımı serbest yüzeydeki sıcak bölgedeki termal sınır tabakasında gözlemlendi. Bu bölge çok küçük bir alan olmasına rağmen osilasyon için büyük önem taşımaktadır. Çünkü sıcak akışkan ilk hareketini bu bölgede gerçekleştirir. Bu sınır tabakasını herhangi bir sebep ile değişmesi tüm akış alanını etkileyecektir. Aynı şekilde sıcak bölgedeki yüzey sıcaklığının değişmesi, sıcak bölgeye doğru bir basınç gradyeni oluşup serbest yüzey deforme oluncaya dek geri akışın gecikmesine neden olur.

Bir geçiş periyodu sırasında sıcak bölgedeki yüzey hızının arttığını düşünelim. Sıcak bölgeye doğru hareket eden hacimsel akış bu değişikliğe uyum gösterene dek yüzey akışı akışkanı yüzey boyunca taşıyarak aşağıya yani hacimsel bölgeye dek itecektir. Bu hareketten ötürü soğuk akışkan bu bölgede toplanacaktır. Bunun sonucu olarak, sıcak bölgedeki radyal sıcaklık gradyeni yükselecek ve buna bağlı olarak yüzey hızı da artacaktır. Bu örnek yukarıdaki ifadeyi açıklayıcı niteliktedir. Sıcak bölgedeki serbest yüzeyin durgunluğu kapiler basıncı düşürüp, akış hareketinin bu bölgeye yoğunlaşmasını ve yüzeyin çekilmesini durdurur. Akış yapısı zamanla değişip yüzey deformasyonu durduğunda yüzey aktif periyoda girer.

Bu süreci, sıcaklık alanından ötürü termokapiler kuvvetin daimi bir değişiklik göstermesi ile osilasyon mekanizmasının devam kazanması takip eder. Serbest yüzey deformasyonu sadece osilasyonlu akışlarda bu kadar önem kazanmaktadır bu sebeple rejim halindeki akışlarda ihmal edilebilir bir etkidir.

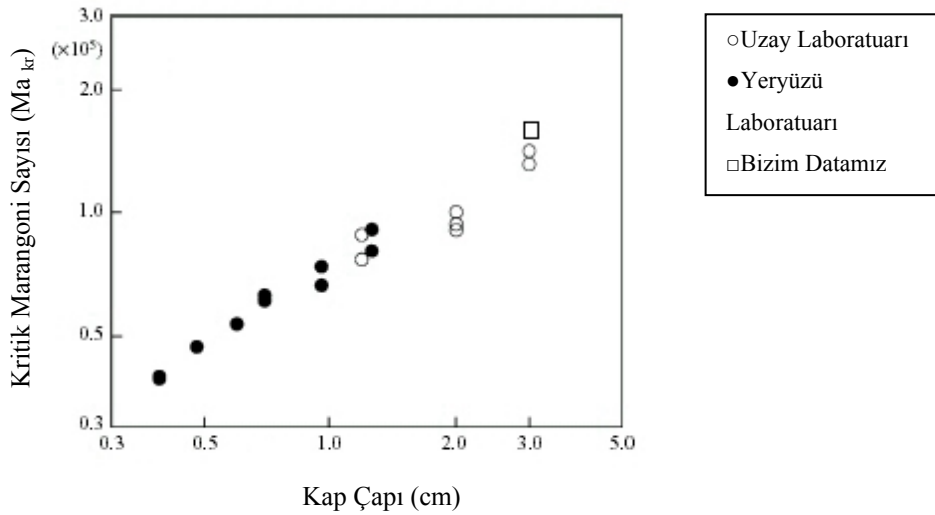
Bu sebeple, hız alanı tayin edilirken osilasyonların başlamasına yakın bir sıcaklık kullanılmış böylece hız profilinin hesaplanmasında kolaylık sağlanmıştır.

Farklı kaplar için ( $\Delta T_{kr}$ ) değerleri Şekil 4.8.'de verilmiştir. Bu değerler Kamotani'nin (Kamotani vd., 1996, 2000) uzay ve yerçekimli laboratuvarlarda yaptığı deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Osilasyona girme süresi Kamotani'nin (Kamotani vd.,2000) yaptığı çalışmaya benzer olarak elde edilmiştir. Ancak bizim çalışmamız yeryüzü laboratuvarında, akışın osilasyona geçişini geciktirmek amacıyla gerçekleştirildiğinden soğutucu sıcaklığı oda sıcaklığının altına çekilerek, osilasyona geçiş sıcaklığı 128 °C ve soğutma sistemi 10 °C'ye ayarlandığından dolayı kritik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{kr}$ ) 118 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.8.'de verilen kritik sıcaklık farkları belirlenirken, bizim yaptığımız yerçekimli ortam deneylerinde soğuk duvar sıcaklığı 10 °C'de sabit tutulmaya çalışılmıştır. Kamotani (Kamotani vd.,1996), yerçekimli ortamda yaptığı çalışmalarda uzay laboratuvarlarındaki değerlerle (Kamotani vd.,1996) karşılaşmıştır. Sonuçta yerçekimli ortamda viskozitenin az da olsa aynı akışkan için yüksek olduğu söylenebilir. Ayrıca bizim deney sonucumuzun ısı kaybının az olması nedeniyle yüksek çıkması beklenen ve istenen bir durumdur.

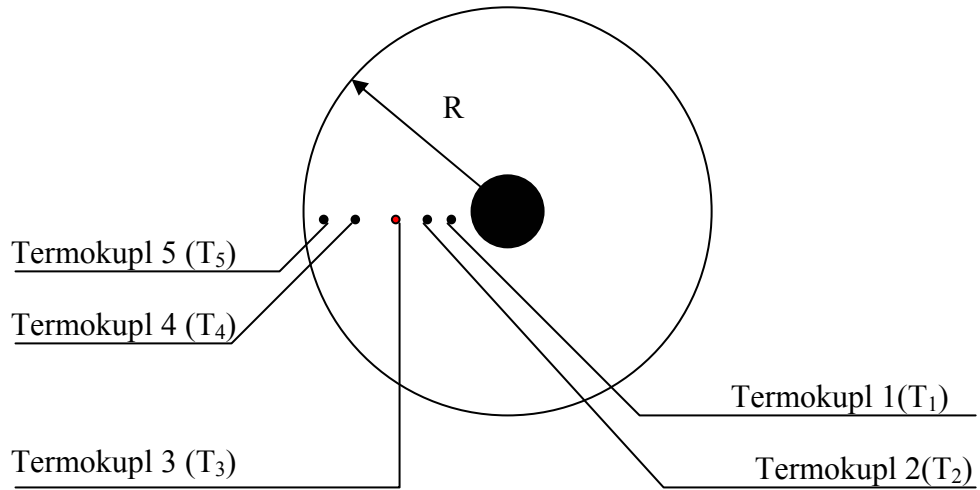
Kızılötesi sıcaklık algılayıcı cihazlarla, 1.2 cm çapında ve daha küçük çaplardaki kaplarda, hem uzay çalışmalarında hem de yerçekimli ortamda, aldıkları verilerde serbest yüzey benzerlik göstermektedir. Bu da yüzme etkisinin bu çaptaki kaplarda ihmal edilebileceğinin göstergesidir. Yani yerçekimli ortamda, bu çaplardaki kaplarda yapılan deneylerde yüzme etkisini ihmal edilebilir ancak biz daha büyük çaplarda çalıştığımız için bu etki göz önünde bulundurulmuştur. Dolayısıyla Şekil 4.8.'de yüzme etkisinin ihmal edildiği veriler bulunmaktadır. Görüleceği üzere, uzayda çok küçük enerji ile oldukça yüksek Ma değerlerine ulaşabilmekteyiz. Kendi verilerimizle karşılaştırıldığında bu faktör göz önünde bulundurulacaktır.



