

**Yüzey Gerilimli Konveksiyon Yüzünden  
Yüzer Bölgede Olusan Rejim Hali ve  
Osilasyonlu Durumdaki Sicaklik Dagilimi  
ile Ilgili Deneysel Çalislamar**

**Adnan SAGLAM**

**Doktora Tezi  
FIZIK ANABILIM DALI  
ISPARTA 2004**

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

**YÜZEY GERİLİMLİ KONVEKSİYON YÜZÜNDEN  
YÜZER BÖLGEDE OLUSAN REJİM HALİ ve  
OSİLYONLU DURUMDAKİ SICAKLIK  
DAĞILIMI İLE İLGİLİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

**Danışman  
Prof. Dr. Nuri ÖZEK**

**ADNAN SAGLAM**

**DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
ISPARTA 2004**

## ÖZGEÇMİS

**Adi Soyadi** : Adnan SAGLAM  
**Dogum Yeri** : Sütçüler ISPARTA  
**Dogum Yili** : 1968  
**Medeni Hali** : Evli-3Ç

### **Egitim ve Akademik Durumu:**

**Lise** 1980 Isparta Lisesi  
**Lisans** 1981-1985 Atatürk Üni. Kazim Karabekir Egitim Fakültesi  
**Y. Lisans** 1994-1996 Süleyman Demirel Üni. Fen Bilimleri Ens.  
**Yabancı Dil** : İngilizce

### **Is Deneyimi :**

1986-1993 M.E.B Öğretmenlik

1993-..... S.D.Ü. Fen-Ed. Fakültesinde Arastirma Görevliligi

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TESEKKÜR.....	v
SIMGELER DIZINI.....	vi
SEKİLLER DIZINI.....	vii
ÇİZELGELER DIZINI .....	ix
1. GİRİS .....	1
2. AKİSKANLAR MEKANIGİNDE YÜZEY GERİLİMİN TANIMLANMASI	10
2.1. Yüzey Gerilimi .....	10
2.1.1. Temas Açıları.....	12
2.1.2. Yüzey Gerilim Kuvvetleri Sebebi ile Oluşan Basınç Kuvvetleri.....	13
2.1.3. Yüzey Gerilim Gradyenleri Sebebi ile Oluşan Kesme Kuvvetleri ....	14
2.1.4. Akiskan Yüzeyinde Kimyasal ve Manyetik Etkiler .....	15
2.2. Yüzey Gerilimli Konveksiyon Akisi.....	15
2.3.1. Yarı İletken Malzemelerin Yapısı ve Kullanım Alanları.....	18
2.3.2. Yarı İletken Malzemelerin Üretimi ve Kristal Büyütme Teknikleri..	20
2.4. Yüzey Gerilimli Akis Hareketinin İncelenmesi .....	22
2.4.1 Silindirik Kaplarda Yüzey Gerilimli Akisin İncelenmesi .....	22
2.4.2. Yüzen Bölge Konfigürasyonunda Yüzey Geriliminin İncelenmesi..	24
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Teorik Analiz.....	27
3.2. Temel Denklemler .....	28

3.2.1. Üç Boyutlu Temel Hareket Denklemleri .....	28
3.2.2 İki Boyutlu Hareket Denklemleri.....	31
3.3. Sınır Sarılar.....	33
3.4. Önemli Boyutsuz Parametreler ve Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması	34
4. DENEY ARAÇLARI ve DENEYSEL İZLENİM.. .....	39
4.1. Deney Araçları .....	39
4.1.1 Deney Akiskani .....	40
4.1.2 Deney Bölgesi .....	41
4.1.3. Isıtma Sistemi .....	42
4.1.4. Soğutma sistemi .....	42
4.1.5. Termokuplar .....	43
4.1.6. Sıcaklık Ölçme Cihazı.....	43
4.1.7. Akis Görüntüleme Sistemi .....	44
4.1.8. Komparatör.....	44
4.1.9. Üç Boyutlu Kızak.....	44
4.2. Deneysel İzlenim.....	45
5. ARASTIRMA BULGULARI ve TARTISMA.....	47
6. KAYNAKLAR.....	64

## ÖZET

Bu çalışmada, kristal üretiminde kullanılan en önemli konfigürasyonlardan biri olan, yüzen bölge konfigürasyonu kullanılarak akışkan serbest yüzeyinin düz olduğu durumda üstten ısıtma yapılarak yüksek Prandtl sayısına sahip silikon yağının akışkan kolonundaki yüzey gerilimli konveksiyon (Marangoni konveksiyon) akış hareketi araştırılmıştır. Çalışmamızda yüzey gerilimli konveksiyon akış hareketine akışkanın boyutsal oranlarının, soğuk duvar sıcaklıklarının ve ortam sıcaklıklarının etkileri irdelenmiştir.

DeneySEL çalışmalarda, deney akışkanı olarak kinematik viskozitesi 5 cSt olan silikon yağı kullanılmıştır. Akışkanın serbest yüzeyi düz olacak şekilde çapı 3 mm olan iki bakır çubuk arasına yerleştirilmiştir. Değişik şartlarda rejim hali konveksiyon akış hareketinden osilasyonlu konveksiyon akış hareketine geçişinde kritik değerler araştırılmıştır. Doğal konveksiyon minimize edilerek, akışkanın yüzey gerilimli konveksiyon akış hareketi incelenmiştir.

Yapılan çalışmada, yüzey gerilimli konveksiyon akış hareketinin boyutsal oranlara, soğuk duvar sıcaklıklarına ve farklı ortam sıcaklıklarına bağlı olduğu gösterilmiştir. Yüzey gerilimli konveksiyon akış hareketinde akışkanın akış karakteri kritik Marangoni sayısı ile belirlenmiştir.

Referanslarda verilen makalelerde, akışkan serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının, yüzey gerilimi konveksiyon akış hareketine etkisi ortam sıcaklıklarının ve soğuk duvar sıcaklıklarının 23 °C den yüksek olduğu sıcaklık değerleri için araştırmalara rastlanmaktadır. Bu çalışmada, yüzey gerilimi konveksiyon akış hareketinde akışkan serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının, 0,5-0,9 boyutsal oranlarında, 23°C den düşük ortam ve soğuk duvar sıcaklıklarında irdelenerek sonuçlandırıldı.

**ANAHTAR KELİMELER:** Yüzey gerilimli konveksiyon, Marangoni konveksiyon, Rejim hali yüzey gerilimli konveksiyon, Osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyon

## ABSTRACT

In this study, thermocapillary flow in liquid bridge of high Prandtl number fluid is investigated by using floating-zone configuration when the liquid free surface is flat. The changes on the parameters such as; the aspect ratio of the fluid, the temperature of the cold wall, various air surrounding temperatures, are investigated as being applied different temperature on the liquid column.

In the experiment, the silicon oil which has 5cst kinematic viscosity is used as an experimental fluid and fluid is placed between two copper rods having diameter of 3 mm so as its free surface to be flat. The critical values of the fluid moving from steady state thermocapillary flow to oscillatory flow are investigated. Thermocapillary flow of the liquid is investigated by natural convection is minimised.

In the study it is shown that the onset of oscillatory thermocapillary flow on the liquid bridge depends on the cold wall temperature of the fluid, different aspect ratios of fluid, and different air surrounding temperature. The flow characteristic of fluid on the thermocapillary flow is determined with the critical Marangoni number.

In the previous investigation effect of heat loss from the free surface of the fluid to do surrounding air to thermocapillary flow was studied for temperature values medium and cold wall higher than 23°C. The study has been carried out by investigating medium and cold wall temperature than 23°C for the heat loss fluid free surface to surrounding in thermocapillary flow for aspect ratio between 0,5-0,9.

**KEY WORDS:** Thermocapillary convection, Marangoni convection, Steady state convection, Oscillatory convection.

## TESEKKÜR

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma, Fen-Edebiyat Fakültesi öğretim üyelerinden Prof. Dr. Nuri ÖZEK danışmanlığında yapılmıştır. Çalışmanın tamamlanmasında ve karşılaşılan problemlerin asılmasında her türlü desteği gördüğüm, engin tecrübelerinden, bilgilerinden istifade ettiğim, değerli hocam Prof. Dr. Nuri ÖZEK'e en kalbi teşekkürlerimi arz ederim.

Deneylerin yapılmasında ve çalışmanın her aşamasında yardımcı olan Mühendislik Mimarlık Fakültesi Öğretim Üyesi Y.Doç. Dr. Ramazan SELVER 'e şükranlarımı sunarım.

Yaptığım çalışmalarda her türlü desteği veren bölüm başkanımız Prof. Dr. Ali KÖKÇE'ye teşekkür ederim.

Bu tez, Süleyman Demirel Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından SDÜ-421 numaralı proje ile desteklenmiştir. Bu nedenle desteklerinden dolayı araştırma fonu başkanı ve aynı zamanda dekanımız olan Prof. Dr. Yasar AKSOYLAR'a teşekkür ederim.



## SIMGELER DIZINI

$\rho$	Yogunluk
$\nu$	Akiskanin kinematik viskozitesi $\nu = \frac{\mu}{\rho}$
$\mu$	Akiskanin dinamik viskozitesi $\mu = \rho \cdot \nu$
$k$	Kondüksiyon isi iletim katsayisi
$h$	Konvesiyon isi iletim katsayisi
$a$	Termal difüzyon $a = \frac{k}{\rho C_p}$
$\sigma$	Akiskanin yüzey gerilimi
$t$	Akiskanin kayma gerilmesi
$p$	Yüzey basinci
$g$	Yerçekimi ivmesi
$D$	Silindirik bakir duvarin çapi
$R$	Akiskanin düz olan serbest yüzeyinin yarıçapi
$V_r$	Akiskanin r doğrultusundaki referans hizi
$V_\theta$	Akiskanin $\theta$ doğrultusundaki referans hizi
$V_z$	Akiskanin z doğrultusundaki referans hizi
$H$	Akiskanin dikey yüksekligi
$\delta \approx d$	Akiskanin isil sinir tabaka kalinligi
$T$	Sicaklik
$T_H$	Akiskanin sicak bölgesindeki silindir sicakligi
$T_C$	Akiskanin soguk bölgesindeki silindir sicakligi
$\Delta T$	Akiskanin sicaklik farki $\Delta T = T_H - T_C$
$T_M$	Akiskanin ortalama sicakligi $T_M = \frac{1}{2}(T_H + T_C)$
$Ar$	Boyutsal oran $Ar = \frac{H}{D}$
$Pr$	Prandtl sayisi $Pr = \frac{\nu}{a}$

Gr	Grashof sayisi	$Gr = \frac{g\beta\Delta T H^3}{\nu^2}$
Ma	Marangoni sayisi	$Ma = Pr Re_s$
Re <sub>s</sub>	Yüzey gerilim Reynolds sayisi	$Re_s = \frac{(s_T) T H}{\mu}$
$\theta$	Boyutsuz sıcaklık	$\theta = \frac{T - T_C}{T_H - T_C}$
Bo	Bond sayisi	$Bo = \frac{\rho g R H}{s}$
W	Weber sayisi	$W = \frac{\rho V^2 H}{s}$

## SEKILLER DIZINI

Sekil 1.1. Yüzen bölge konfigürasyonun deney bölgesi.....	2
Sekil 2.1. Yüzey geriliminde temas açisi .....	12
Sekil 2.2. Akiskanin yüzey geriliminin görünüsü .....	14
Sekil 2.3. Akiskanin sinir tabakasi .....	16
Sekil 2.4. Kristallerin bant yapıları.....	19
Sekil 2.5. Czochralski yöntemi ile kristal büyütme.....	21
Sekil 2.6 Silindirik kap teknikleri.....	23
Sekil 2.7. Yüzen bölge konfigürasyon teknikleri.....	24
Sekil 2.8. Yüzen bölge konfigürasyon ısıtma metotları .....	25
Sekil 3.1. Yüzen bölge konfigürasyonunda eksensel simetrik akışkan kolonunun koordinat sistemi.....	27
Sekil 4.1. Yüzen bölge konfigürasyonun deney düzenegi.....	39
Sekil 4.2. Yüzen bölge konfigürasyonun deney bölgesi.....	42
Sekil 5.1. Kritik sıcaklık farkın akışkanın boyutsal oranına (Ar) göre değişimi....	48
Sekil 5.2. Sıcaklıkların akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi.....	49
Sekil 5.3. Akışkanın kararlı haldeki yüzey gerilim hareketinin görünüsü.....	49
Sekil 5.4. Akışkanın osilasyonlu akış hareketinin görünüsü.....	51
Sekil 5.5. Ortam sıcaklığı 23°C olduğu durumda farklı boyutsal oranlardaki kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi....	54
Sekil 5.6. Ortam sıcaklığı 10°C olduğu durumda farklı boyutsal oranlardaki kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi....	54
Sekil 5.7. Ortam sıcaklığı 23°C olduğu durumda farklı boyutsal oranlardaki kritik Marangoni sayılarının ve Prandtl sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi .....	55

Sekil 5.8. Ortam sıcaklığı $10^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda farklı boyutsal oranlardaki kritik Marangoni sayılarının ve Prandtl sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi.....	56
Sekil 5.9. Ortam sıcaklıkları $23^{\circ}\text{C}$ ve $10^{\circ}\text{C}$ için farklı boyutsal oranlardaki kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi....	57
Sekil 5.10. Ortam sıcaklıkları $23^{\circ}\text{C}$ ve $10^{\circ}\text{C}$ için farklı boyutsal oranlardaki kritik Marangoni sayılarının ve Prandtl sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi.....	57
Sekil 5.11. Farklı ortam sıcaklıklarında kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi.....	58
Sekil 5.12. Farklı ortam sıcaklıklarında kritik Marangoni sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi.....	59
Sekil 5.13. Ortam sıcaklığı $23^{\circ}\text{C}$ de akışkanın boyutsuz sıcaklıklarının boyutsuz uzaklığına göre değişimi.....	60
Sekil 5.14. Akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının kritik sıcaklık farklarının farklı ortam ve farklı soğuk duvar sıcaklıklarına göre değişimi.....	63
Sekil 5.15. Akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının kritik Marangoni sayılarının farklı ortam ve farklı soğuk duvar sıcaklıklarına göre değişimi.....	63

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

Tablo 1. Bazı akiskanların 20°C sıcaklıkta yüzey gerilimleri ve dinamik viskozite değerleri.....	11
Tablo 2. 5 cSt viskoziteye sahip silikon yağının 25°C deki fiziksel özellikleri.....	41

## 1. GIRIS

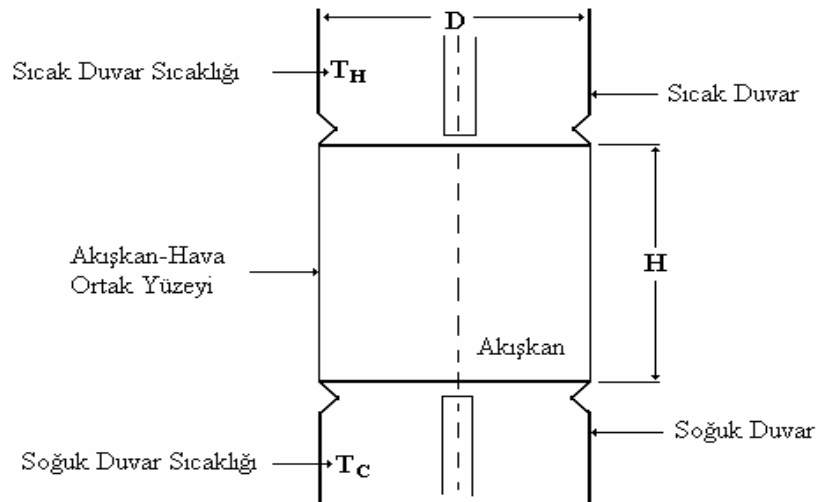
Son yıllarda yarı iletken malzemelerin temeli olan kristallerin kalitesinin artırılması için bir çok ileri teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır. Bu tekniklerden birisi; yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu tekniği, diğeri ise; açık kap (open-boat) tekniğidir. Deneysel çalışmalarımızda bu tekniklerden yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonunda yarım bölge yüzen sistem konfigürasyonu (half-zone) kullanılacaktır. Yüzen bölge konfigürasyonunun deney bölgesi Şekil 1.1'de görülmektedir. Yüzen bölge konfigürasyonunda silindirik iki bakır çubuk arasına yerleştirilen akışkanın yüzey gerilim hareketinin değişmesine sebep olan farklı parametrelerin etkileri incelenmiştir. Bu parametrelerden birincisi; silindirik çubukların arasında asili konumdaki silindirik akışkanın dikey uzunluğu, ikincisi farklı soğuk duvar sıcaklıkları; üçüncüsü ise deneyin yapıldığı farklı ortam sıcaklıklarıdır.