Şekil 4.9. Farklı çaplardaki kaplar için osilasyon başlangıcı için kritik marangoni sayıları

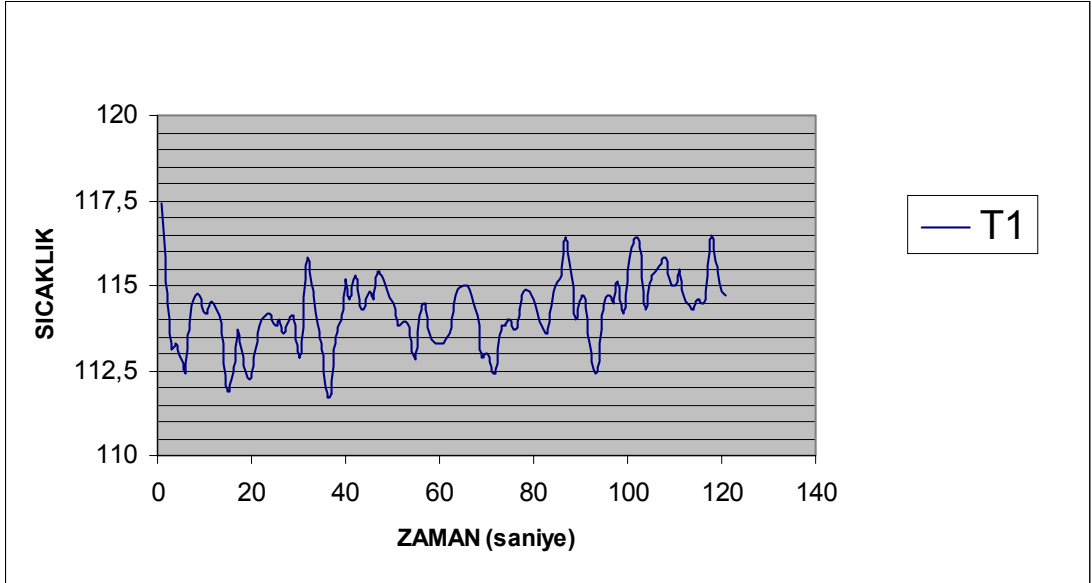
Şekil 4.9.'de farklı çaplardaki kaplardaki osilasyon başlangıcı için kritik Marangoni farkları verilmektedir. Daha önce yapılan çalışmalar da önemli bazı boyutsuz parametreleri sabit tutmuşlardı. Bunun sebebi kolay karşılaştırma yapabilmektir. Dolayısıyla değişen tek parametre Marangoni,  $Ma$ , parametresidir. Yukarıda Şekil 4.9.'in verilmesinin nedeni de bu farkı açık olarak gözlemlemektir. Osilasyon başlama şartlarını etkileyen uygun ve tek parametrenin  $Ma$  olduğu sonucuna bu şekil ile varılabilir. Peki diğer etkenler nedir? Önceki çalışmalara göz atıldığında karşımıza çıkan diğer bir parametre de yüzey deformasyon parametresidir. Bu konu daha sonra ele alınacaktır.

Yine  $R=31\text{mm}$  çapa sahip silindirik kap içerisinde 2 tanesi ısıtma bölgesinin yakınında, 2 tanesi soğutma bölgesinin yakınında ve 1 tanesi de merkezde olmak üzere Şekil 4.10.'de görülen 5 farklı noktada veriler ayrı ayrı 120 sn boyunca saniyede bir veri alınarak kaydedilmiştir. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.11., Şekil 4.12., Şekil 4.13. Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.) kaydedilen bu verilerin sıcaklık zaman grafikleri gösterilmiştir. Bunların devamında, Şekil 4.16., tüm bölgede yer alan termokuplların 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrilerinin karşılaştırılmasını temsil etmektedir.

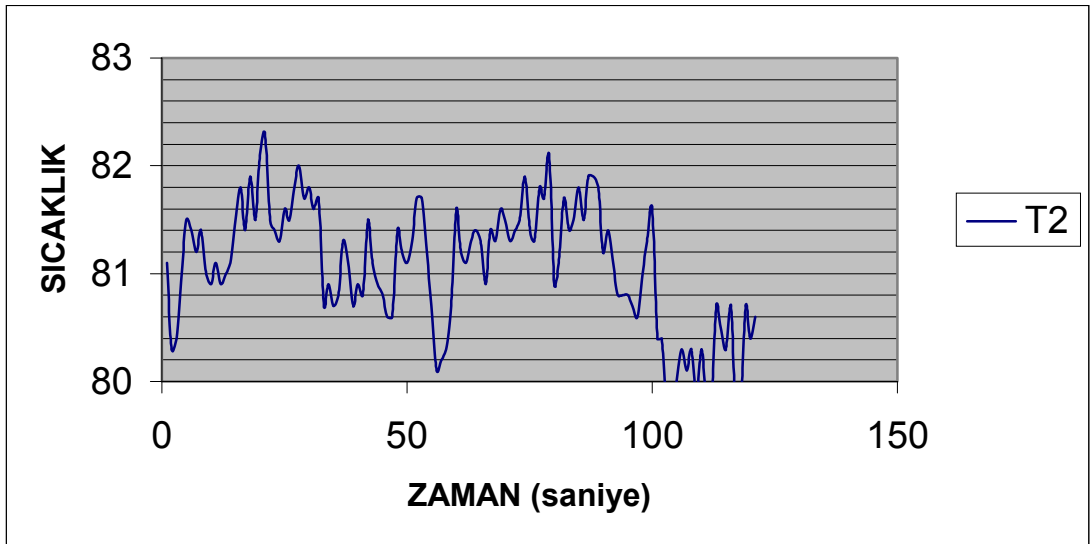


Şekil 4.10. Silindirik kap içerisinde veri alınan 5 nokta

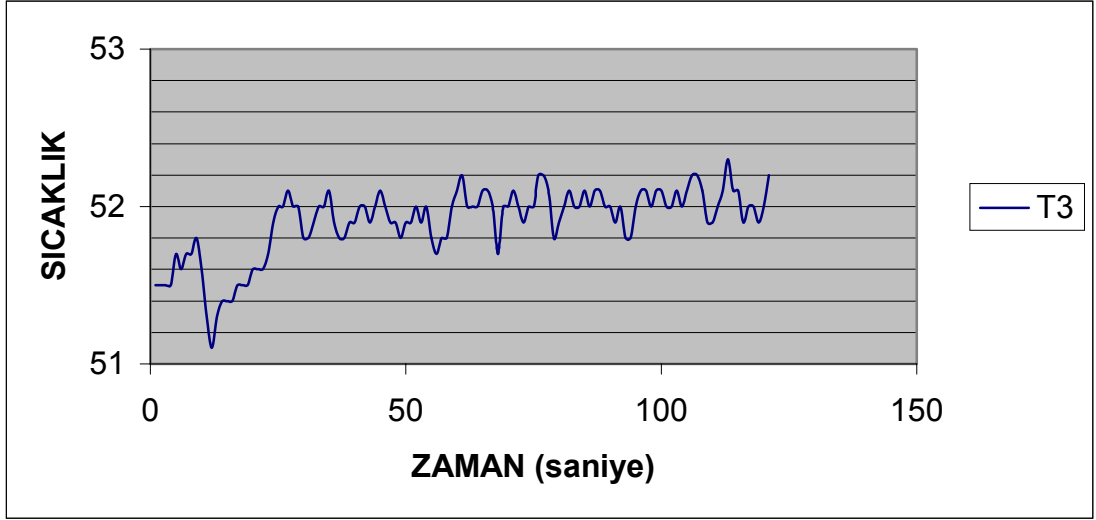




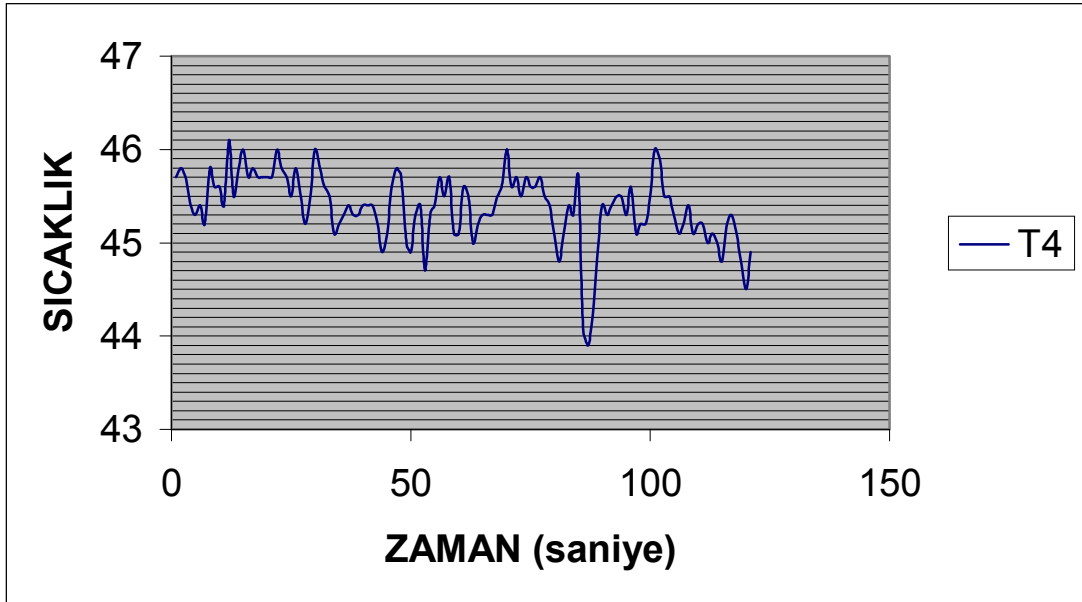
Şekil 4.11. Isıtıcı bölgesinde 1 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi ( $x \rightarrow 0,135$ )



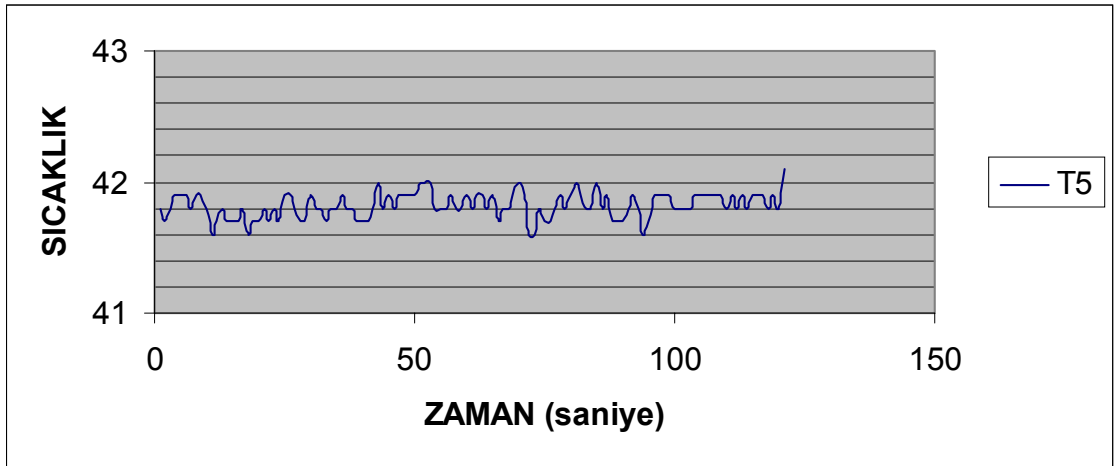
Şekil 4.12. Isıtıcı bölgesinde 2 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi ( $x \rightarrow 0,270$ )



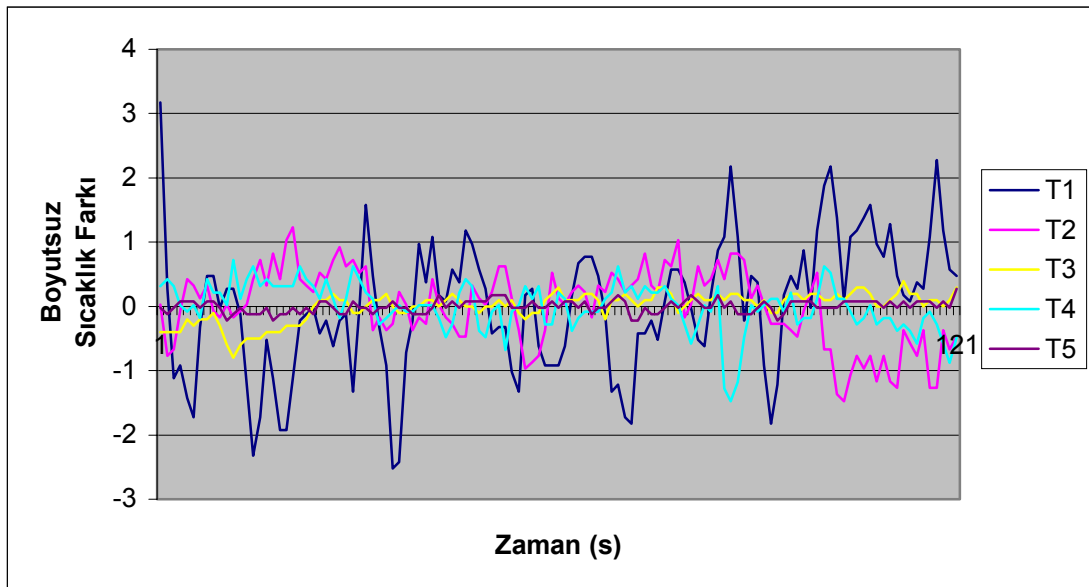
Şekil 4.13. Merkezde 3 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi ( $x \rightarrow 6,75$ )



Şekil 4.14. Soğutucu bölgesinde 4 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi ( $x \rightarrow 13,230$ )



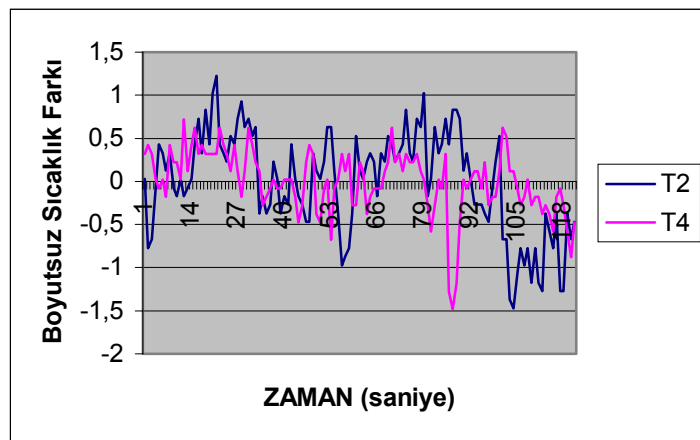
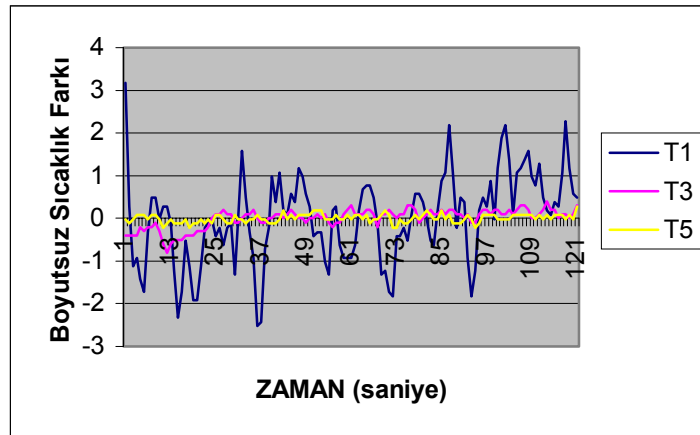
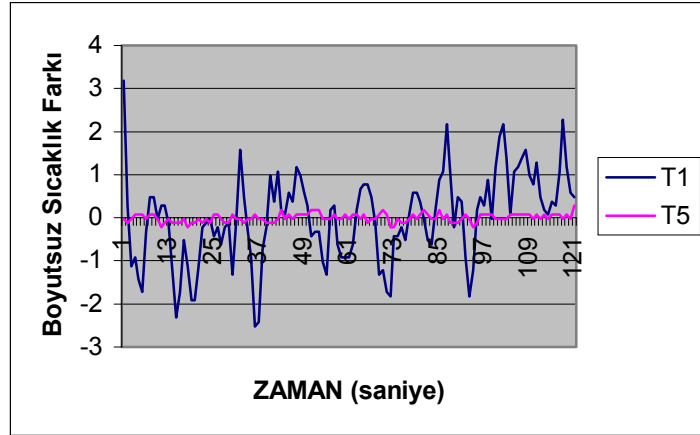
Şekil 4.15. Soğutucu bölgesinde 5 numaralı termokuplun 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi (  $x \rightarrow 13,365$  )