Bu farklı parametreler altında silindirik konumdaki deney akışkanı, sıcaklık farkından dolayı yüzey geriliminin etkisi ile başlangıçta meydana gelen rejim hali akış (steady state) durumundan periyodik osilasyonlu akış (oscillatory state) durumuna geçecektir. Bu çalışmada yüzey gerilimli (termokapileri) konveksiyon yüzünden yüzen bölge konfigürasyonunun (floating-zone) yarım bölge yüzen sistem konfigürasyonunda (half-zone) rejim hali ve osilasyonlu durumdaki sıcaklık dağılımları ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Bir ortamda yada ortamlar arasında sıcaklık farkı mevcut ise burada ısı geçişi olacaktır. Isı geçişi kati yada durgun akışkan ortamında bir sıcaklık gradyanı mevcut ise bu ortamlardaki ısı geçişini tanımlamak için iletim (kondüksiyon) terimi kullanılır. Bir yüzey ve hareketli bir akışkan arasında sıcaklık gradyanı söz konusu ise bu iki ortam arasındaki ısı geçişini tanımlamak için taşınım (konveksiyon) terimi kullanılır. Sonlu sıcaklıktaki bütün yüzeyler elektromanyetik formda enerji yayarlar. Bu sebepten dolayı farklı sıcaklıklarda bulunan, aralarında engelleyici bir ortam olmadan gören iki yüzey arasında ısı geçişi ışıma (radyasyon) terimi ile açıklanır. Bizim yapmış olduğumuz deneysel çalışmada ise akışkana sıcaklık farkı uygulanacak

olursa akışkan tarafından ısı geçişi yüzey gerilim konveksiyon (termokapilari konveksiyon) terimi ile açıklanır.

Akışkandaki yüzey gerilim akış hareketi sıcaklığın fonksiyonudur. Akışkan-hava ortak yüzeyi üzerindeki sıcaklık gradyanı viskozite gradyanını oluşturur. Bu viskozite gradyanı yüzey gerilim gradyanını meydana getirir. Teorik, analitik ve deneysel çalışmalarda, yüzey gerilimli akış olarak adlandırılan bu önemli hareket, özellikle akışkanın sıcaklık farkının bir taraftan diğer tarafa doğru artırılması ile meydana geldiği görülmüştür. Akışkanın fiziksel özelliklerinden biri olan viskozite, sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklık arttıkça viskozite değeri azalmaktadır. Böylece akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca gerçekleşen sıcaklık gradyanı bölgesel olarak değişeceğinden, akışkanın viskozite gradyanının da bölgesel olarak değişmesine neden olacaktır. Akışkanın viskozite gradyanının bölgesel olarak değişmesi ile akışkanın yüzey gerilim kuvveti de bölgesel olarak değişecektir. Bölgesel olarak değişen yüzey gerilim kuvveti sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru çekilmiş olacaktır. Akışkanda sıcaklık farkı var olduğu sürece, akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca gerçekleşen akış hareketi ortak yüzeyi tamamladıktan sonra hacimsel akış türüne geçerek akışkanın sürekliliği sağlanmış olacaktır.



**Sekil 1.1.** Yüzen bölge konfigürasyonunun deney bölgesi

Akiskanda yüzey geriliminden meydana gelen akis hareketleri 19. yüzyılda Marangoni ve arkadaslari tarafından açıklanmasına ragmen, 60'li yıllarda Scriven ve Sterling (1960) daha önce yapılan yüzey gerilimi ile ilgili tüm çalismalari bir araya getirerek önemli noktalarini belirtmislerdir. Levich (1962), Levich ve Krylov (1969) ise yüzey gerilim hareketleri için tüm teorik bilgileri tartisip özetlemislerdir.

Yüzey gerilimli akis hareketinin yeryüzü sartlarinda kristal büyütme sistemlerinde isi ve kütle transferi için ihmal edilebilir bir yüzey etkisi oldugu düşünülüyordu. Schwabe (1981), Schwabe ve Scharmann (1981) yüzen bölge konfigürasyonu, açık kap ve Czochralski gibi bazi kristal büyütme teknikleri için yüzey gerilimli akis hareketinin önemli oldugunu ve ihmal edilemeyecegini belirtmislerdir.

70'li yıllardan sonra yüzey gerilimli konveksiyonun etkilerine daha çok önem vermeye baslanmistir. Pimputkar ve Ostrach (1981) eriyikten kristal büyütme isleminde yüzey gerilimli konveksiyonun etkileri üzerinde çalisirken, Shwabe (1981) kristal büyütme sistemlerindeki yüzey gerilimli akis hareketi ile baglantili olan önceki tüm çalismalari arastirmis ve özetlemistir.

Genel olarak, yeryüzü sartlarinda yüzey gerilimli konveksiyonun etkileri üzerine yapılan çalismalar, yerçekimi ivmesinin etkisini en aza indirmek için deney düzeneginin mümkün oldugunca küçük tutulmasini gerektirir. Yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu ile ilgili birçok teori ve deneysel çalismalar yapilmistir. Chang, ve Wilcox (1975-1976), Chang v.d.(1979), Clark ve Wilcox (1980) Prandtl sayisi küçük olan akiskanlar için yüzen bölge konfigürasyonu ile ilgili problemleri analitik olarak arastirmislardir. Bu arastirmacilar çalismalarini küçük Marangoni sayilari ile sinirlendirmis olmalarina ragmen, yeryüzü sartlarinda yüzen bölge konfigürasyonu deney düzeneginde yüzey gerilimli konveksiyonun önemini vurgulamislardir. Bu arastirmacilar silikon eriyiginin fiziksel özellikleri ve Prandtl sayilarina ilaveten akiskanin boyut olarak etkili olan geometrik özelligi açısından tartisip akis hareketinin izlerini gözlemlemislerdir.



Chun ve Wuest (1978), Schwabe v.d. (1978), yüzen bölge konfigürasyonunda güçlü bir yüzey gerilim konveksiyonuna rastladılar. Bu araştırmacılar yüzen bölge konfigürasyonunu kullanarak, yarım bölge yüzen sistem konfigürasyon (half-zone) tekniginde ve tam bölge yüzen sistem konfigürasyon (full-zone) tekniginde akışkanın sıcaklık ve hız alanlarını araştırmışlardır.

Fu (1982) yüzen bölge konfigürasyonunda yüzey gerilimli konveksiyon ile ilgili sayısal çözümleme çalışmasında hem Marangoni hem de Prandtl sayılarının etkilerini incelemiştir.

Ostrach (1979) tarafından rejim hali yüzey gerilimli konveksiyon için analitik bir analiz yaparak hem viskoz hem de sıcaklık gradyanları için kompleks yüzey gerilimli akış alanlarını tanımlayan önemli boyutsuz parametreler önermiştir. Schwabe (1978), Chun ve Wuest (1979), Schwabe (1979), Schwabe ve Scharmann (1979), Chun (1980) tarafından yeryüzü şartlarında yüzey gerilimli konveksiyonda rejim hali konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu konveksiyon hareketine geçiş göstermesi ile ilgili çalışmalar ilk kez yapılmıştır.

Yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu düşük yerçekimi ivmesine sahip ortamlarda yüksek kaliteli kristal üretimi için uygun bir metot olmasına rağmen osilasyon hareketinin kaliteli kristal üretimi etkilediği ve kristalin kalitesini düşürdüğü belirlenmiştir. Preisser v.d.(1983), Schwabe v.d. (1990) çalışmalarında yüzey gerilimli konveksiyonu rejim hali konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu konveksiyon hareketine geçiş noktalarını inceleyerek temel parametre olarak Marangoni sayısını ( $Ma$ ) kullanmışlardır. Belirli bir Prandtl sayısına sahip akışkanlar, belirli boyutsal oranlarda kullanıldığında periyodik osilasyon hareketinin başladığı bir kritik Marangoni sayısının ( $Ma_{kr}$ ) olduğunu göstermişler ve yüksek Prandtl sayısına ( $Pr$ ) sahip akışkanlar için bu kritik Marangoni sayısının ( $Ma_{kr}$ )  $10^4$  mertebesinde olduğunu tespit etmişlerdir.

Napolitano v.d. (1986) düşük yerçekimi ivmesinin olduğu uzay laboratuvarında yarım bölge yüzen sistemi (half-zone konfigürasyonu) kullanarak yaptıkları bir deneyde Marangoni sayısını ( $Ma$ )  $4 \times 10^5$  değerinde olmasına rağmen osilasyona

rastlamamislardir. Monti ve Fortezza (1991) düşük yerçekimi ivmesinin olduğu uzay laboratuvarında yarım bölge yüzen sistem konfigürasyonunda silikon yağı için Marangoni sayısını ( $Ma_{kr}$ )  $3 \times 10^5$  mertebesinde elde etmelerine rağmen osilasyona rastlamamislardir.

Kamotani ve Lee (1986) yüzen bölge konfigürasyonunda yaptıkları deneylerde 2 cSt viskoziteye sahip silikon yağı kullanmışlardır. Bu araştırmacılar doğal konveksiyonun etkisini minimize etmek için, akışkan kolonunun boyutunu oldukça küçük seçmişlerdir. Çalışmalarında akışkanın rejim hali yüzey gerilim konveksiyon durumunda sıcaklık ve akış alanlarını hem deneysel hem de teorik olarak incelemişlerdir. Akışkanın farklı boyutsal oranlarda rejim hali yüzey gerilim konveksiyon hareketinden osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçiş noktalarındaki kritik sıcaklık farkları belirleyip, kritik Marangoni sayısını tespit etmişlerdir.

Chun (1980) yüzen bölge konfigürasyonunda yapmış olduğu deneysel çalışmada deney akışkanı olarak Octadecane ( $C_{18}H_{38}$ ) kullanarak, akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca sıcaklık değerlerini ölçmüştür. Akışkan-hava ortak yüzeyindeki sıcaklık gradyanının, kararlı yüzey gerilim konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçişinde sıcaklık gradyanının önemli bir parametre olduğunu belirlemiştir. Bu araştırmacı yüzey gerilimli konveksiyon hareketinde, osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketinin boyutsal orana bağlı olarak simetrik ve simetrik olmayan osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketinin olduğunu açıklamıştır.

Hu v.d. (1994) akışkan kolonunun boyutsal oranına bağlı olan hacim etkisinin, osilasyonlu konveksiyon hareketinin başlangıç noktasına duyarlı olduğunu tespit etmişlerdir. Farklı boyutsal oranlar için yüzey gerilimli konveksiyonda osilasyon olayının başlangıç noktasını belirlemişlerdir. Schwabe (1979), Schwabe ve Scharmann (1979) akışkan kolonunda akışkanın farklı yükseklik boyutları için kritik Marangoni sayısını belirlenmesinde etkili olduğunu açıklamışlardır. Masud v.d.

(1997), Hirata (1997) yaptıkları çalışmalarda akışkan kolonunun geometrik etkisini sınıflandırmışlardır.

Monti v.d. (2000) deney akışkanı olarak 2 cSt silikon yağı kullanarak yeryüzü şartlarında yüzen bölge konfigürasyonunda osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyon hareketinin başlangıç noktası üzerine farklı boyutsal oraların geometrik etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarını sayısal çalışmalar ile desteklemişlerdir.

Serbest yüzeyden ısı kaybının yüzey gerilimli konveksiyon hareketi üzerine etkileri üzerine ilk çalışma Pearson (1958) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacı çalışmasında rejim hali akış hareketi (sability) teorisini kullanarak, akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybını Biot sayısı (Bi) ile açıklamış ve Bi sayısı arttıkça ısı kaybının artacağını göstermiştir. Ayrıca Kuhlmann ve Rath (1993) akışkan kolonunda iki boyutlu yüzey gerilimli konveksiyon akış hareketinde osilasyonun başlangıç noktasına ısı kaybının etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında Prandtl sayısı yüksek olan akışkanlar için akışkanın kritik Marangoni sayısı yanında, temel parametre olarak konveksiyonla ısı transferinin konduksiyonla ısı transferine oranı olarak bilinen Biot sayısını alıp, akışkanın kararsız osilasyon hareketini rejim hali akış hareketinde incelemişlerdir.

Kuhlmann v.d.(2002) çalışmalarında Prandtl sayısı farklı olan akışkanlar kullanarak, akışkan kolonlarında üç boyutlu akışın başlangıç noktası üzerine akışkanın hacim etkisini araştırmışlardır. Bu araştırmacılar akışkanın rejim hali durumu için sonlu elemanlar metodu kullanarak analizler yapmışlardır. Araştırmalarında yüzen bölge konfigürasyonunda akışkan kolonundaki akışkan alttan ısıtma yapıldığında, akışkanın yüzme etkisine (bouyancy) kararsız akış hareketinden (destability) dolayı küçük bir katkı sağladığını; bunun yanında akışkan kolonundaki akışkan üstten ısıtma yapıldığında güçlü bir rejim hali akış hareketi (stability) olduğunu açıklamışlardır.

Schwabe v.d. (1978) yeryüzü sartlarında (yerçekimi ivmesinin 1g olduğu durumda) yüzen bölge konfigürasyonunda yüzey gerilim hareketi yapan akışkan üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırmacılar deney akışkanı olarak  $\text{NaNO}_3$  kullanmışlardır. Akışkana sıcaklık farklı uygulandığında güçlü bir yüzey gerilimli konveksiyon hareketi olduğunu belirlemişlerdir. Akışkan ile temas halinde bulunan sıcak duvarın yüzey sıcaklığı ile soğuk duvarın yüzey sıcaklığı arasındaki fark belirli bir değeri geçtikten sonra, akışkanın rejim hali akış türünden periyodik osilasyonlu akış türüne geçtiğini gözlemişlerdir. Akışkanın rejim hali akış türünden periyodik osilasyonlu akış türüne tam olarak geçtiği noktadaki sıcaklık farkı ise kritik sıcaklık farkı ( $T_{kr}$ ) olarak tanımlamışlardır.