Şekil 4.16. Tüm bölgede termokuplların 120 saniye boyunca aldığı verilerden oluşturulan sıcaklık-zaman eğrilerinin karşılaştırılması

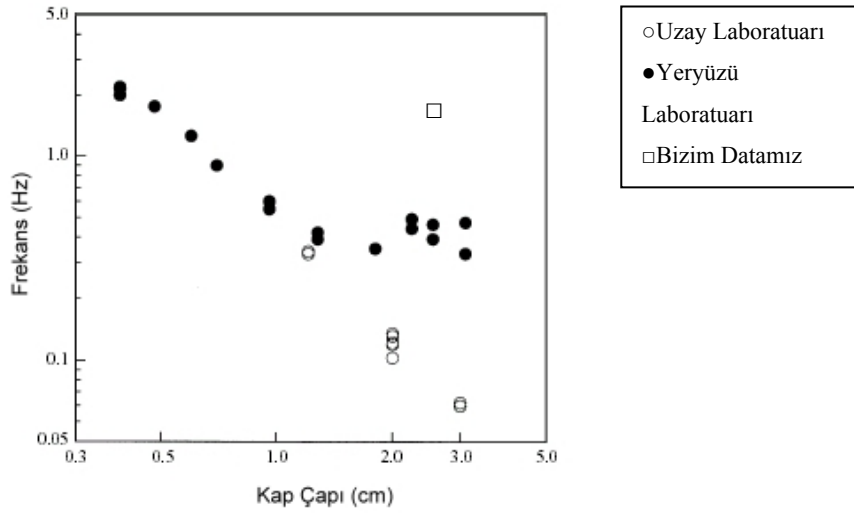
Bu grafikler, 1 ve 5 numaralı termokuplların bulunduğu ısıtıcıya ve soğutucuya en yakın ölçümler sonucunda, sıcaklık gradyanlarının bu bölgelerde yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Ancak daha önceki çalışmalarda da ifade edildiği gibi sıcak bölgedeki ani yükselmenin osilasyonlar esnasında sıcaklık gradyanlarının bu bölgede yüksek derecede etkili olduğunu göstermiştir.

Yukarıda anlatılan gözlemi açıkça görmek için 1-5, 1-3-5 ve 2-4 numaralı termokupllar aralarında ayrı ayrı karşılaştırılarak Şekil 4.17.'de verilmiştir. Yukarıdaki şekiller dikkatlice incelenecek olursa aralarında sinüzoit bir ilişki olduğu görülebilir. Bu şekillerden yüksek frekans ve dalgalanmaların da sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.17. 1-5, 1-3-5 ve 2-4 numaralı termokuplların kendi aralarında karşılaştırılması için elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri

Bu sıcaklık alanlarının frekans değerleri, sıcaklık algılayıcı cihaz yardımı ile bilgisayara aktarılan sıcaklık değerlerine Matlab programında FFT (Fast Fourier Transform) uygulanarak akışın frekans spektrumu elde edilmiştir. Bizim kap çapımızın büyük olduğu ve yüzme etkisinin de var olduğu düşünülerek örneğin 31 mm kap çapındaki osilasyon esnasındaki osilasyon frekansı 1.95 Hz olarak bulunmuştur. Bu değer de önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.

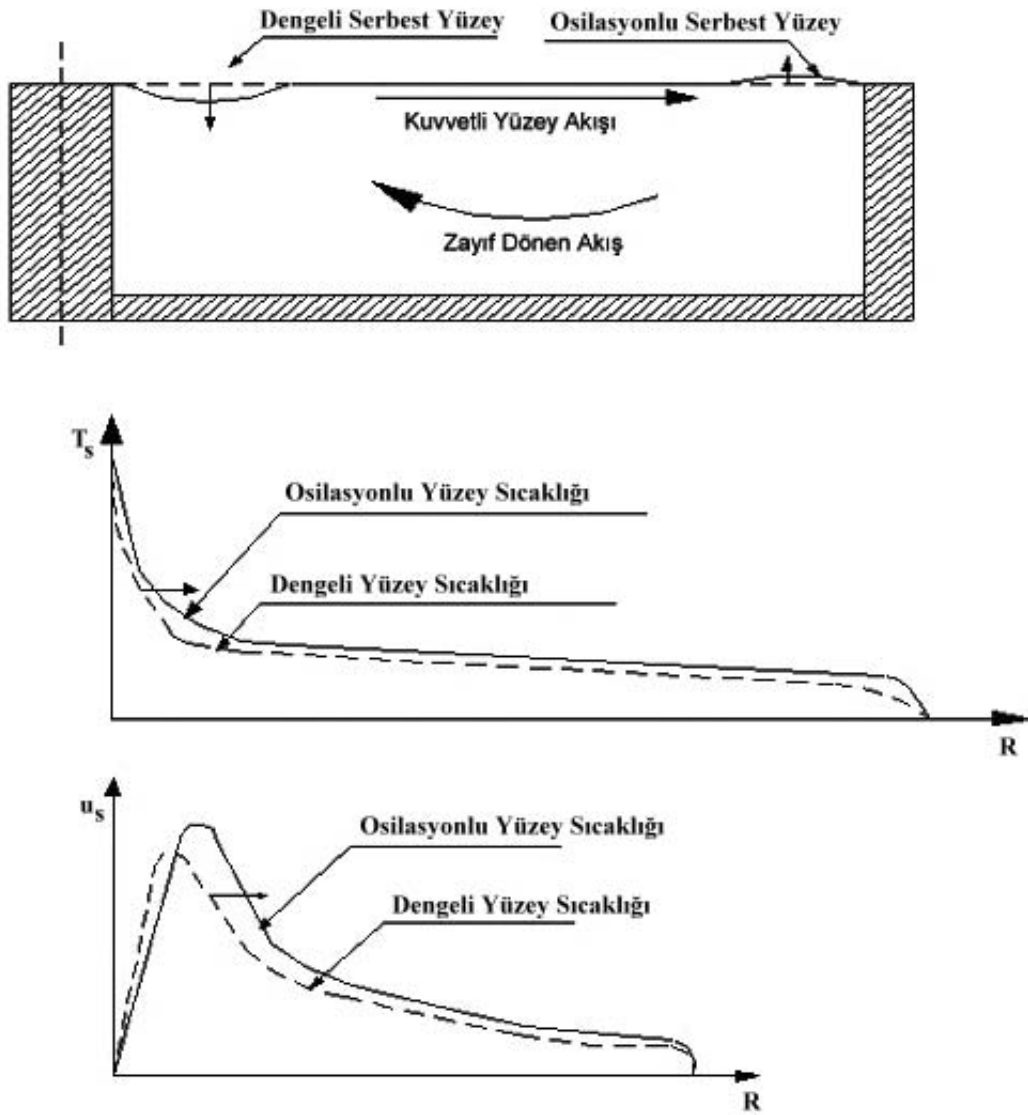


Şekil 4.18. Farklı çaplardaki kaplar için osilasyonların başlamasına yakın osilasyon frekans değerleri