Metallerden kristal büyütme işlemlerinde Prandtl sayısı oldukça küçüktür. Rupp v.d. (1989), Wanschraner v.d. (1995), Otaka v.d. (2001) düşük Prandtl sayısına sahip akışkanların eksensel simetrik yüzey gerilim konveksiyon hareketini osilasyonun başlangıç noktasındaki rejim hali konveksiyon hareketini incelemişlerdir. Yüzey gerilimli konveksiyon hareketinde akışkanın akış karakterini belirlenmesinde Reynolds sayısını kullanmışlardır.

Kamotani v.d. (1978) yüzen bölge konfigürasyonunda yüksek Prandtl sayısına sahip akışkan kullanılarak rejim hali ve osilasyonlu akış hareketini boyut analizi kullanarak teorik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında karali yüzey gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçişte akışkan-hava ortak yüzey deformasyonunun önemli bir etken olduğu kararına varmışlardır.

Kamotani (1984), Ostrach v.d. (1985), Kamotani ve Ostrach (1998) tarafından çeşitli sargılar altında yarım bölge yüzen sistem konfigürasyonu kullanılarak osilasyon olayını deneysel olarak araştırmışlardır. Bu araştırmacılar osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyon hareketinin akış karakterini akışkanın serbest yüzey deformasyon parametresi ile belirlemişlerdir.

Chun ve West (1978), yeryüzü sartlarında (1g) kristal büyütme işlemlerinde yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu kullanılarak elde edilen kritik sıcaklık farkı

değerlerini ( $T_{kr}$ ), akışkanın akış türünün rejim hali konveksiyon durumundan periyodik osilasyonlu konveksiyon durumuna geçişini hem deneysel hem de teorik olarak incelemişlerdir.

Kamotani v.d. (1984) yüzen bölge konfigürasyonunda Hexadecane ve Fluorinert FC-43 gibi akışkanları kullanarak, akışkanların değişik çapları için rejim hali yüzey gerilim hareketinden osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçiş noktalarını araştırmışlardır. Bu araştırmacılar akışkandaki sınır tabaka kalınlığının osilasyonlu akış hareketine geçişte önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir.

Chun (1986) yapmış olduğu çalışmada Octadecane ( $C_{18}H_{38}$ ) kullanarak yüzen bölge konfigürasyonundaki akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca sıcaklık değerlerini ölçmüştür. Akışkan-hava ortak yüzeyindeki sıcaklık gradyanının rejim hali yüzey gerilim hareketinden osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçişinde, sıcaklık gradyanının önemli bir parametre olduğu sonucuna varmıştır. Bu araştırmacının yapmış olduğu çalışmalardan hareketle çalışmalarımızı bu yönde yoğunlaştırmış bulunmaktayız.

Kamotani v.d.(2001) yüzen bölge konfigürasyonunda yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanları (kinematik viskozitesi 2 cSt ve 5 cSt silikon yağı) kullanarak, silindirik konumdaki silikon yağının akışkan-hava ortak yüzeyinden ortama olan ısı kaybı üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda, ortam sıcaklığının etkilerini normal şartların üzerinde olduğu durumlar için araştırmışlardır. Yine Kamotani v.d. (2001) aynı konfigürasyonun simülasyonunu yaparak, akışkanın serbest yüzeyinden ortama konveksiyon ve kondüksiyon yolu ile olan ısı kaybını nümerik olarak incelemişlerdir.

Kamotani v.d. (2003) çalışmalarında ise, Marangoni konveksiyonda, kritik Marangoni sayısı ( $Ma_{kr}$ ) üzerine etki eden faktörleri yoğun bir şekilde incelemeye başlamışlardır. Bu araştırmacılar yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanlar (kinematik viskozitesi 2 cSt ve 5cSt silikon yağı) için yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonunu kullanarak, silindirik konumdaki akışkanın serbest yüzeyinden

ortama olan isi kaybi üzerine deneysel çalışmalar yapmislardir. Yapılan deneysel çalışmalarda, ortam sıcaklığının normal şartlardakinden yüksek olduğu sıcaklık değerleri için isi kaybının etkilerini araştırmislardir.

Bu çalışmada Prandtl sayısı  $Pr=72$  olan 5 cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı kullanılarak, yüzey gerilimli konveksiyon yüzünden yüzer bölgede olusan rejim hali ve osilasyonu durumdaki sıcaklık dağilimi ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Çalışmalarımızda, yarım bölge yüzen sistem konfigürasyon tekniği ve akiskana etkiyen doğal konveksiyonu minimize etmek için akiskanin üstten isitildiği metot kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda akiskanin asıldığı bakır duvarların çapı 3 mm olarak seçilmiştir ve akiskanin serbest yüzeyinin daima düz olması sağlanmıştır.

Akiskanin farklı boyutsal oranlarında ( $Ar = 0,5; 0,7; 0,9$ ), farklı soğuk duvar sıcaklıklarında ( $T_C = 10 \text{ }^\circ\text{C}, \dots, 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ve farklı ortam sıcaklıklarında ( $T_R = 10 \text{ }^\circ\text{C}, 16 \text{ }^\circ\text{C}, 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) akiskana sıcaklık farklıları uygulanarak rejim hali yüzey gerilim konveksiyon akis hareketinden osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketine geçiste, akiskanin serbest yüzeyinden ortama olan isi kaybının yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketine etkileri araştırılmıştır ve  $Ar=0,5$  boyutsal oranı için serbest yüzey sıcaklık dağilimleri gösterilmiştir.

## 2. AKISKANLAR MEKANIGINDE YÜZEY GERILIMIN TANIMLANMASI

### 2.1. Yüzey Gerilimi

Yüzey gerilim hareketinin daha iyi anlaşılması için deneysel, teorik ve nümerik bir çok çalışma yapılmıştır. Bu yüzden yüzey geriliminin daha iyi anlaşılabilmesi için kısaca açıklanması yararlı olacaktır. Akiskandaki yüzey hareketleri, akiskan yüzeyinde bulunan akiskan molekülleri üzerine etki eden ve denge halinde olmayan kuvvetlere bağlıdır. Akiskan bünyesinde yer alan moleküller, birbirine esit şekilde çekme kuvveti uygulayan moleküllerle çevrelenmiştir. Akiskanların moleküler düzeyde önemli özelliklerinden birisi iç çekim kuvveti (kohezyon), diğeri ise dış çekim kuvveti (adezyon) dir. Akiskanın molekülleri arasındaki çekme kuvvetine iç çekim kuvveti denir. İç çekim kuvvetinden dolayı akiskanlar çekme gerilmesi sahip olurlar. Bir akiskanla bir kati cismin molekülleri arasındaki çekim kuvvetine ise dış çekim kuvveti denir. Akiskan yüzeyinde bulunan moleküller, akiskanın iç çekim kuvvetine karsi oluşacak net bir kuvvete bagimli olarak hareket ederler. Yüzey boyunca oluşan, birim uzunluguna bagli olan ve denge halinde olmayan moleküller arası çekim kuvveti yüzey gerilimi olarak ifade edilir ve  $\sigma$  sembolü ile gösterilir.

Yüzey geriliminden dolayı akiskan yüzeydeki moleküllerin enerjisi akiskanın içindeki enerjiden daha yüksektir. Yüzey gerilim hareketi akiskanın yüzeyindeki enerjinin diğeri bölgelere oranla daha yüksek olmasından meydana gelmektedir.

Yüzey gerilimi bir akiskanın yüzeyinin gerilmiş elastik bir deri gibi davranmasını sağlar. Akiskanlar doğal olarak yüzey alanlarını minimize etme eğilimindedir. Bu nedenle bir sivi akiskan damlası yüzey alanını küçülterek küresel bir şekil almaya çalışır.

Tablo 1’de bazı akiskanların 1 atmosfer basınç altında, 20 °C sıcaklıkta yüzey gerilimleri ve dinamik viskozitelerinin alabileceği değerler verilmiştir. Tabloda belirtilen değerlerin üzerindeki sıcaklıklarda akiskanın yüzey gerilim ve dinamik viskozite değerleri azalırken, bu sıcaklığın altındaki değerlerde ise artmaktadır.

**Tablo 1.** Bazı akışkanların 20 °C sıcaklıkta yüzey gerilimleri ve dinamik viskozite değerleri (Vargaftik v.d.1993)

Akışkan	Yüzey gerilimi $\sigma$ , (N/m)	Dinamik viskozite $\mu$ , (N.s/m <sup>2</sup> )
Ether	17,0x10 <sup>-3</sup>	0,243x10 <sup>-3</sup>
Silicon oil	18,7x10 <sup>-3</sup>	4,88x10 <sup>-3</sup>
Isooctanen	18,77x10 <sup>-3</sup>	0,546x10 <sup>-3</sup>
n-Heptane	20,6x10 <sup>-3</sup>	0,4143x10 <sup>-3</sup>
n-Octane	21,76x10 <sup>-3</sup>	0,546x10 <sup>-3</sup>
Gazoline	22,6x10 <sup>-3</sup>	0,529x10 <sup>-3</sup>
Methanol	22,6x10 <sup>-3</sup>	0,581x10 <sup>-3</sup>
Ethanol	22,8x10 <sup>-3</sup>	0,7 8x10 <sup>-3</sup>
n-Decane	23,89x10 <sup>-3</sup>	0,907x10 <sup>-3</sup>
n-Undecane	24,78x10 <sup>-3</sup>	1,181x10 <sup>-3</sup>
n-Dodecane	25,48x10 <sup>-3</sup>	1,498x10 <sup>-3</sup>
n-Thridecane	26,13x10 <sup>-3</sup>	1,878x10 <sup>-3</sup>
n-Tetradecane	26,69x10 <sup>-3</sup>	2,322x10 <sup>-3</sup>
Kerosene	26,8x10 <sup>-3</sup>	1,45x10 <sup>-3</sup>
n-Hexadecane	27,64x10 <sup>-3</sup>	3,451x10 <sup>-3</sup>
n-Xylene	28,31x10 <sup>-3</sup>	0,64x10 <sup>-3</sup>
Su	72,75x10 <sup>-3</sup>	0,797x10 <sup>-3</sup>
Civa	465x10 <sup>-3</sup>	1,556x10 <sup>-3</sup>

Akışkanın kaymaya karşı gösterdiği direnç viskozite olup, sıcaklığın doğrudan fonksiyonudur. Yüzey gerilimi ise viskoziteye bağlı olarak değişir. Yüzey gerilimi akışkanın fiziksel özelliklerine bağlı bir değişkendir. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi yüzen bölge konfigürasyonunda ortam sıcaklığının  $T_R=23$  °C olduğu durumda akışkanın alttaki soğuk duvarının sıcaklığı sabit tutulup, üstteki sıcak duvarının sıcaklığı artırılacak olursa akışkanda bir sıcaklık farkı meydana gelecektir. Akışkandaki sıcaklık farkından dolayı, akışkanın sıcak bölgesinden soğuk bölgesine doğru akış hareketi gerçekleşir. Bu hareket akışkanın sıcak bölgesinde viskozite



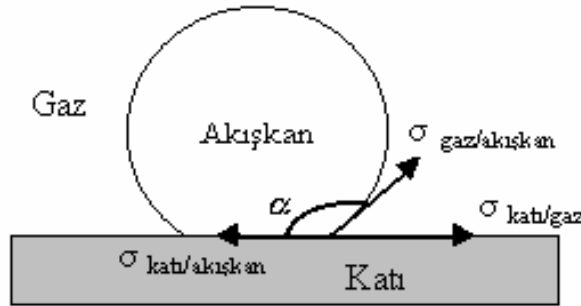
degeri azalması sebebiyle soguk bölgedeki viskozite tarafından çekilmesi ile gerçekleşir. Akışkandaki akış hareketi aşağıdaki etkenlere bağlıdır (Munson, 1994). Bunlar sırasıyla;

1. Temas açıları,
2. Yüzey gerilim kuvvetleri sebebi ile oluşan basınç kuvvetleri,
3. Yüzey gerilim gradyanları sebebiyle oluşan kesme kuvvetleri,
4. Akışkan yüzeyinde kimyasal ve manyetik etkiler,

dir.

### 2.1.1. Temas Açıları

Akışkanların temas açıları yüzeylerin kesiştiği noktada, ortak yüzeylere etkiyen yüzey gerilme kuvvetleri yardımıyla tanımlanır.



**Sekil 2.1.** Yüzey geriliminde temas açısı

Sekil 2.1'de gibi akışkanın ortak yüzeyine etkiyen yüzey gerilme kuvvetleri görülüyor.  $\alpha$  temas açısı olarak adlandırılır ve akışkanın kati yüzeyi ıslatma özelliğinin bir ölçüsüdür. Mükemmel bir ıslatma için temas açısının  $\alpha = 0^\circ$  olması gerekir. Bu durumda akışkan kati yüzey üzerine ince bir film halinde yayılır.  $\alpha < 90^\circ$  ise akışkanın kati yüzeyi ıslattığı,  $\alpha > 90^\circ$  ise ıslatmadığı söylenebilir. Akışkan

damlacigi üzerine etki eden yer çekim kuvveti damlayı kati yüzeyine çeker. Temas açısı ( $\alpha$ ) akiskan ve kati yüzeyin bir fonksiyonudur.

Akiskanin ortak yüzeyindeki temas açilari genellikle Young denklemi ile belirlenir. Young denklemi;

$$S_{\text{kati/gaz}} = S_{\text{kati/akiskan}} + S_{\text{gaz/akiskan}} \cos(\alpha)$$

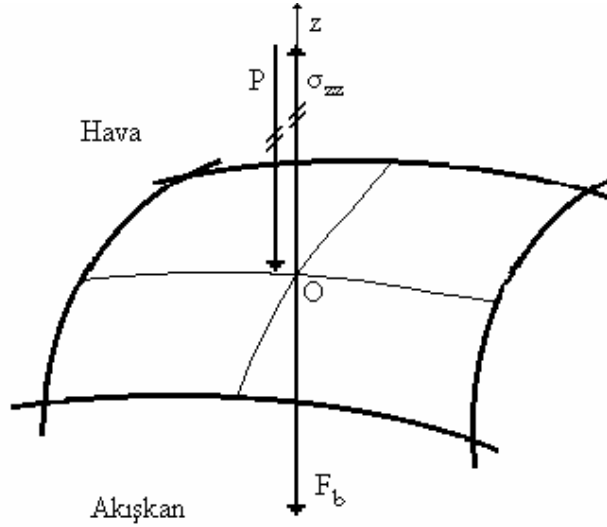
olarak yazilabilir. Denklem gaz, akiskan ve kati ortak yüzeylerindeki yüzey gerilimlerinin dengesinin saglamasi için kullanilir. Young denklemi uygulamadan ziyade daha çok teorik olarak kullanılan bir denklemdir. Yapilan çalismalar sirasinda temas açilari önceden bilinmiyor ise, ölçüm yapilarak belirlenir.

### 2.1.2. Yüzey Gerilim Kuvvetleri Sebebi ile Olusan Basinç Kuvvetleri

Sekil 2.2'de görüldüğü gibi durgun (statik) akiskanda, akiskan-hava ortak yüzeyindeki akiskan moleküllerine yüzey gerilim kuvvetleri ve basınç kuvvetleri etkili olmaktadır. Yüzey gerilim kuvveti nedeni ile akiskanin yüzeyi gerilmis bir zar görüntüsünde olacaktır. Akiskan serbest yüzeyine etkiyen yüzey gerilim kuvvetinin z dogrultusundaki genel ifadesi;

$$s_{zz} = -P - \frac{2}{3}\mu \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} + 2 \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

olarak yazilabilir. Burada;  $s_{zz}$  akiskanin yüzey gerilimi, P akiskanin yüzeyine etkiyen basınç V akiskanin yüzey akis hizi ve  $\mu$  akiskanin dinamik viskozitesidir. Akiskanda viskoz kuvvetlerin etkisi ihmal edilirse basınç kuvveti sadece yüzey gerilme kuvvetinin etkisinde kalacaktır. Akiskanda yüzey gerilme kuvveti varsa yer çekim kuvveti (badi kuvveti) vardir. Durgun (statik) bir akiskanin z dogrultundaki yüzey gerilme kuvveti basınç kuvvetine  $s_{zz} = -P$  esittir. Akiskan yüzeyinde bir noktada akiskana sadece basınç etkir (Yamamoto v.d. 1997).



**Sekil 2.2.** Akışkanın yüzey geriliminin görünüşü

### 2.1.3. Yüzey Gerilim Gradyenleri Sebebi Ile Olusan Kesme Kuvvetleri

Akışkanın yüzey gerilmelerinin değişmesi halinde serbest yüzeyi boyunca akışkan hareket etmek zorunda kalır. Sıcaklık etkisiyle akışkanın fiziksel özelliklerinden olan viskozitesinin değişmesi halinde akışkanı dengede tutan kuvvetler akışkanın durgun kalmamasına sebep olur. Akışkan-hava ortak yüzey üzerinde birim alana etkiyen kuvvetler olduğu düşünülür. Bu kuvvetler ortak yüzeydeki akışkan içerisinde viskoz kuvvetler üreterek, akışkanın hızla yüksek yüzey gerilimine sahip yöne doğru hareket etmek zorunda olduğu görülür. Bir ortak yüzey boyunca yüzey gerilimi kuvvetlerinin değişimi, sınırlanan akışkan-hava ortak 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. Bu kuvvetlerin dengesi;

$$\tau_s = t_A + t_B = \mu \frac{\partial v_A}{\partial n_A} + \mu \frac{\partial v_B}{\partial n_B}$$

olarak ifade edilir.  $t_A$  ve  $t_B$  akışkanın serbest yüzeyi üzerinde lineer doğrultudaki kesme kuvvetleri,  $\tau_s$  akışkanın normal doğrultudaki yüzey gerilim kuvvetidir. Eğer

akiskana sıcaklık farkı uygulanacak olursa; sıcaklığı artan akiskan moleküllerinin çapı artarken akiskanın hız değişimi azalacaktır. Akiskanın hız değişiminin azalması ile viskozitede azalacak dolayısıyla akiskanın kayma gerilmeleri de azalacaktır. Böylece kayma gerilmesinin azalması yüzey gerilmesinin azalmasına sebep olacaktır. Akiskanda hız gradyeni viskozite gradyenini bir anda esleyemediği için yüzey gerilimli akis hareketinin oluşmasına neden olacaktır.

#### **2.1.4. Akiskan Yüzeyinde Kimyasal ve Manyetik Etkiler**

Manyetik alana duyarlı akiskanlarda elektriksel yükler akiskanların yüzey gerilimlerinin etkilenmesine neden olurlar. Akiskana manyetik bir etkinin olabilmesi için, akiskan mutlaka manyetik alana duyarlı olmalıdır. Akiskana manyetik alan uygulandığında, elektriksel yükler manyetik kuvvetlerin etkisinden dolayı yüzey gerilmelerin oluşturduğu alanlarda toplanırlar.

Yukarıdaki belirtilen açıklamalar akiskanda yüzey geriliminin akis hareketinin oluşmasına sebep olan faktörlerdir. Akiskanlar mekanikteki hareket ve enerji denklemleri kullanılarak akis hareketinin şekli ve akis hareketinin türü tanımlanabilir. Akiskan üzerindeki temas açıları yüzey geriliminin şeklini ve yüzey alanını; ortak yüzeylerdeki kesme kuvvetlerinin farklarını oluşturması halinde dengede olan gerilim değerleri ile birlikte sıcaklığın etkisi ve akiskanın fiziksel özelliklerinden viskozite gradyeni, akiskan hareketinin oluşmasına neden olmaktadır.

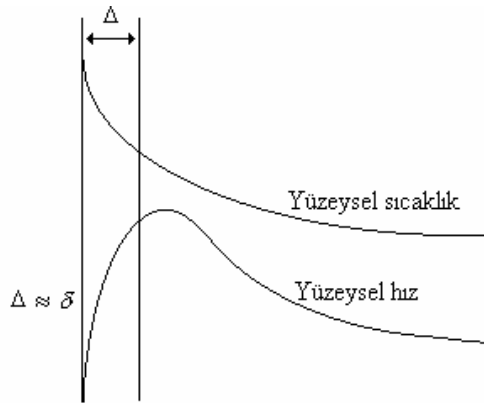
#### **2.2. Yüzey Gerilimli Konveksiyon Akisi**

Yüzen bölge konfigürasyonunda akiskanın şekil faktörü statik Bond sayısı ile belirlenir. Statik Bond sayısında etkili olan parametre yer çekimi ivmesidir. Yer çekim ivmesine bağlı olarak akiskanın serbest yüzeyinin düz olması değişir. Yer çekim ivmesi sıfır ise akiskanın serbest yüzeyi düzdür. Her ne kadar yer yüzü şartlarında akiskan yüzeyi düz kabul edilse de, yerçekiminden dolayı akiskanın alt duvar yüzeyinde çok küçük bir yığılmanın olduğu gözlenir. Statik Bond sayısı yer

çekimi kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine oranı olarak tanımlanır ve statik Bond sayısı  $Bo = \frac{\rho g R H}{\sigma}$  şeklinde ifade edilir.

Yüzey gerilimli akış hareketinde Weber sayısı akışkanın yüzey geriliminin bir fonksiyonudur. Akışkanın sıcaklığı arttıkça sıcaklık gradyanı artacak ve böylece akışkanın yüzey gerilimi ve viskozitesi azalacaktır. Akışkana etkiyen atalet kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetlerine oranı Weber sayısı olarak tanımlanır ve Weber sayısı;  $W = \frac{\rho V^2 H}{\sigma}$  şeklinde ifade edilir. Akışkanın fiziksel özelliklerinden olan sıcaklık arttıkça Weber sayısı da artacaktır. Yani Weber sayısı akışkanın yüzey gerilimini azaltıcı yönde bir etkidir. Bu yüzden Weber sayısı akışkanın yüzey gerilimine bağlı olarak değişecektir. Tanımlanan bu boyutsuz sayıların etkilerinin küçük olmasından dolayı; daha çok akışkandaki yüzey etkileri üzerinde durulur. Burada  $\rho$  akışkanın yoğunluğu,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $\sigma$  yüzey gerilimi,  $V$  akışkanın hareket doğrultüsündeki hızı,  $R$  akışkanın yarıçapı ve  $H$  akışkanın yüksekliğidir.

Akışkanın boyutları azaldıkça yüzey gerilimli akış hareketinin sebep olduğu sıcaklık ve viskozite gradyanları artacak, akışkan hareketine sebep olan diğer kuvvetlerde ise bu gradyanlar azalacaktır. Dolayısıyla mikro seviyedeki boyutlar kullanılarak yüzey gerilim hareketinin diğer kuvvetlere oranla daha etkili olduğu görülecektir. Akışkana sıcaklık farkı uygulanacak olursa akışkanda sınır tabakası oluşacaktır. Şekil 2.3 akışkanın sınır tabakası görülmektedir.



**Şekil 2.3.** Akışkanın sınır tabakası

Akiskanin sıcak duvarına yakın bölgeden akiskanin serbest yüzeyine doğru gerçekleşen ısı akışı serbest yüzey boyunca bir ısı sınır tabaka oluşmasına neden olur. Yüzey gerilimli konveksiyon akışı değeri bu sınır tabakası ile belirlenir. Akiskanin sıcak duvar ile temas halindeki akiskanin serbest yüzeyinin sıcaklık gradyanı en yüksek değerdedir. Akiskanin ısı sınır tabaka kalınlığı ise  $d = ?$  ile verilmektedir. Akiskanin yüzeysel sıcaklığının maksimum olduğu noktada atalet kuvvetleri artarken yüzey gerilim kuvvetleri azalmaktadır; yani akiskanin sıcaklığı momentumla ters orantılı olarak değişmektedir.

Klasik mekanikte kullanılan kuvvet ve enerji terimleri aynı şekilde akiskanlar mekanikinde akışkan yüzeyler içinde kullanılmaktadır. Ancak akiskanlar mekanikinde bu terimler yüzey gerilimi veya yüzey enerjisi kavramları kullanılarak açıklanır. Akiskanin yüzeydeki moleküllerinin enerjisinin, akiskanin içerisindeki moleküllerin enerjisinden fazla olması, yüzey gerilim gradyanları sıcaklık gradyanlarını ortaya çıkarır. Metal levhanın yüzeyine silikon yağı ince bir tabaka halinde sürülüp, levha alttan ısıtılırsa akiskanin soğuk yüzeylere doğru hareket ettiği görülür. Akiskanin bu hareketi ısıtılan bölgede yüzey geriliminin azalmasından dolayı olmaktadır. Akiskanin sıcaklığını artırmak daima yüzey geriliminin azalmasına sebep olacaktır. Bu yüzden akışkan molekülleri soğuk yüzeye doğru çekilirler.

### **2.3.1. Yarı İletken Malzemelerin Yapısı ve Kullanım Alanları**

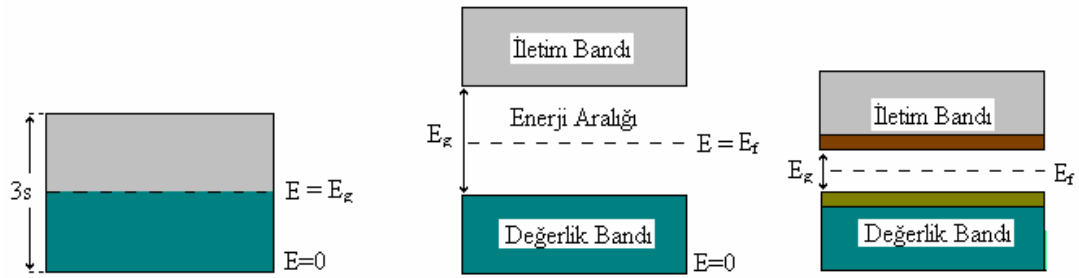
Atomların belirli bir düzen içerisinde bir araya gelmeleri ile ortaya koydukları yerleşim düzenlerindeki üç boyutlu tekrarlarına kristal denir. Kristallerin her birinin farklı elektronik dağılımları vardır. Kristallerdeki elektronik dağılımlar incelenerek, kristalin iletken, yalıtkan ve yarı-iletken olduğu tespit edilebilir. Kristal sisteminin enerji düzeyleri bir takım bantlardan (elektronların yerleştiği orbitaller) oluşmuştur. İletken kristaller yüksek yük taşıyıcı yoğunluğa sahip iken, yalıtkan kristallerin yük taşıyıcı yoğunlukları ise neredeyse sifirdir. 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. İletken kristal olan sodyumun enerji bandı Şekil 2.4.a'da görüldüğü gibidir. Sisteme enerji verilirse (ısı şeklinde) elektronlar dolu olan bantlardan boş olan bantların birisine hareket edebilirler. Yarı-dolu 3s bandındaki elektronlar, boş olan 3p bandına geçmek üzere yeterli enerjiyi sağlayabilirler. Şekilde görüldüğü gibi  $E_F$  Fermi enerjisidir. Fermi enerjisinin altındaki bütün seviyeler dolu iken üstündeki seviyeler boştur. Fermi enerjisi sodyum kristalinde bandın tam ortasında yer alır. 0 K'den daha büyük sıcaklıklarda çok az sayıda elektron Fermi enerjisinin üzerindeki seviyelere ısısal olarak uyarılır. Bu yüzden kristal iletkenlere çok küçük bir elektrik alanı uygulanarak elektronların boş bantları doldurarak kristal içerisinde hareket etmeleri sağlanır.

Yalıtkan kristallerde, 0 K'de değerlik bandı elektronlarla tamamen dolu iken, iletim bandı ise tamamen boştur. Kristalde boş olan iletim bandı ile dolu olan değerlik bandı arasındaki aralığa kristalin enerji aralığı denir ve enerji aralığı  $E_g$  ile gösterilir. Yalıtkan kristalin enerji aralığı Şekil 2.4.b'de görüldüğü gibidir. Yalıtkan kristallerde yasak enerji aralığı büyük ve 10 eV mertebesinde dir. Bu kristallerde Fermi enerjisi, enerji aralığının herhangi bir yerinde bulunabilir. Enerji aralığı çok büyük olduğu için değerlik bandından iletim bandına çok az elektron geçebilir. Çünkü bu kristallerin elektriksel iletkenliğe katkıları çok küçük, öz dirençleri ise büyüktür.

Yarı-iletken kristallerde enerji aralığı 1eV mertebesinde dir. 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 artışı göstermektedir. Şekil 2.4.c'de yarı-iletkenin bant yapısı görülmüyor. Fermi enerjisi bant aralığının ortasında yer almaktadır. Yasak enerji aralığının ( $E_g$ )'nin 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, desik (pozitif yük) olarak adlandırılan dolmamış değerlik (valans) bandı

birakmaktadır. Degerlik elektronu desigi doldurmak üzere hareket etmesi halinde, desik yük tasiyici gibi davranmaktadır. Yari-iletken kristale elektrik alan uygulanirsa yük tasiyicilar birbirlerine zit yönlerde hareket ederler. Periyodik cetvelin IVA grubundaki Elmas (C), Silisyum (Si), Germanyum (Ge), Indiyum (In)... gibi saf yari-iletken kristallere özden yari-iletken kristaller denir. Yari-iletken kristaller asilama yapilarak (safsizlik katilirsa) bant yapilari ve elektriksel özellikleri degistirilebilir. Alici safsizlik ile asilananak elde edilen yari-iletken kristale n-tipi yari iletken, verici safsizlik ile asilananak elde edilen yari-iletkene p-tipi yari iletken kristaller denir.



a. İletken kristal

b. Yalıtkan kristal

c. Yari iletken kristal

**Sekil 2.4.** Kristallerin bant yapilari

Yari-iletken kristaller kullanilarak diyotlar, transistörler ve entegre devreler üretilmektedir. Entegre devrelerin kullanimi, ikinci endüstri devrimini baslatmistir. Bir entegre devre, bir tek silisyum kristali üzerinde iç baglantilarla diyotlar, transistörler, dirençler ve kondansatörün bir araya getirilmis halidir. Entegre devresini olusturan ciplerde yüz binlerce devre elemani bulundurabilmektedir. Bu entegre devreleri bilgisayarlarin, saatlerin, kameralarin, otomobillerin, uçaklarin, robotlarin, uzay araçlarinin, tüm haberlesme sistemlerinin anahtarlama devrelerinin kalbini olusturmaktadır.

Yari iletken kristaller düzgün ve geometrik yapıya sahip malzemelerdir. Dogada saf kusursuz yari iletken malzeme bulmak mümkün degildir. Bu kadar mükemmel kristal yapıya sahip yari iletken malzemeleri üretmek de mümkün degildir. Ancak tüm



arastirmalar ve bilimsel çalismaların temel amaci saf kusursuz iç yapıya sahip yari iletken malzemeler üretmektir (Raymond, 1990).