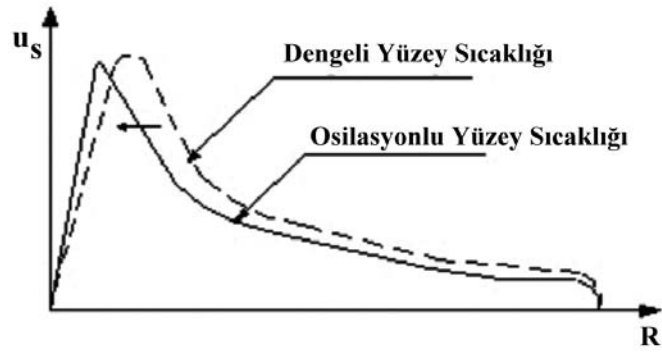
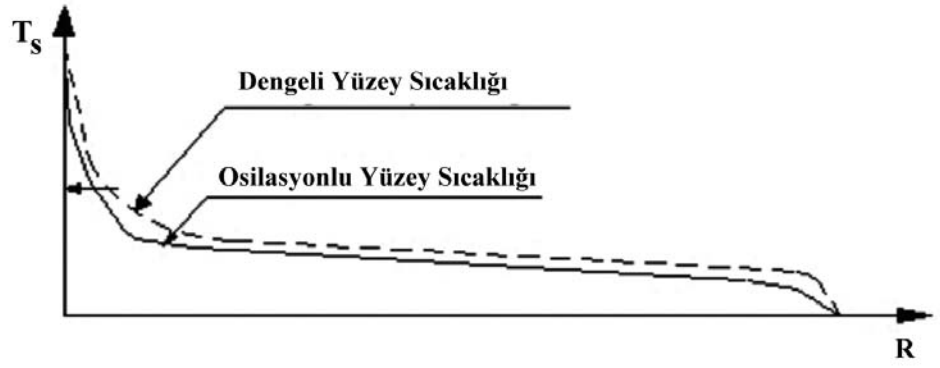
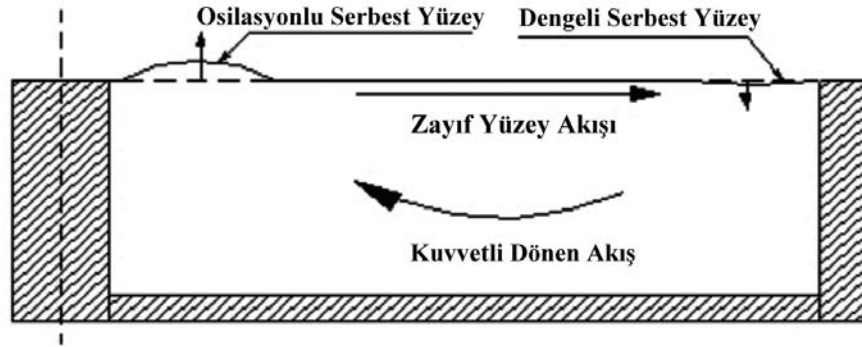
Farklı çaplardaki kaplar için osilasyonların başlamasına yakın osilasyon frekans değerleri Şekil 4.18.'da verilmiştir (Kamotani,1999). Yüzme etkisinin de ihmal edilmesiyle elde edilen bu sonuçlar osilasyon frekanslarının artan kap çapıyla beraber düştüğünü temsil etmektedir. Ancak bizim frekans değerimiz görüleceği üzere az bir oranla yüksek bulunmuştur. Bu sonuçta, deneysel aparatların etkisinin olduğu göz önüne alınmıştır.

Sabit radyal yönlü serbest yüzeyde, osilasyonların bir döngüsünde, bir hızlı bir yavaş akış hareketi ortaya çıkar (Lee, Kamotani, 1991). Aktif periyot olarak adlandırılan periyot esnasında yüzey akışı oldukça kuvvetlidir ve artan konveksiyona bağlı olarak serbest yüzey boyunca yüzey sıcaklığı artış gösterir. Aktif periyodu, zayıf periyot olarak adlandırılan zayıf bir yüzey hareketi izler. Bu periyotta yüzey sıcaklığı konveksiyonun da azalmasıyla beraber azalır.

Akış izlerinden gözlenen, belirli bir zamanda, serbest yüzeydeki konveksiyon etkisinin, ısıtma ve soğutma bölgeleri arasındaki aktif periyodun bu noktadaki yönlerde etken olduğu da göz önüne alınarak, çok güçlü olduğudur (Şekil 4.19). Benzer olarak yavaş periyoda bağlı olarak serbest yüzeyde oldukça zayıf bir konveksiyon oluşacaktır (Şekil 4.20.). Bu nedenle, akış izlerinin bir döngüsünde iki farklı sıcaklık piki oluşacaktır.

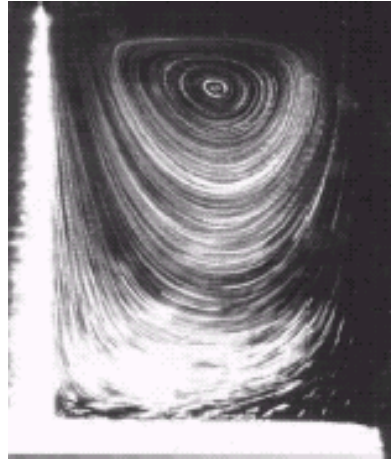
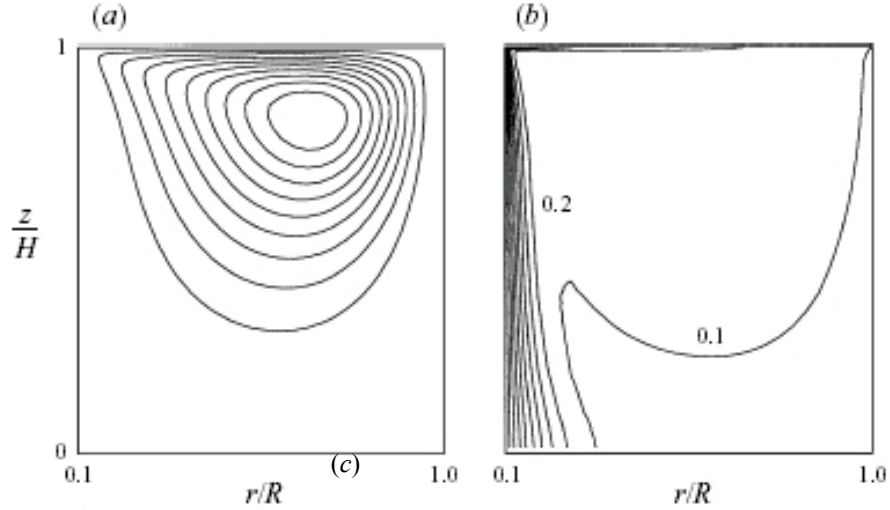


Şekil 4.19. Aktif periyot



Şekil 4.20. Zayıf periyot

Düz bir serbest yüzeye sahip akışkan için hesaplanan radyal yönlü ( $r,z$ ) izotermeler ve akış çizgileri yine Kamotani'nin (Kamotani vd., 2000) çalışmasıyla karşılaştırıldığında onun çalışmasıyla büyük benzerlik göstermiştir. Elde edilen izoterm ve akış çizgileri yerçekimsiz bir ortamda kaydedilen osilasyon resmi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.21.'de gösterilmektedir.



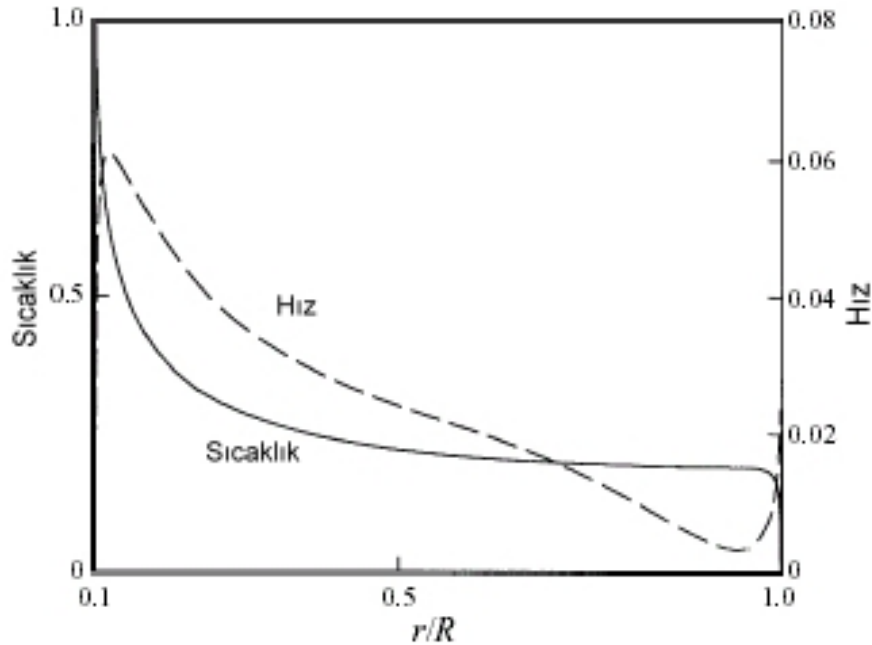
Şekil 4.21. Düz serbest yüzeye sahip rejim hali akış için tipik nümerik akış çizgileri ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ) (a) izotermeler ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ) (b) (Kamotani vd.,2000) ve osilasyon akış yapısı( $g=0$ ) (c) (Lavalley vd., 2001)

$$(Ma=1.6 \times 10^5, Pr=67, Ar=1, Hr=0.1)$$



Şekil 4.21.'de görüleceği üzere Şekil 4.21. (a) ve Şekil 4.21. (b)' de yer alan izotermeler yeryüzü laboratuvarlarında bu çalışmada da gözlemlendiği üzere geniş bir hacimsel bölgeye sahiptir. Yerçekimi ivmesinin ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ) etkisi ile akış çizgilerinin sınırlandığı ortadadır. Ancak Şekil 4.21. (c) (Lavalley vd., 2001)'de yer alan resimde aynı durum söz konusu değildir. Yerçekimsiz ortamda, yerçekimi ivmesinin mevcut olmaması ve elbette bunun bir sonucu olarak da akış üzerine bir yüzme etkisinin bulunmaması sebebi ile akış çizgilerinin dipteki hacimsel bölgeye kadar indiği ve serbest yüzeydeki yüzey gerilim kuvvetinin önemli ölçüde azalması ile birlikte, akış yoğunluğunun oldukça rahatladığı görülmektedir.

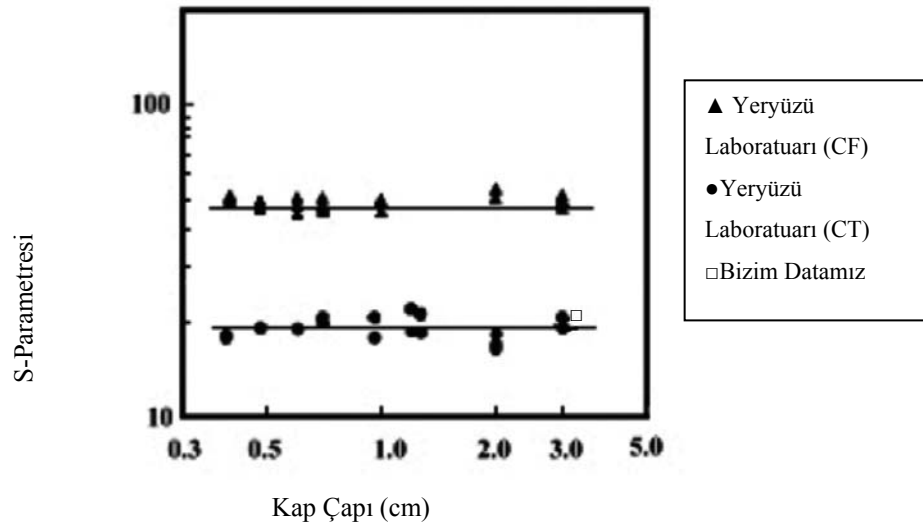
Rejim hali akışta bir akış hücresinin düzenli olarak hareketi gözlenmiştir. Bu harekette yüzey akışı olarak isimlendirdiğimiz akış sıcak bölgeden soğuk duvar doğru hızlı şekilde gerçekleşmektedir. Bir çeşit geri dönüş olarak tanımlanabilen akış ise daha yavaş olarak hacimsel bölgeden ısıtıcı tele doğru gerçekleşmektedir. Akış hücresi olarak tanımlanan akış şekline bağlı olarak doğal konveksiyon serbest yüzey ve ısıtıcı boyunca ince bir termal sınır tabakaları oluşturmuştur. Bu sınır tabakalarının dışındaki alanlar genel olarak daha soğuk bölgelerdir.



Şekil 4.22. Hesaplanan yüzey hız ve sıcaklık dağılımları (Kamotani vd., 2000)

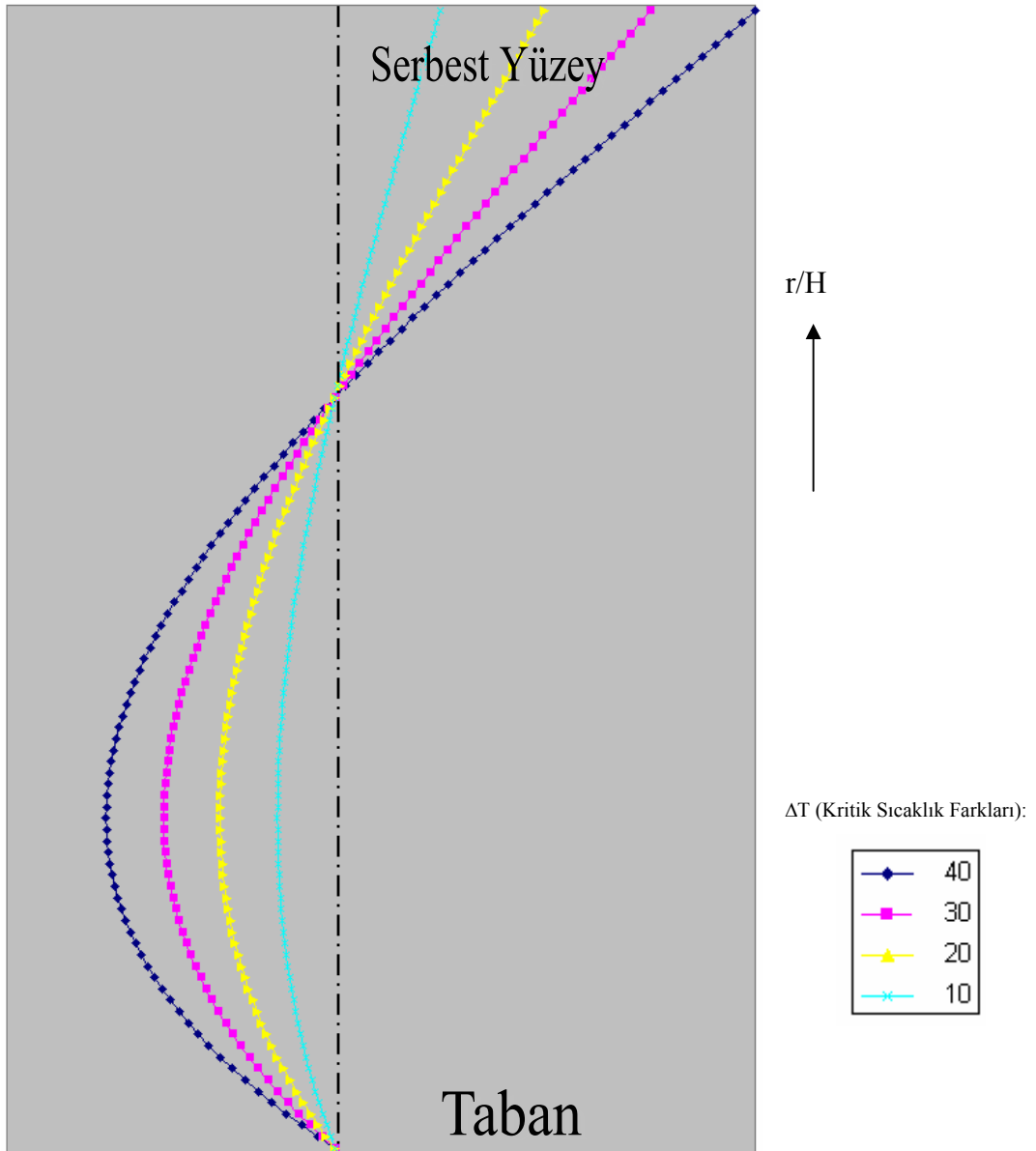
Çok küçük ve eğri serbest yüzeye sahip deneysel hücrelerde serbest yüzey ölçümlerinin doğruluğunda bazı şüpheler olabilir. Serbest yüzey deformasyonundaki hataları göz ile tayin etmek mümkün değildir. Kap ne kadar küçük olursa serbest yüzeydeki menisküs etkisi o kadar çok olacaktır. Bu nedenle şekil faktörünü tayin etmek için, bizim deneyimizde olduğu gibi, büyük çapa sahip kaplar kullanmak gereklidir. Menisküs şekil değişimi genel olarak ısıtıcının yanında gerçekleştiği sürece, sıcak bölge menisküs ile etkilenmektedir. Sıcak bölgedeki izotermler eğri ve düz yüzeyler için incelenecek olursa, yüzey eğri olduğunda bu bölgedeki yüzey sıcaklık gradyeninin düştüğü görülecektir. Diğer taraftan, etkili termokapiler kuvvet azalsa da, bu kuvvet geniş bir bölgeye etkidiğinden eğri yüzeylerde serbest yüzey alanı da artacaktır (Bkz. Şekil 1.9.). Bu sebeple eğri yüzeylerin tüm akış yapısına etkisi önemli değildir. Lin (Kamotani vd., 1995), serbest yüzey deformasyonlarının osilasyon mekanizması için gerekli bir etki olduğunu doğrulamasına da, sıcaklık osilasyonları ile birebir ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 4.23.'de bizim