### **2.3.2. Yari Iletken Malzemelerin Üretimi ve Kristal Büyütme Teknikleri**

Endüstriyel olarak yari iletken kristal malzemelerin kullanimi için mümkün oldugunca saf kristaller büyütülmelidir. Bu malzemelerin dogada saf olarak bulunmaması çeşitli kristal büyütme teknikleri ve yöntemleri uygulanarak ideal yari iletken malzeme üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır. Bu amaçla yeryüzünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarına uzay çalışmalarıyla da destek verilmektedir. Uzay çalışmalarında öne çıkan bir konu yerçekimsiz bir ortamda dogal konveksiyonun etkisi olmadan saf ve ideal yari iletken malzeme üretilebilmesidir. 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 büyütülerek üretilebilirler:

Çözültiden Kristal Büyütme

Gaz Fazdan Kristal Büyütme

Hidrotermal Sentez ile Kristal Büyütme

Eriyikten Kristal Büyütme

Faz Değişimlerinden Kristal Yapı Elde Etme

Günümüzde endüstriyel kullanım alanında, eriyikten kristal büyütme tekniği ön plandadır. Bu kristal büyütme tekniklerinin yanı sıra farklı kristal büyütme yöntemleri mevcuttur. Bunlar;

Czochralski Yöntemi

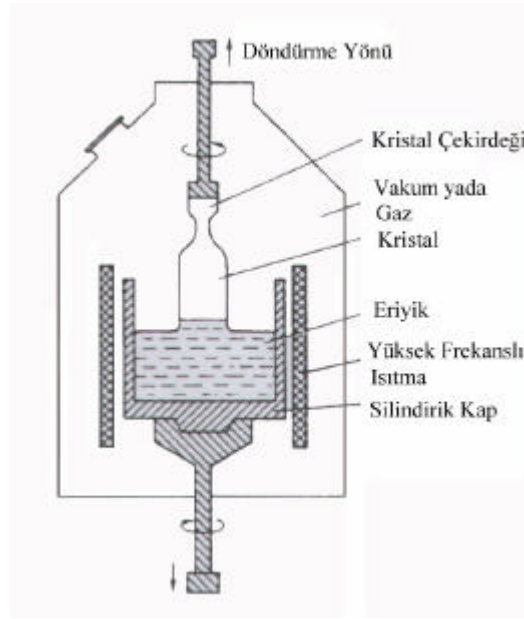
Bridgman Yöntemi

Stockbarger Yöntemi

Nacken ve Kyropoulos Yöntemi

### Verneuil Yöntemi

dir. Yukarıda sıralanan yöntemler arasında, uygulama da kolaylıkları açısından Bridgman ve Stockbarger yöntemleri öne çıksa da, günümüzde daha çok Czochralski yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, laboratuvar çalışmaları ve endüstriyel amaçlı üretimler için tercih edilmektedir. Czochralski yöntemi ile kristal büyüme Şekil 2.5'de görüldüğü gibidir.



**Şekil 2.5.** Czochralski yöntemi ile kristal büyüme

Bu yöntem ile kristal büyüme işlemi yapılırken, poli kristalli saf yarı iletken kristali grafit bir pota içerisine ergime derecesine kadar ısıtılır. Ergimis yarı iletken kristali içerisine mono kristal (tek kristal) halindeki yarı iletken kristal çubuk daldırılıp yavaş yavaş döndürülerek çekilir. Çekme işlemi ilerledikçe, eriyik halindeki yarı iletken kristali yüzeysel gerilim etkisiyle çubuk etrafında toplanır ve aynı zamanda çubugun kristal yapısına uygun olarak katılabilir. Bütün eriyik katılınca kadar aynı işlemle çekmeye devam edilir. Sonunda, mono kristal yapıya sahip bir yarı iletken kristal ortaya çıkar (Ringer 1995).

Genel olarak yeryüzü şartlarında yarı iletken kristallerin kalitesinin artırılması için yapılan çalışmalarda zararlı etkilerin en aza indirilmesi çareleri araştırılmaktadır. Kaliteli yarı iletken kristal elde edilmesi sırasında yüzey gerilimli konveksiyon hareketi etkili olmaktadır. Bunun yanında doğal konveksiyonun kristal oluşumuna zararlı etkisinin olduğu görülmüştür. Kristal oluşumuna doğal konveksiyonun zararlı etkisini azaltmak için deney düzeneginin boyutları mümkün olduğunca küçük tutulması gerekmektedir. Yüzey gerilimli konveksiyon hareketi ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda iki farklı teknik kullanılmıştır. Bu tekniklerden birisi; yüzey bölge konfigürasyon tekniğidir. Diğer ise; silindirik kap tekniğidir. Bu teknikler kullanılarak yüzey gerilimli konveksiyon hareketi gözlemlenir ve nümerik olarak hesapları yapılabilir.

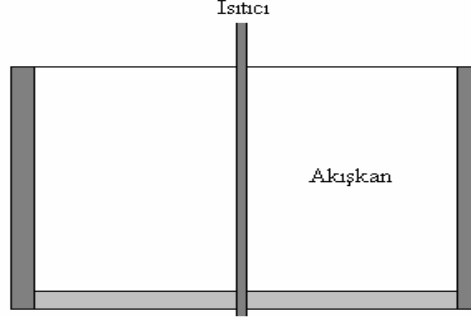
## **2.4. Yüzey Gerilimli Akis Hareketinin İncelenmesi**

### **2.4.1. Silindirik Kaplarda Yüzey Gerilimli Akisin İncelenmesi**

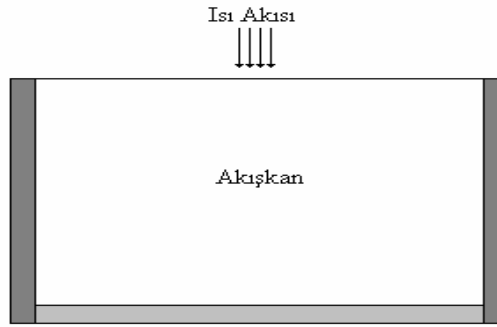
İlk zamanlarda kristal büyütme çalışmalarında yüzey gerilimli konveksiyon hareketinin yeryüzü şartlarında ısı ve kütle transferi için ihmal edilebilir bir yüzey etkisi olduğu düşünülüyordu. Ancak bazı kristal büyütme teknikleri için yüzey gerilimli konveksiyon hareketinin ve ihmal edilemeyeceğini Schwabe (1981) ve Schwabe v.d. (1981) çalışmalarında belirtmişlerdir.

Yüzey gerilim akis hareketi Şekil 2.6'de görüldüğü gibi silindirik kaplarda iki farklı teknikte incelenir. Bunlardan birisi; Şekil 2.6.a'da görüldüğü gibi sabit sıcaklık konfigürasyon (CT) tekniğidir. Bu teknikte silindirik bir kap içerisine akışkan konulur. Bu kabin dış çeperi içerisinden soğutucu akışkan geçen bir serpantin ile çevrelenmektedir. Silindirik kabin merkezinde ise sabit sıcaklık sağlayan bir tel kullanılmıştır. Bu telin uçları güç kaynağına bağlanarak gerilim uygulanır ve akışkanın sıcaklığının kademeli olarak artışı sağlanır. Akışkana uygulanan sıcaklık farkından dolayı, akışkanın fiziksel özelliklerinin değişmesi ile serbest yüzey boyunca sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru akis hareketi gerçekleşir. Diğer ise; Şekil 2.6.b'de görüldüğü gibi sabit ısı akisi konfigürasyon (CF) tekniğidir. Bu

teknikte silindirik kap içerisindeki akışkan üstten ısı akışı uygulanarak, akışkanın yüzey gerilimli konveksiyon akış hareketi incelenmektedir.



**a. CT Konfigürasyonu**



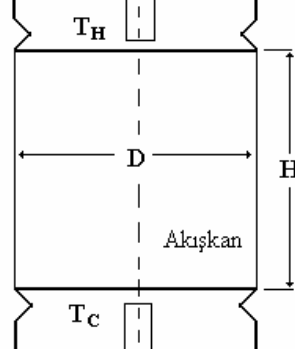
**b. CF konfigürasyonu**

**Sekil 2.6.** Silindirik kap teknikleri

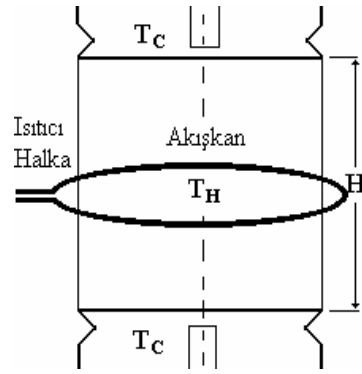
#### 2.4.2. Yüzen Bölge Konfigürasyonunda Yüzey Geriliminin İncelenmesi

Yüzen bölge konfigürasyonunda yüzey gerilim akış hareketi Sekil 2.7'de görüldüğü gibi iki farklı teknikte incelenir. Bunlardan birisi; Sekil 2.7.a'da görüldüğü gibi yarım bölge yüzen sistem konfigürasyon (half-zone) tekniğidir. Yarım bölge yüzen sistem konfigürasyonunda akışkan iki silindirik duvar arasına yerleştirilerek deney bölgesi oluşturulur. Deney bölgesinde görüldüğü gibi akışkanın alt ve üst yüzeyleri arasına sıcaklık farklı uygulanarak yüzey gerilimli akış hareketinin oluşması

saglanmaktadır. Digeri ise; Sekil 2.7.b’de görüldüğü gibi tam bölge yüzen sistem konfigürasyon (full-zone) teknigidir.



a. Yarım bölge yüzen sistem konfigürasyonu



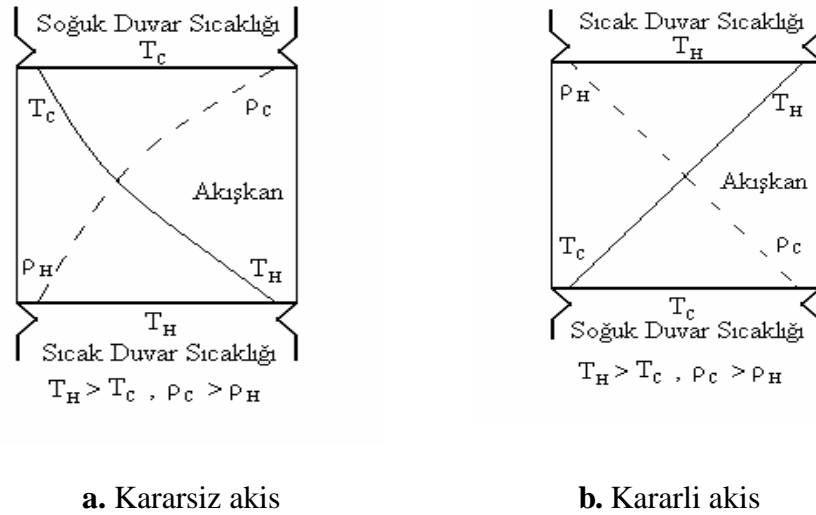
b. Tam bölge yüzen sistem konfigürasyonu

**Sekil 2.7.** Yüzen bölge konfigürasyon teknikleri

Tam bölge yüzen sistem konfigürasyonunda akışkanın serbest yüzeyden belirli bir uzaklığa ısıtıcı halka yerleştirilerek sıcaklık farkı oluşturularak yüzey gerilimli akış hareketi sağlanır. Yüzey gerilimli akış hareketi akışkanın serbest yüzey boyunca akışkanın fiziksel özelliklerinin değişmesiyle sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru gerçekleşir. Yüzey gerilimli konveksiyon hareketinde akışkana sıcaklık farkları uygulanacak olursa belirli bir sıcaklık farkından sonra akışkanın akış hareketi rejim halinden (steady state) periyodik osilasyonlu hale geçecektir. Bu iki durum için akışkanın hız ve sıcaklık dağılımı araştırılmıştır. Osilasyon olayı ilk olarak Schwabe

(1978), Chun v.d. (1978) tarafından yarım bölge yüzen sistemler için incelendikten 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.

Yüzen bölge konfigürasyonu ile ilgili çalışmalarda; akışkanın akış hareketinde doğal konveksiyonun etkisini minimize edebilmek için yarım bölge yüzen sistem konfigürasyon tekniği tercih edilerek, akışkandaki yüzey gerilimli akış hareketi incelenmiştir. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi yüzen bölge konfigürasyonunda iki farklı ısıtma metodu kullanılmıştır.



**Şekil 2.8.** Yüzen bölge konfigürasyonu ısıtma metodları

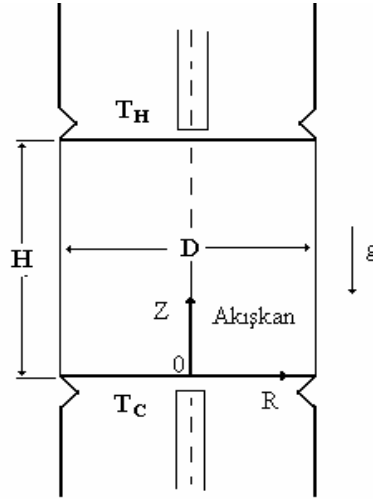
Bunlardan birisi; Şekil 2.8.a'da görüldüğü gibi akışkanın aslı bulunduğu alt duvarı sıcak, üst duvarı ise soğuk olduğu durumdur. Bu durumda alt taraftaki sıcak duvara temas edip ısınan akışkan yukarıya doğru hareket eder ve üst taraftaki soğuk duvara temas edince akışkanın yoğunluğu artarak aşağıya doğru hareket eder. Böylece akışkanda kararsız ve sürekli bir akış hareketi meydana gelir. Diğerisi ise; Şekil 2.8.b'de görüldüğü gibi akışkanın alt duvarının soğuk, üst duvarının sıcak olduğu durumdur.

Bu durumda alt taraftaki soguk duvara temas edip soguyan akiskan asagiya dogru hareket etmek isteyecek fakat hareket edemeyecektir, üst taraftaki sicak duvara temas edip isinan akiskan ise yukariya dogru hareket etmek isteyecek fakat hareket edemeyecektir. Böylece iki duvar arasindaki akiskanda rejim hali bir akis hareketi gözlenecektir. Sekil 8.b'de sicak duvar yakininda yokdenecek kadar az dogal konveksiyon görülür ancak bu yüzey gerilim konveksiyon akis hareketi yaninda oldukça küçüktür. İkinci metotta kristal olusumu sirasinda akiskanin yüzey gerilimi artarken, kristal olusumuna zararli etki yapan dogal konveksiyonun etkisi minimize edilmiş olur. Yaptigimiz çalismalarda ikinci metodu kullanmamizin sebebi yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisinin artmasi, dogal konveksiyonun etkisinin azalmasindan dolayidir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Teorik Analiz

Son yıllarda yüzey gerimli konveksiyon hareketi ile ilgili çalışmalarda dikkate değer oranda bir artış görülmektedir. Özellikle yüzen bölge konfigürasyonu kullanılarak, akışkanın yüzey gerilim konveksiyon hareketi boyutsal oranlarına bağlı olarak yaygın şekilde çalışılmaktadır. Yüzey gerilim konveksiyon hareketi, iki silindirik metal duvar arasına akışkan yerleştirilerek, deney bölgesi olarak da adlandırılan bir akışkan kolonunda incelenir. Şekil 3.1'de akışkan kolonunun silindirik koordinat sisteminde iki boyutlu görünüşü verilmiştir. Akışkana sıcaklık farkları uygulanarak rejim hali yüzey gerimli konveksiyon hareketinden, osilasyonlu yüzey gerimli konveksiyon hareketine geçişler ve serbest yüzey boyunca sıcaklık gradyanları incelenebilir. Yüzey gerimli konveksiyon hareketinin karakteristiklerinin belirlenmesinde bazı önemli boyutsuz parametreler kullanılır. Bu boyutsuz parametreler akışkanlar mekanizindeki hareket denklemleri kullanılarak elde edilir.



**Şekil 3.1.** Yüzen bölge konfigürasyonunda eksensel simetrik akışkan kolonunun koordinat sistemi



## 3.2. Temel Denklemler

### 3.2.1 Üç Boyutlu Hareket Denklemleri

Deneysel çalışmalarımız akışkanın sürekli ve rejim hali durumu için yapıldığından, teorik analizler akışkanın rejim hali durumu için irdelenmiştir. Akışkanın serbest yüzeyinin her zaman düz ve viskozite haricinde akışkan özelliklerinin daima sabit olduğu düşünülmüştür. Yapılan çalışmalarda akışkan kolonu sıkıştırılmaz ve viskoz bir akışkan ile serbest yüzeyi düz olacak şekilde doldurulmuştur. Akışkana sıcaklık farkı uygulandığında yüzey gerilimli konveksiyon hareketinden dolayı, akışkanın akis hareketine bağlı olarak hız ve sıcaklık dağılımlarının bulunabilmesi için akışkanlar mekanizindeki hareket denklemlerinin uygun şartlarda çözülmesi gerekmektedir. Bu denklemler;

**i.** Süreklilik Denklemi

**ii.** Momentum Denklemi

**iii.** Enerji Denklemi

dir. Sıkıştırılmaz bir akışkan için silindirik koordinatlarda  $(r, \theta, z)$  sürekli ve rejim hali için hareket denklemlerini üç boyutlu olarak Şekil 3.1 kullanılarak aşağıda görüldüğü gibi yazılabilir (Rohsenov, 1998).

**i.** Süreklilik Denklemi

Süreklilik veya kütle korunumu olarak bilinen denklem, bir akışkanda kontrol hacme giren ve çıkan kütlelerin cebirsel toplamının sıfır olması şeklinde ifade edilir. Süreklilik denklemi, akışkanın sürekli ve rejim hali durumu için;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (3.1)$$

olarak yazilabilir.

## ii. Momentum Denklemleri

Momentum denklemleri Navier-Stokes denklemleri olarak da bilinir. Momentum denklemleri akis alanina Newton'un ikinci hareket kanununun uygulaması ile bulunur. Bir akiskandaki akis alanlarına bagli olarak akiskanin kütlesine iç ve dis kuvvetler etki etmektedir. Akiskana etkiyen iç kuvvetler normal ve kayma gerilme kuvvetleridir. Akiskana etkiyen dis kuvvetler ise yerçekimi, manyetik ve elektriksel kuvvetlerdir. Sikistirilamayan akiskan için momentum denklemleri;

r- momentum denklemi;

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r \\ + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$\theta$  - momentum denklemi;

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_z}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_\theta \\ + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

z- momentum denklemi;

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z$$

$$+ \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemlerde; esitliğin sol tarafındaki terim atalet kuvvetlerini, sağ taraftaki ilk terim basınç kuvvetlerini, ikinci terim dış kuvvetleri ve üçüncü terim ise viskoz kuvvetleri göstermektedir. Akis hareketinde momentum denklemlerindeki akiskana etkiyen dış kuvvet terimleri (yer çekim kuvveti)  $g_r = g_\theta = 0$  olduğu için, dış kuvvet terimlerinin etkisi sıfır olur. Böylece akiskana etkiyen dış kuvvet terimlerinden sadece z eksenine doğru olan yer çekim kuvvetinin ( $g_z = -g$ ) etkili olduğu görülür.

### iii. Enerji Denklemi

Enerji denklemi, diferansiyel hacim elemanına termodinamığın I. Kanununun uygulanması ile elde edilir. Hacim elemanı içinde enerji kaynağı olmadığı ve radyasyon etkisinin ihmal edildiği düşünülürse termodinamığın I. Kanunu;

[Hacim elemanına iletimle olan ısı transferi] + [Hacim elemanına dış kuvvetlerin yaptığı iş] + [Hacim elemanında yüzeysel kuvvetlerin yaptığı iş] = [Hacim elemanının iç enerjisindeki değişimi]

olarak ifade edilir. Bu ifadeden yararlanarak enerji denklemi;

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi \quad (3.5)$$

olarak yazilabilir. Burada  $F$  viskoz enerji dagilim fonksiyonudur ve;

$$F = 2 \left\{ \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left[ \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_r \right) \right]^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ + \left\{ \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v_z}{r} \right) \right]^2 \right\} \quad (3.6)$$

sekinde yazilabilir. Enerji denkleminde sol taraftaki terim konveksiyon, sag taraftaki ilk terim kondüksiyon ve ikinci terim ise sürtünme nedeni ile açığa çıkan enerjiyi göstermektedir. Akiskanda akis hizlari küçük ise enerji denklemindeki viskoz enerji dagilim fonksiyonu ihmal edilebilir.

Akiskanda sürekli bir akis hareketi mevcut ise degiskenler zamanin fonksiyonu degildir. Bu yüzden akis hareketi sürekli ve rejim halinde oldugu için;

$$\frac{\partial ?}{\partial t} = \frac{\partial v_r}{\partial t} = \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

olacaktır.

### 3.2.2 İki Boyutlu Hareket Denklemleri

Deneysel çalismalarimizda, yüzen bölge konfigürasyonu kullanilarak yüksek Prandtl sayisina ( $Pr = 72$ ) sahip olan silikon yaginin sicaklik etkisiyle meydana gelen yüzey gerilim akis hareketleri arastirilmistir. Sekil 3.1'de görüldüğü gibi akiskana sicaklik farki uygulanacak olursa, akiskanda yüzey gerilimli akis hareketinin basladigi

gözlemlenir. Yüzey gerilim akis hareketinde etkili olan parametreler süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin boyutsuz hale getirilmesiyle elde edilir. Silindirik koordinatlarda akışkanın hareketi  $\theta$  eksenine göre simetri olmasından dolayı, akis hareketi sadece  $r$  ve  $z$  eksenlerinin fonksiyonu olmaktadır. Böylece, silindirik koordinatlarda süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini  $r$  ve  $z$  eksenlerine göre yazabiliriz.

### i. Süreklilik Denklemi

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

### ii. Momentum Denklemleri

r- momentum denklemi:

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \quad (3.7)$$

z- momentum denklemi:

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3.8)$$

### iii. Enerji denklemi

$$\rho c_p \left( v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.9)$$

olarak yazilabilir. Süreklilik ve momentum denklemlerinden akiskanin hiz dagilimleri elde edilir ve uygun sinir sartlarinda enerji denklemi çözümlerek akiskanin sicaklik dagilimleri bulunur.

### 3.3. Sinir Sarlari

Yüzen bölge konfigurasyonunda akiskan kolo nunun serbest yüzeyinin düz, akiskanin çapinin  $D$ , akiskanin yüksekliginin  $H$  ve boyutsal oranin  $Ar = \frac{H}{D}$  oldugunu kabul edelim. Akiskan kolonunun alttaki soguk duvarin sicakligi  $T_C$  sabit tutulurken, üstteki sicak duvarin sicakligi  $T_H$  Kademeli olarak arttirilmaktadır. Akiskan kolonunun çevresindeki ortam sicakligi  $T_R$  ise sabit tutulmuştur.

Yüzen bölge konfigurasyonu için sinir sartlari asagidaki sekildedir:

**i.** Akiskanda sicaklik nedeniyle olusan kesme gerilmeleri ve yüzey gerilim gradyenleri arasindaki dengenin serbest yüzey boyunca sabit olmamasi,

**ii.** Akiskanin soguk duvar sicakliginin sabit olmasi,

**iii.** Akiskanin bulunduğu ortam sicakliginin sabit olmasi,

**iv.** Akiskan kolonunun asili olduğu silindirik alt ve üst duvarlara akiskan kaymasinin olmamasi,

**v.** Akiskanin ortamdaki titresim ve kirliliklerden korunmus olmasi,

**vii.** Serbest yüzey ile ortamdaki hava arasindaki radyasyonun ihmal edilmesi.

Yüzen bölge konfigurasyonunda akiskanin serbest yüzeyi düz olarak sinirlendirilmis olup, yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketi için önemli boyutsuz parametreler

hareket denklemleri ve sinir sartlari dikkate alinarak elde edilebilir. Akiskanin akis hareketinin eksensel simetrik olmasindan dolayi iki boyutlu hareket denklemleri kullanilarak boyutsuzlastirma islemleri yapılabilir. Önceki yıllardaki çalışmalarda Ostrach (1977,1979 ve 1985), Kamotani v.d. (2001, 2003) kullandığımız sinir sartlarini ve benzer sinirlamalari kullanmışlardır.

### 3.4. Önemli Boyutsuz Parametreler ve Denklemlerin Boyutsuzlastirilmesi

Yüzey gerilimli akis hareketinde akiskanların serbest yüzeylerinin düz olduğu durumda ve uygun sinir sartlarında önemli boyutsuz parametreler Ostrach (1977-1979-1982) tarafından önerilmiştir. Yüzey gerilimli akis hareketinde etkili olan önemli boyutsuz parametreler iki boyutlu hareket denklemlerinin boyutsuzlastirilmesi ile elde edilebilir. Denklemleri boyutsuzlastirmek için aşağıda verilen boyutsuzlastirma parametreleri kullanılır. Bu parametreler;

$$r^* = \frac{r}{R}$$

$$z^* = \frac{z}{H}$$

$$v_r^* = \frac{v_r}{V_r}$$

$$v_z^* = \frac{v_z}{V_z}$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_\gamma - T_c}$$

dir. Burada viskoz akışkanın;  $r^*$ ,  $z^*$ ,  $v_r^*$ ,  $v_z^*$  ve  $\rho$  boyutsuz niceliklerini,  $R$  ve  $H$  karakteristik uzunluklarını,  $V_r$  ve  $V_z$  akışkanın referans hızlarını göstermektedir. Bu boyutsuz parametreler (3.6), (3.7), (3.8) ve (3.9) denklemlerinde yerlerine konular ise aşağıdaki denklemler elde edilir:

Boyutsuz süreklilik denklemi;

$$\left(\frac{V_r}{R}\right) \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* v_r^*) + \left(\frac{V_z}{H}\right) \frac{\partial v_z^*}{\partial z^*} = 0 \quad (3.10)$$

olarak yazılır. Boyutsuz süreklilik denklemi kullanılarak akışkanın radyal, eksensel doğrultudaki referans değerleri arasında;

$$\frac{V_r}{R} = \frac{V_z}{H} \quad (3.11)$$

şeklinde bir bağıntı yazılabilir. Akışkanın yüksekliği  $H$  azaltılırsa, akışkanın kritik sıcaklık değeri arttığı için akışkanın radyal yöndeki  $V_r$  hızı artar. Akışkanın  $H$  yüksekliği artırılırsa, akışkanın kritik sıcaklık değeri azaldığı için akışkanın radyal yönde enerjisini harcadığından bu yöndeki  $V_r$  hızı azalacaktır.

Boyutsuz  $r$ - momentum denklemi:

$$v_r^* \frac{\partial v_r^*}{\partial r^*} + v_z^* \frac{\partial v_r^*}{\partial z^*} = - \frac{\partial p^*}{\partial r^*} + \frac{1}{(2 \text{Re}_s \text{Ar})^{2/3}} \left[ \frac{\partial}{\partial r^*} \left( \frac{1}{r^*} \frac{\partial (r^* v_r^*)}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 v_r^*}{\partial z^{*2}} \right] \quad (3.12)$$



Boyutsuz z- momentum denklemi:

$$v_r^* \frac{\partial v_z^*}{\partial r^*} + v_z^* \frac{\partial v_z^*}{\partial z^*} = - \frac{\partial p^*}{\partial z^*} - \frac{Gr}{(2 Re_s Ar)^{4/3}} ?$$

$$+ \frac{1}{(2 Re_s Ar)^{2/3}} \left[ \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial v_z^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 v_z^*}{\partial z^{*2}} \right] \quad (3.13)$$

Boyutsuz Enerji denklemi;

$$v_r^* \frac{\partial \theta}{\partial r^*} + v_z^* \frac{\partial \theta}{\partial z^*} = \frac{1}{Pr (Re_s Ar)^{2/3}} \left[ \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left( r^* \frac{\partial \theta}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^{*2}} \right] \quad (3.14)$$

olarak elde edilir. Yukarıda gösterilen boyutsuz sayılar sırasıyla bahsedilecek olursa;

**i.** Boyutsal oran;

$$Ar = \frac{H}{D}, \quad [\text{akışkanın yüksekliğinin, çapına oranı}]$$

**ii.** Prandtl sayısı;

$$Pr = \frac{\mu}{\alpha}, \quad [\text{viskoz kuvvetlerin, ısı iletim kuvvetlerine oranı}]$$

**iii.** Yüzey gerilim Reynolds sayısı;

$$Re_s = \frac{\sigma_T (\gamma_{kr}) H}{\mu}, \quad [\text{yüzey gerilim kuvvetlerinin, viskoz kuvvetlere oranı}]$$

**vi.** Marangoni sayısı;

$$Ma = Pr Re_s = \frac{|s_T|(\Delta T_{kr})H}{a\mu}, [\text{yüzey gerilim kuvvetlerinin, isil kuvvetlere}$$

orani]

olarak elde edilir. Burada; H akiskanin dikey yüksekligi, D akiskanin çapi,  $\nu$  akiskanin kinematik viskozitesi,  $a$  akiskanin isil yayinim (termal difüzyon) katsayisi,  $\mu$  akiskanin dinamik viskozitesi,  $|s_T|$  akiskanin yüzey gerilim sicaklik katsayisi,  $\Delta T$  akiskanin sicaklik farki, ( $\Delta T = T_H - T_C$ ) dir. Akiskana uygulanan sicaklik farkindan dolayi akiskanin serbest yüzeyde sicak bölgeden soguk bölgeye dogru bir akis hareketi gerçeklesir. Akiskanin sicak bölgede viskozite degeri azalacagi için akiskan soguk bölgeye dogru çekilecektir. Akiskanin fiziksel özelliklerinden olan viskoz kuvvetlerin isil kuvvetlere orani Prandtl sayisini verir. Akiskanin yüzey gerilim hareketinin baslamasinda önemli bir boyutsuz sayi oldugundan akiskan seçiminde etkili bir parametredir. Prandtl sayisi degeri düşük olan akiskanlar, yari iletkenler ve sivi metallerdir. Bu tür akiskanlar gerçek kristallerin büyütülmesinde kullanilirlar. Ancak yari iletkenler ve sivi metaller akiskan-hava arakesit bölgesinde havanın oksijeni ile reaksiyona girerek akiskanda oksitlenme meydana gelmektedir. Akiskan yüzeyinde meydana gelen oksitlenme akiskanin yüzey gerilim hareketinin baslamasina engel olmakta ve akiskan yüzey gerilim akis hareketine baslayamamaktadır. Akiskanlarin saydam olmamalarindan dolayi akiskanin akis hareketi çiplak gözle izlenememektedir. Bu tür akiskanlarin hareketi ancak akiskan içerisine yerlestirilen hassas sicaklik ölçme cihazlari ile tespit edilebilir. Bu sekilde ölçüm yapilmasi akiskanin yüzey gerilim deformasyonuna sebep olacagindan, deformasyonun akiskanin osilasyona baslamasini etken oldugu tam olarak tespit edilememistir. Bu nedenle çalismalarimizda Hidro-karbon (H-C) grubu akiskanlar kullanilmistir.