deneyimiz sonucunda elde edilen şekil faktörü  $S = \frac{1}{Pr} \frac{\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \Delta T}{\sigma}$  formülüne bağlı olarak hesaplanarak, Kamotani'nin (1999) çalışmasında elde ettiği veriler ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.23. Farklı çaplardaki kaplar için osilasyon şekil faktörleri değerleri

Termokapiler kuvvetin sıcak bölgeye etken olması nedeniyle akışın hız profili bu bölge için analitik olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.24.'de rejim hali akış için elde edilen hız profili görülmektedir. Hız profilini belirleyen esas değerler daha önce verilmişti (Bkz. Şekil 1.7.). Dolayısıyla  $\Delta$ , hızın piki;  $\delta_{TH}$ , termal sınır tabaka kalınlığı ve  $u_0$ , hız değeridir. Hız alanları üzerine yapılan en önemli çalışma Kamotani'nin (Kamotani, Ostarch , Pline ,1995) yaptığı bir çalışmadır.



Şekil 4.24. Analitik olarak hesaplanan hız profili

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Son yıllarda birçok ileri malzeme teknolojisi ve elektronik endüstrisinde olduğu kadar savunma sanayisinde de daha kaliteli kristal gereksinimi, araştırmaların kristal büyümesi üzerine odaklanılmasına yol açmıştır. Bu kapsamda iletken malzemeler (yarı iletkenler ve süper iletkenler) teknolojik gelişmelerin bir parametresi olarak kristal kalitesi üzerindeki iyileşmenin bir ürünü olduğunu herkes bilmektedir. Kristallerin büyütülmesinde, yer çekimi ivmesinin ve doğal konveksiyonun zararlı etkileri vardır. Bu iki etki mümkün olduğunca azaltılmak şartıyla, özellikle bilimsel çalışmalar için, düşük yer çekimi ivmesine sahip ortamlarda yüksek kaliteli kristallerin büyütülmesi için yeni fırsatlar sağlanmıştır. Çok düşük veya sıfıra yakın yer çekimi ivmesine sahip ortamın akışkan hareketini sağlayan hareketlerden biri yüzey gerilim akışkan hareketidir. Doğal konveksiyonun etkisi altında kalan akışkanlar yoğunluk farkından dolayı batmazlık meydana getirmektedir. Bahsedilen batmazlık etkisi düşük yerçekimi ivmesi değerlerine sahip ortamda önlenirken, akışkanın yüzey gerilimlerinden meydana gelen hareketinin önemi artmaktadır. İki farklı akışkan fazları arasında oluşan arakesit (akışkan-hava) transport fenomenleri etkisi altında kalması ile akışkan hareketi doğmaktadır.

Akışkan serbest yüzeyi boyunca değişime sahip olan arakesit üzerindeki sıcaklık değişimi akışkanın fiziksel özelliklerinden olan viskozite değerinin sıcaklık gradyeni ile orantılı olarak değişimi bize yüzey gerilim hareketinin başlaması ile birlikte akışkan hareketine neden olmaktadır. Akışkan 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.

Yüzey gerilimi hareketi, sıcaklık ve elektriksel potansiyelin fonksiyonudur. Bunlardan herhangi birinin gradyeni veya kombinasyonu ise ara yüzey boyunca (akışkan yüzeyi-hava) akışkan hareketini etkileyen yüzey gerilim gradyenlerini meydana getirir.

Yüzey gerilimli akışkan hareketini anlamak için daha çok teorik, deneysel ve nümerik alanlarda çaba harcanmaktadır. Özellikle sıcaklık gradyeninin meydana getirmiş olduğu akışkan hareketi, termal yüzey gerilimli akış hareketi (thermocapillary flow) olarak isimlendirilir. Hava-akışkan ara kesiti boyunca oluşan sıcaklık gradyeni akışkanın viskozite gradyeninin değişmesine sebep olur ve böylece hacimsel akış tamamlanarak akışkanın akışı süreklilik arz eder.

Biz tez çalışmamızda, yüzey gerilimli konveksiyonel akış hareketinin gerçekleşmesinde esas teşkil eden etkenleri araştırdık. Bu hareketin gerçekleşmesini sağlayan en önemli etkenlerden biri olan yüzey gerilimi üzerinde durduk. Bir akışkan hareketini gözlemlemek kolay bir iş değildir. Bir ara yüzey boyunca yüzey geriliminin değişimi, sınırlanan hava-akışkan ara yüzeylerindeki kesme kuvvetleriyle dengelenir. Sıcaklık gradyenlerinden viskozite gradyenleri doğar. Sıcak akışkanın viskozite gradyenleri ile soğuk akışkanın viskozite gradyenleri arasında yüzey gerilme gradyenleri ile ifade edilen bir kuvvet dengesi ile dengelenir. Dolayısıyla konveksiyonel hareket bu etkilerin tesiri altında gerçekleşmektedir. Bu yüzey gerilim kuvvetleri değişik konfigürasyonlara sahip olarak değişik amaçlar için çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiş, kendilerine göre akışkanı hareket ettiren kuvvetleri yüzey gerilim kuvvetlerine göre kıyaslayıp sonuçlandırmışlardır. Bu sonuçlar konfigürasyonlara göre kendi aralarında silindirik kap içerisinde incelenen yüzey gerilimli akış hareketi ve kapsız olarak incelenen yüzey gerilimli akış hareketi olarak ikiye ayrılır. Silindirik kap içerisinde yüzey gerilimli akış hareketi, sabit ısı akısına sahip sistemler, sabit sıcaklığa sahip sistemler ve açık kaplar içerisinde akışkan yüzeyi boyunca sıcaklığa sahip sistemler olarak adlandırılan bu üç konfigürasyonla incelenir. Yüzey gerilimli akış hareketini kapsız olarak inceleyen iki konfigürasyon mevcuttur. Bunlar da yarım bölge yüzen sistem (half-zone tekniği) ve tam bölge yüzen sistem (full-zone tekniği) konfigürasyonlarıdır.

Yarım bölge yüzen sistemler üzerine çalışan araştırmacıların yanı sıra biz bu tez çalışmasında silindirik kap içersine doldurulan akışkanın silindirik kabın merkezinden itibaren aksel olarak ısıtılan silindirin radyal yöndeki çeperlerinden soğutulan bir konfigürasyon kullandık.

Bizim konfigürasyonumuz ile yukarıda bahsedilen yarım bölge yüzen sistem arasındaki fark, yarım bölge yüzen sistemde sıcaklık gradyeninin aksel doğrultuda olması yer çekimi vektörü, yüzey gerilim hareketi ve doğal konveksiyon hareketi ile paralellik teşkil etmektedir. Bizim konfigürasyonumuzda ise yüzey gerilim hareketi, sıcaklık gradyeni ne karşı yer çekimi vektörü ve doğal konveksiyon birbirine dik doğrultuda etki etmektedirler. Bu etkinin bizim konfigürasyonumuzu teşkil eden akışkan hareketinin incelenmesi üzerinde durduk.

Bu sistemdeki boyutsuz parametreler akışkanın yüzey gerilim kuvvetleri ile meydana gelen hareketin diğer kuvvetlerle kıyas edildiğinde bu parametreler içerisinde Prandtl (Pr) sayısının ve Marangoni (Ma) sayısının boyut oranını fonksiyonu olarak değiştiği incelenmiştir. Biz bunun doğruluğunu tez aşamasında ispatlamaya çalıştık.

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

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

Çalışma şartlarında, deneysel ve teorik incelemelerde yukarıda bahsedilen her iki akışın birbirleri üzerindeki etkileri ve kristalin üzerinde zararlı etkiye sahip yoğunluk farkının azaltılması çareleri incelendi. Bu çalışmada akışkanın rejim hali akıştan osilasyonlu akış durumuna geçme sebepleri ve mekanizması ile bu kritik noktanın (rejim halinden osilasyonlu akışa geçiş noktası) geciktirilmesi çareleri araştırıldı. Bu çarelerin başında, soğutucu akışkanın sıcaklığını normal şartlardaki laboratuvar sıcaklığından daha düşük sıcaklıklara inilerek kritik nokta sıcaklığını yukarılara doğru çekmek gelmektedir. Yukarıda bahsedilen kritik nokta tespit edildikten sonra, osilasyonlu akışın akış karakteristikleri incelendi. Rejim hali ve osilasyonlu akış için sıcaklık ve hız alanları araştırıldı.

Neticede farklı bilim adamlarının yeryüzündeki yerçekimi ivmesi  $g=9,81 \text{ m/s}^2$  şartları ve  $g\approx 0 \text{ m/s}^2$  şartları için birbirinden bağımsız olarak yaptıkları çalışmalar sonucunda elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, silindirik bir kap içerisinde bulunan akışkanın serbest yüzeyindeki hız ve sıcaklık profilini inceledik. Bu amaçla boyutsal oranını 1.0 olarak ayarladığımız silindirik kap içerisinde farklı deneyler yaptık. Serbest yüzey sıcaklığını ölçtük. Alınan veriler sonucunda elde ettiğimiz grafiklerin yorumunu yaparak aşağıdaki sonuçlara vardık.

Literatüre göre sirkülasyon yolunun uzaması ve sıcaklık farkının artmasından dolayı yüzeydeki sıcaklık değeri azalmaktadır. Bu nedenin yanı sıra akışkan partikülünün silindirin tabanına doğru ulaştığında kaybettiği sıcaklık değeri önemli bir etkidir. Ayrıca osilasyonların başlamasına Ma sayısının yanı sıra şekil faktörü de etki etmektedir. Hız alanı Ma sayısına bağlı olarak artmakta ancak bu değişim lineer olmamaktadır. Yüzey akışı Ma sayısı ile çok büyük bir değişiklik ortaya koymaz. Sıcaklık alanlarında gözlenen bir sonuç ise sıcaklık gradyanlerinin iki noktada etkin olduğu ancak sıcak bölgedeki termokapiler kuvvetin tüm akış üzerine etkin olduğudur. Dolayısıyla frekans, hız ve sıcaklık ölçümlerinde sıcak bölgedeki verilere önem verilmiştir. Ancak beklenildiği üzere osilasyonun başlama süreci, soğutucu sıcaklığı oda sıcaklığı aşağısına çekildiğinden ötürü, geciktirilmiş ve sonuçlar bu gecikme ile orantılı olarak karşılaştırılmıştır. Bu gecikme kritik sıcaklık farkının artmasına dolayısıyla doğal konveksiyonun osilasyon akış yapısı üzerine daha etkili olmasına sebep olmuştur. Özellikle kaba doldurulan akışkanın menisküs şeklinin, sıcaklık alanını ve hız alanını oldukça etkilediği literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırma yapıldığında karşımıza çıkan en önemli sonuçlardan biridir.

Çalışmamızdaki verilerin saf ve homojen yarı iletken malzemelerin üretilmesinde yol gösterici olacağına inanmaktayız.

## 6. KAYNAKLAR

- Chun C.H., Wuest W., 1978. A micro gravity simulation of Marangoni convection, *Acta Astronautica*, 681.
- Kamotani Y., Lee J. H., Ostrach S., Pline A., 1992. An experimental study of oscillatory thermocapillary convection in cylindrical containers, *Physics of Fluids*, 955.
- Kamotani Y., Ostrach S., Pline A., 1995. Some velocity field results from the thermocapillary flow experiment aboard USML-1 Spacelab, *Adv. Space Res.*, (7) 79-82.
- Kamotani Y., Ostrach S., Lin J., 1995. An experimental study of free surface deformation in oscillatory thermocapillary flow, *Acta Astronautica*, 525-536.
- Kamotani Y., Chang A., Ostrach S., 1996. Effects of heating mode on steady axisymmetric thermocapillary flows in microgravity, *Journal of Heat Transfer*, 118-191.
- Kamotani Y., 1999. Thermocapillary flow under microgravity-experimental results, *Adv. Space Res.*, 1357-1366.
- Kamotani Y., Ostrach S., Masud J., 2000. Microgravity experiments and analysis of oscillatory thermocapillary flows in cylindrical containers, *Journal of Fluid Mech.*, 211-233.
- Lavalley R., Amberg G., Alfredson, 2001. Experimental and numerical investigation of nonlinear thermocapillary oscillations in an annular geometry, *J. Mech. B-Fluids*.
- Lee K. J., 1994. A study of thermocapillary convection in circular container with CO<sub>2</sub> laser heating, Ph. D. Dissertation, Dept. Of Mech. And Aerospace Eng., Case Western Reserve University, Cleveland Ohio.
- Lee K.J., Kamotani Y., 1991. Combined thermocapillary and natural convection in rectangular enclosures, *Proc. Third ASME/JSME Joint Thermal Eng. Conf.*



- Monti R., Fortezza F., 1991. The scientific results of the experiment on oscillatory Marangoni flow performed in telepresence on Texus 23 , Microgravity Quarterly, 163.
- Munson B. R., Donald F. Young, Theodore H. Okishi, 1994. Fundamental of Fluid Mechanics, USA.
- Ostrach S., 1977. Motion induced by capillarity, Physicochem. Hydrodyn., 571.
- Ostrach S., 1979. Convection due to surface-tension gradients, (COSPAR) Space Research, 563.
- Ostrach S., 1982. Low-gravity fluid flows, Ann. Rev. Fluid Mech., Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 313.
- Ostrach S., Kamotani Y., Lai C., 1985. Oscillatory thermocapillary flows, Physicochem. Hydrodyn., 585.
- Preisser F., Schwabe D., Scharmann A., 1983. Steady and oscillatory thermocapillary convection in liquid columns with free cylindrical surface, Jour. of Fluid Mech., 545.
- Raymond A., 1990. Fiziğin Temelleri 3, (Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics'den çeviri), Serway, Third Edition, James Madison University.
- Ringer. C., 1995. Eine Fachbereits aus Physik, Haupttermin, 87, Graz.
- Schwabe D., Scharmann A., Preisser F., Oeder R., 1978. Experiments on surface tension driven flow in floating zone melting, Jour. of Crystal growth, 305.
- Solmaz S., 2001. Silindirik hacim içerisinde oluşan yüzey gerilim kuvvetlerindeki boyutsuz sayıların incelenmesi, Seminer I çalışması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Solmaz S., 2002. Silindirik hacim içerisinde akışkan yüzey gerilim hareketi anındaki hız profiline incelenmesi, Seminer II çalışması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

**ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı : Sibel Solmaz ÇOPUR  
Doğum Yeri : Sindelfingen / Almanya  
Doğum Yılı : 1979  
Medeni Hali : Evli

**Eğitim ve Akademik Durumu:**

Lise :1993-1996.....Özel Antalya Lisesi  
Lisans :1996-2000.....Süleyman Demirel Üniversitesi  
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Yüksek Lisans:2000-2004.....Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil: İngilizce,Almanca