Yüzey gerilim Reynold sayisi akiskanin yüzey gerilim kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere orani olarak tanimlanir. Marangoni sayisi akiskanin yüzey gerilim kuvvetlerinin isil kuvvetlere orani olarak tanimlanir ve yüzey gerilimli konveksiyon akislarinin akis karakterinin belirlenmesinde kullanilir. Rejim hali (stable) akis

durumunda yüzey gerilimli akis hareketinde Marangoni sayısı akis karakterini belirlemede oldukça etkilidir. Yüksek Prandtl sayısına sahip bir akiskanin farklı Marangoni sayıları için akiskanin yüzey sıcaklık dağılımları ve hız dağılımları hesaplanabilir. Marangoni sayısı akiskanin rejim hali durumdan periyodik osilasyonlu duruma geçiş noktasını belirleyen önemli bir sayıdır. Akiskanin geçiş noktasının altındaki değerlerde homojen ve rejim hali yüzey gerilim hareketi, üzerindeki değerlerde ise periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketi gerçekleşir.

Yapmış olduğumuz deneysel çalışmada ortam sıcaklıkları  $T_R = 10\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $16\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $23\text{ }^\circ\text{C}$  ve boyutsal oran  $Ar = 0,5$ ;  $0,7$ ;  $0,9$  için elde etmiş olduğumuz boyutsuz parametrelerin en düşük ve en yüksek sınır değerleri sırası ile:

$$Pr = 49-58$$

$$Re_s = 235-502$$

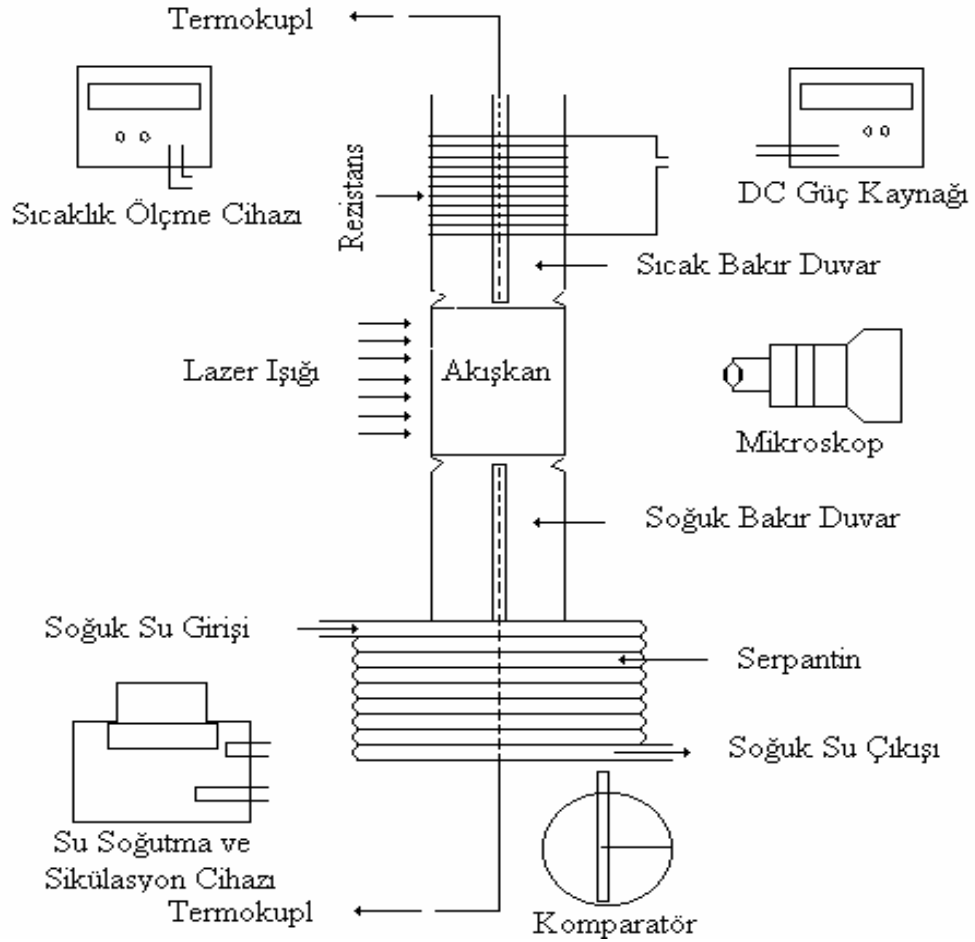
$$Ma_{kr} = 1,2 \times 10^4 - 1,6 \times 10^4$$

dir. Boyutsuz parametreler belirlenirken akiskanin serbest yüzeyinin ortalama sıcaklığı için  $T_M = \frac{1}{2}(T_H + T_C)$  ifadesi kullanılmıştır.

## 4. DENEY ARAÇLARI ve DENEYSEL İZLENİM

### 4.1. Deneysel Araçları

Yüzen bölge konfigürasyonunun yarım bölge yüzen sistem konfigürasyon tekniği ile ilgili deney düzeni Şekil 4.1’de görülmektedir.



**Şekil 4.1.** Yüzen bölge konfigürasyonunun deney düzeni

Deneysel çalışmalarda iki farklı ısıtma metodu kullanılabilir. Bu metotlardan birisi; sıcak bölgenin yukarıda soğuk bölgenin aşağıda olduğu; sıcaklık gradyanı ile yer çekimi vektörünün birbirlerine paralel ve zıt yönlü olduğu durumdur. Bu metotlardan diğeri ise; sıcak bölgenin aşağıda soğuk bölgenin yukarıda olduğu ve

sicaklik gradyeni ile yerçekimi vektörünün paralel aynı yönlü olduğu durumdur. Deneysel çalışmalarımızda sıcak bölgenin yukarıda soğuk bölgenin aşağıda olduğu metot kullanılmıştır.

Sekil 4.1’de görüldüğü gibi deney düzenegi; deney akiskani, deney bölgesi, ısıtma sistemi, soğutma sistemi, termokupllar, sıcaklık ölçme cihazı, akis görüntüleme sistemi, akiskanin dikey yüksekliğini hassas olarak ayarlayan komparatör ve serberbest yüzeyin sıcaklık dağılımlarını ölçmede kullanılan üç boyutlu kızaktan oluşmaktadır.

#### **4.1.1. Deney Akiskani**

Bu çalışmada deney akiskani seçiminde pek çok önemli faktör göz önüne alınmıştır. Akiskanin yüzeyinde aktif maddelerin bulunması, akis hareketinde önemli değişikliklere sebep olabilir. Pratikte çok temiz yüzeylerin oluşturulması zordur. Seçilen akiskanda, akiskanin yüzey gerilimini etkileyecek çevresel ve deney bölgesinin kirliliğinden korunmalıdır.

Yapılan çalışmalara uygun parametrelerin hesaplanmasında akiskanin sıcaklığa bağlı fiziksel özellikleri iyi bilinmelidir. Sıcak ve soğuk bölgeler arasındaki sıcaklık farkının çok büyük olması durumunda akiskanin viskozitesinin sıcaklığa bağımlılığı iyi tanımlanmalıdır. Deney bölgesinin hacmi çok küçük olduğu için akiskan çok az buharlaşma oranına sahip olmalıdır. Akiskanin buharlaşma oranının çok küçük olması, akiskanin serbest yüzeyinin şeklinin bozulmadan veri almasını sağlar. Deneysel çalışmada kullanılan akiskan seffaf ve düşük viskozitede olmalıdır. Bunların yanında kullanılan akiskanin sağlığa zararlı etkisi olmamalı, kolay tasınır olmalı ve kimyasal olarak bileşik yapma özelliğinde olmalıdır.

Deney akiskani olarak “Dow Corning” firması tarafından üretilen 5 cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı (polydimethylsiloxane polimers) kullanılmıştır. Kamotani v.d. (2001) tarafından yapılan çalışmalarında kullandıkları silikon yağının 25 °C sıcaklıktaki fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2. 5** cSt viskoziteye sahip silikon yağının 25 °C deki fiziksel özellikleri  
Kamotani v.d. (2001)

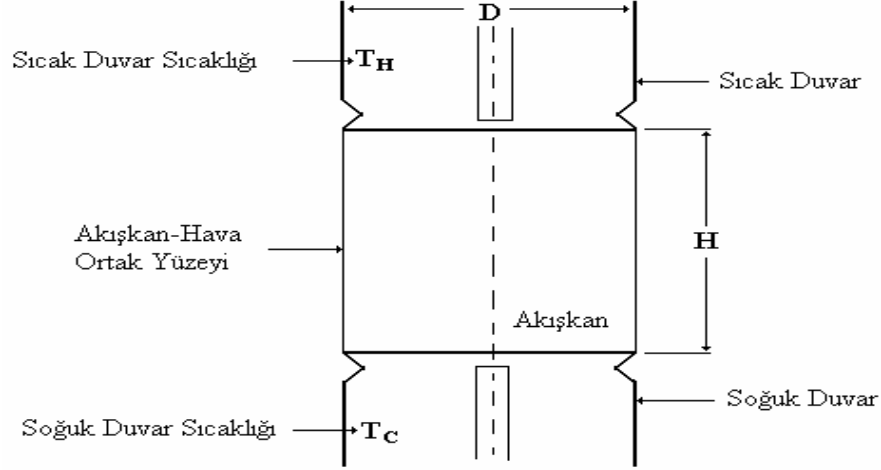
Simgeler	Birimler	Degerler
Yogunluk $\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	913
Isi iletim katsayisi k	W/m.K	0,116
Kinematik viskozite $\nu$	M <sup>2</sup> /s	5,345x10 <sup>-6</sup>
Dinamik viskozite $\mu$	N.s/m <sup>2</sup>	4,88x10 <sup>-3</sup>
Isil yayilim katsayisi $\alpha$	M <sup>2</sup> /s	7,42x10 <sup>-8</sup>
Yüzey gerilim sicaklik katsayisi $\left  s_T \right , \left  \frac{\partial s}{\partial T} \right $	N/m.K	5,9x10 <sup>-5</sup>
Prandtl sayisi Pr	Birimsiz	72,0
Akiskanin kinematik viskozitesinin degisimi, $\nu = 8,185 - 0,2T + 3,74 \times 10^{-3} T^2 - 4,865 \times 10^{-5} T^3 + 3,47 \times 10^{-7} T^4 - 9,76 \times 10^{-10} T^5$ seklindedir.		

#### 4.1.2. Deney Bölgesi

Deney bölgesi Sekil 4.2’de gösterildiği gibi olup, deney bölgesinde kullanılan, akiskanla temas halinde olan sıcak duvar ve soğuk duvar saf bakirdan yapılmıştır. Bu sıcak ve soğuk duvarların bakir olarak seçilmesi bakirin yüksek isi iletim katsayısına sahip olmasından dolayı olup, akiskanla temas halinde olan yüzeylerinin homojen bir sıcaklık değerine sahip olması amacı ile tercih edilmiştir. Üst tarafta bulunan bakir duvarın isitilmesi ile, isitilen sıcak duvardan akiskana isi transferi olacağından dolayı akiskanda sıcaklık artışı sağlanacaktır. Akiskandan, akiskan ile temas halindeki soğuk duvara isi transferi olacağından dolayı duvardaki sıcaklık artışı soğutma sistemi ile engellenecektir

Deneylerde kullanılan bakir duvarların çapı 3 mm olarak seçilmiştir. Silindirik bakir duvarların her birinin tam merkezinden akiskan temas yüzeyine derinliği 0,5 mm kalacak şekilde sıcaklık değerlerini ölçecek termokupllar yerleştirilmek için 1 mm çapında kanallar açılmıştır. Sekil 4.2’de görüldüğü gibi; silindirik sıcak bakir duvar ve silindirik soğuk bakir duvarların akiskana temas yüzeyine yakın yerlerden radyal

yönde çentikler açılmıştır. Bu çentikler ise akışkanın silindirik bakır duvarlarının radyal iletme yüzeylerinin azaltılması amacı ile yapılmıştır. Deneysel çalışmada deney bölgesinde akışkanın yükseklik boyutu  $H = 1,5 \text{ mm}$ ;  $2,1 \text{ mm}$  ve  $2,7 \text{ mm}$  alınmıştır. Farklı yüksekliklerdeki akışkanın boyutsal oranları ise  $Ar = 0,5$ ;  $0,7$ ;  $0,9$  olacaktır.



**Sekil 4.2.** Yüzen bölge konfigürasyonunun deney bölgesi

#### 4.1.3. Isıtma Sistemi

Deney düzeneginde ısıtma sistemi  $0,5 \text{ mm}$  çapında krom-nikel telden imal edilen rezistans ile sağlanmaktadır. Sekil 4.2’de görüldüğü gibi rezistans, akışkanın üst tarafında bulunan silindirik sıcak bakır duvarın üzerinde ve akışkan ile temas noktasından yaklaşık  $5 \text{ mm}$  yukarıda olacak şekilde siki vaziyette sarılmıştır. Rezistansın uçları “Phillip Harris” firması tarafından üretilen AC-DC akımı veren  $0-25 \text{ volt}$  arasında çalışan güç kaynağına bağlanmıştır. Güç kaynağına gerilim uygulanarak bakır duvarın sıcaklığının kademeli olarak artırılması sağlanır.

#### 4.1.4. Soğutma sistemi

Akışkanın alt yüzeyinin soğutulması için silindirik bakır duvar soğutma özelliği verecek şekilde düzenlenmiştir. Silindirik bakır duvarın üzerine bakır borudan yapılmış serpantin siki bir şekilde sarılmıştır. Soğutucu duvarın sıcaklığını sabit

tutmak amacı ile serpantinden sabit sıcaklığa sahip su sirkülasyonu yaptırılmaktadır. Sabit sıcaklığa sahip su sirkülasyonu “Heto” firması tarafından üretilen 0,1 °C hassasiyete sahip cihaz ile sağlanmıştır. Bu cihaz istenilen sıcaklıklarda (0 °C - 300 °C aralığında) ayarlanabilmektedir.

#### **4.1.5. Termokupllar**

Isıtıcı ve soğutucu bakır duvarların sıcaklıklarının ölçülmesi için bu silindirik duvarların merkezinde açılmış bulunan kanallara 0,25 mm çapında 0,015 °C hassasiyete sahip Copper-Canstantan T tipi izoleli termokupllar yerleştirilmiştir. Kanallara yerleştirilen termokuplların çevresindeki boşluklar “Omega” firması tarafından üretilen yüksek ısı iletim katsayısına sahip bir macun ile doldurulmuştur. Soğutucu duvar ile ısıtıcı duvar arasındaki sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerleri arasındaki hassasiyeti akışkanın yüzey gerilim hareketinin başlayıp osilasyonlu hale geçinceye kadarki hassasiyeti belirler.

Deney bölgesinin çevresindeki ortam sıcaklığı dört farklı noktadan 1 °F sıcaklık hassasiyetine sahip Copper-Iron J tipi izoleli termokupllar sayesinde ölçülmüştür. Dört farklı noktadan elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması deneyin yapıldığı ortamın sıcaklık değerini verir.

#### **4.1.6. Sıcaklık Ölçme Cihazı**

Sıcak ve soğuk duvarlara yerleştirilen termokuplların diğer uçları “Omega” firması tarafından üretilen ve 0,1 °C hassasiyeti olan “DP26-TC-230” model sıcaklık ölçme cihazına bağlanmıştır. Bu cihaz iki 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. Ortam sıcaklığını ölçmede kullanılan J tipi termokuplların diğer uçları ise 1 °F hassasiyete sahip yirmi kanallı “Omega” firması tarafından üretilen sıcaklık ölçme cihazına bağlanmıştır.



#### 4.1.7. Akis Görüntüleme Sistemi

Isitici ve soğutucu duvarlar arasına asılan akışkanın saydam bir akışkan olmasından dolayı, 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 gerçekleşir. Bu boyutlardan birisinde akışkan partikülünün hareketi simetriden dolayı akışkanın her bölgesinde ve her açısında sabit kalmaktadır. Silindirik saydam akışkanın merkezinden dikey geçecek şekilde dalga boyu 630-670 nm olan kırmızı lazer ışığı uygulanır. Lazer perdesi üzerindeki akis hareketinin rahatlıkla gözlenebilmesi için, perdeye dik olacak şekilde “Western Electric” firması tarafından üretilen ve büyütme oranı 26 olan bir mikroskop yerleştirilmiştir. Bu mikroskop ile lazer perdesi üzerindeki  $Al_2O_3$  partiküllerinin izleri takip edilerek, akışkanın akis hareketinin karali yüzey gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçtiği noktaların dikkatle izlenmesi sağlanır.

#### 4.1.8. Komparatör

Akışkan yüzey alanının sabit tutulması; akışkanın boyutsal oranının ve çapının sabit tutulması anlamına geleceğinden ( $D$  ve  $Ar = \frac{H}{D}$  sabit), ortam sıcaklığının ve soğuk duvar sıcaklığını etkilerinin incelenmesi bu çalışmayı teskil etmektedir. Deneysel çalışmalar esnasında akışkan yüksekliğinin hassas olarak ölçülmesi bu çalışmanın hassasiyetini belirlemektedir. Deney akışkanının yüksekliği 0,01 mm hassasiyete sahip bir komparatör ile kalibre edilmiştir.

#### 4.1.9. Üç Boyutlu Kızak

Akışkanın düz serbest yüzeyinin sıcaklık dağılımlarının ölçülmesinde kullanılır. Üç boyutlu kızak x,y ve z doğrultularında hareket edebilmektedir. Bu hareketler 0,01 hassasiyete sahip mikrometrelerle sağlanmaktadır. Kızagın üzerine 0,025 mm çapında 0,015 °C hassasiyete sahip Copper-Constantan T tipi izoleli termokupullar

yerleştirilmiştir. Kızaga yerleştirilen bu termokupll ile akışkanın serbest yüzeyinin sıcaklık dağılımları ölçülür.

#### 4.2. Deneysel İzlenim

Deneylelerimiz ortam sıcaklığı  $T_R = +10\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $+16\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $+23\text{ }^\circ\text{C}$  de, akışkanın boyutsal oranları  $Ar = 0,5; 0,7; 0,9$  için, ortamın titreşimsiz olduğu ve kirlilik etkilerinin azaltıldığı anlarda gerçekleştirilmiştir.

Daha önce bahsedildiği gibi; sıcak bölgenin üst tarafta soğuk bölgenin alt tarafta olması halinde deney aparatları kendi hassasiyetleri ölçüsünde, güç kaynağı, soğutucu duvarın sıcaklığını sabit tutan soğutucu su sirkülasyon cihazı, lazer, sıcaklık ölçme cihazı her biri açılır. Bunlardan sabit sıcaklıktaki soğutucu sirkülasyon cihazı istenilen  $T_C = +23\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklığa ayarlanır ve  $T_C$  sıcaklığının rejim hali duruma geçmesi beklenir. İlk olarak; deney bölgesindeki akışkan yüksekliği akışkanın boyutsal oranına ( $Ar = \frac{H}{D} = 0,5$  için) göre ayarlanır. Boyutsal orana bağlı yükseklik ayarlandıktan sonra, akışkanın kirliliği açısından ısıtıcı ve soğutucu bakır duvarların yüzeyleri etilalkol ile temizlenir. Bakır duvarlar üzerindeki etilalkol kuruduktan sonra bir hava kompresörü ile tekrar temizlenir. Bakır duvarlar arasına asılan akışkanın yerçekiminden ve akışkanın ıslaklığından dolayı alt bakır duvar üzerinden akışkan kayarak hacimsel olarak eksilirken, bazen de bu etkiler akışkanın kayarak tamamen yok olmasına sebep olmaktadır. Bunu önlemek amacı ile; soğutucu bakır duvarın radyal yüzeyine pamuklu kür ile “Scotch-Gard” sıvı malzemesi sürülür. Sürülen malzeme kuruduktan sonra deney bölgesi hava kompresörü bir defa daha temizlenir. Akışkan, camdan yapılmış temiz bir enjektör ile yukarıda bahsedilen bakır duvarlar arasına yerleştirilir. Akışkanın akış hareketinin rahat bir şekilde izlenebilmesi için eser miktarda  $\text{Al}_2\text{O}_3$  partikülleri iğne ucu ile akışkana ilave edilir. Akışkanın merkezinden geçecek şekilde lazer perdesi oluşturulur, daha sonra mikroskop akışkan perdesine odaklanır. Güç kaynağı ile akışkanın sıcak duvarının sıcaklığı ( $T_H$ ) adım adım artırılır ve osilasyonun başladığı kritik sıcaklık farkı ise sıcaklık ölçer cihazından ölçülür. Deneyleler aynı şartlarda üçer defa tekrarlanır ve

sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak, deneydeki akışkanın periyodik osilasyona başlama noktası bulunmuş olur. Akışkan hareketinde; kritik sıcaklık farkının altındaki değerlerde rejim hali konveksiyon, üstündeki değerlerde ise periyodik osilasyonlu konveksiyon olarak görülmüştür. Deneylerin yapısındaki şartlar aynı kalmak koşulu ile, akışkanın rejim hali yüzey gerilimli konveksiyondan osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyona geçişindeki her bir noktanın belirlenmesinde yukarıdaki yol izlenir. Hazırlanan deney aparatları sayesinde değişik ortamlarda yüzey gerilim hareketleri ile başlayan akışkanın, akış hareketlerinin geçiş noktaları üzerine etkileri araştırılmıştır.

## 5. ARASTIRMA BULGULARI ve TARTISMA

Deneysel çalışmalarımız, yüzen bölge konfigurasyonunda yarım bölge yüzen sistem tekniginde üstten ısıtma modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler normal şartlardaki (25 °C de)  $Pr= 72$  ve kinematik viskozitesi 5 cSt olan silikon yağı kullanılarak deney akışkanın serbest yüzeyinin düz (dikey) olduğu durumda  $Ar= 0,5$ ; 0,7; 0,9 boyutsal oranlar ( $Ar = \frac{H}{D}$ ) ve  $T_R= 23$  °C, 16 °C, 10 °C ortam sıcaklıkları (deney odası sıcaklıkları) kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmalarda boyutsal oranların, soğuk duvar sıcaklarının ve ortam sıcaklıklarının akışkan yüzey gerilim hareketleri üzerine etkileri incelenmiştir.

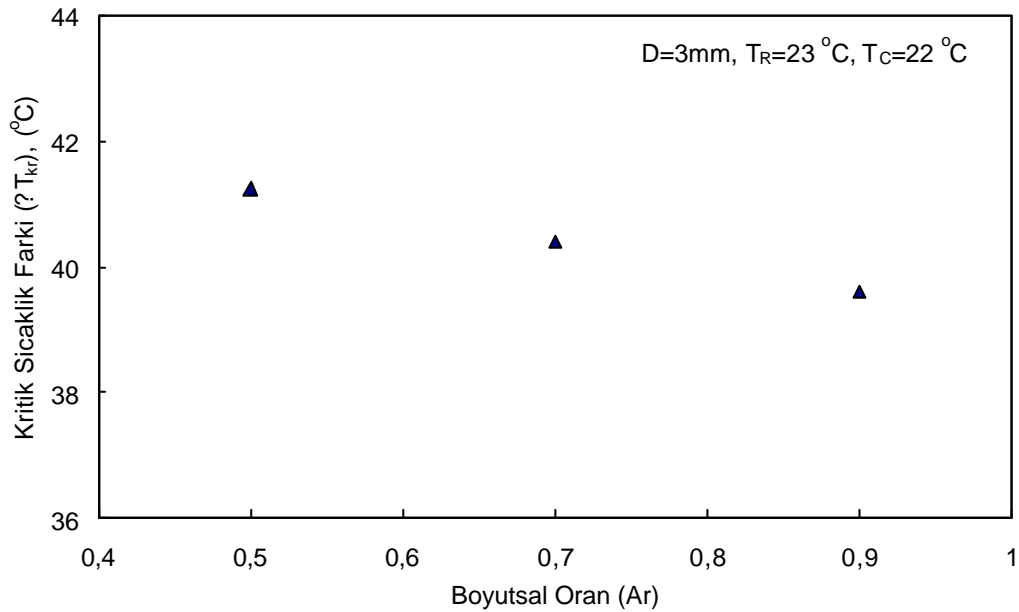
Literatürde, akışkanın yüzey gerilim konveksiyon hareketi Marangoni konveksiyonu olarak bilinmektedir. Yüzey gerilim konveksiyon hareketinin durumunu Marangoni sayısı tarafından belirlenir. Yukarıda bahsedildiği gibi, Marangoni sayısının önemli parametrelerinden birisi de akışkan yüksekliğidir. Bu parametre, yüzey gerilim konveksiyonun rejim hali halinden periyodik osilasyonlu hale geçişinde çok etkilidir ve akışkanın akış karakterini belirler. Akışkanın boyutsal oranı akışkan yüksekliği ile doğru orantılı olup; boyutsal oran arttıkça akışkan yüksekliği artmaktadır. Bu sebepten akışkanın rejim hali yüzey gerilim konveksiyon hareketinden osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçişindeki kritik sıcaklık farkı ( $? T_{kr}= T_H-T_C$ ) değeri azalmaktadır. Bu ise şöyle ifade edilir; Marangoni sayısının parametrelerine bakıldığında, akışkan yüksekliği (H) ve kritik sıcaklık farkı ( $? T_{kr}$ ) değerleri doğru orantılıdır. Yüzey gerilim konveksiyon hareketinde Marangoni sayısı sabit olduğundan dolayı, akışkan yüksekliği (H) ve kritik sıcaklık farkı ( $? T_{kr}$ ) parametrelerinden birisi artarken diğeri azalmaktadır. Akışkanın boyutsal oranına bağlı olarak kritik sıcaklık farkları arasındaki değişim Şekil 5.1’de verilmektedir.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı  $T_R= 23$  °C ve soğuk duvar sıcaklığı  $T_C= 22$  °C de sabit tutulduğu zaman yapılan deneyde, boyutsal oran arttıkça rejim hali yüzey gerilim konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu

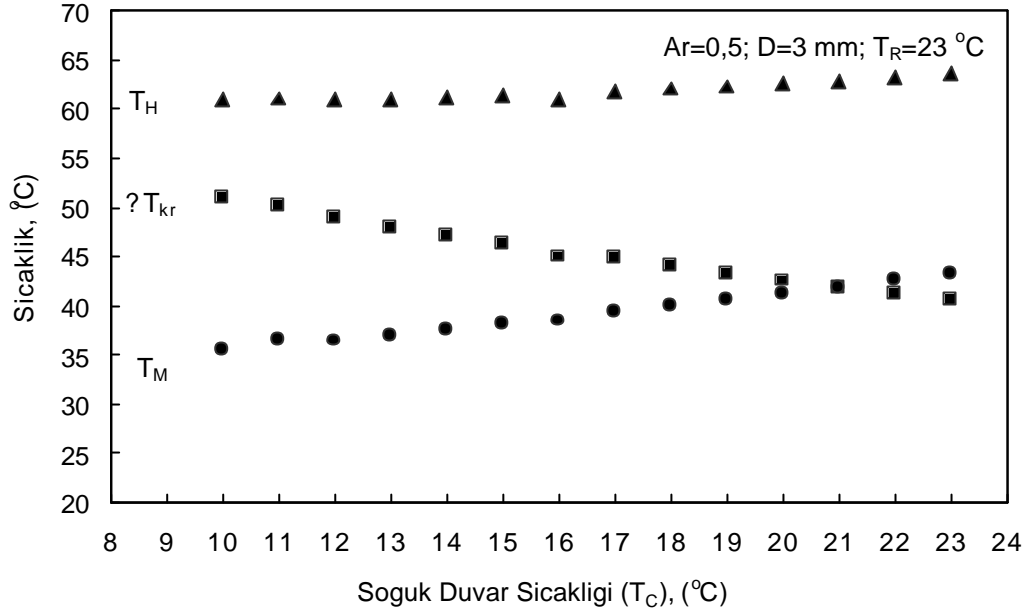
yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçişteki kritik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{kr}$ ) düşmektedir.

Akışkanın boyutsal oranı,  $Ar= 0,5$  ve deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı,  $T_R= 23 \text{ }^\circ\text{C}$  de sabit tutulduğu bir durumda kritik sıcaklık farkının ( $\Delta T_{kr}= T_H-T_C$ ), ısıtılan duvar sıcaklığı ve akışkanın ortalama sıcaklığı ( $T_M$ ) değerlerinin soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi Şekil 5.2’de verilmektedir.

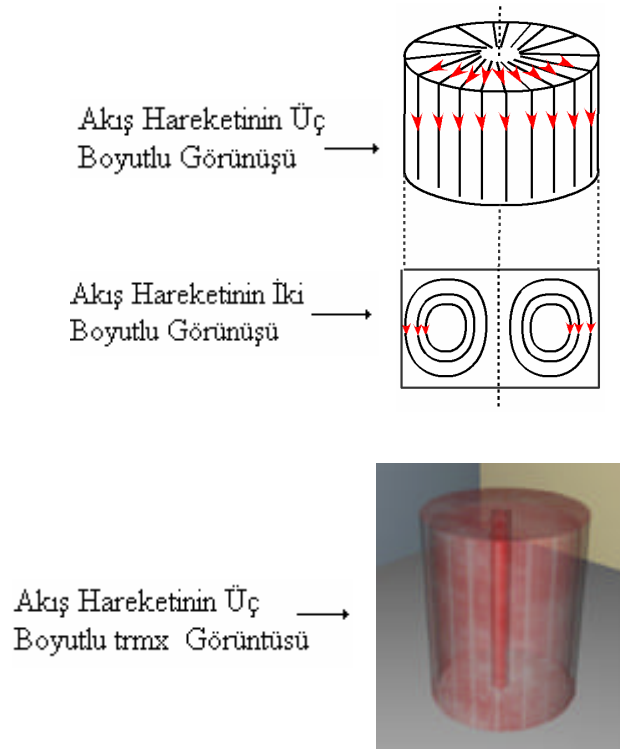
Akışkanın alt temas yüzeyi olan soğutucu duvar sıcaklığı  $T_C= 10 \text{ }^\circ\text{C}$  de sabit tutulduğunda, ısıtıcı duvar sıcaklığı yavaş ve kademeli olarak artırılmaktadır. Bu esnada ısıtıcı duvar sıcaklığı ile soğutucu duvar sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından dolayı akışkan yüzey gerilim hareketine maruz kalmaktadır. Bu hareket esnasındaki sıcaklık farkı, kritik sıcaklık farkından düşük olmasından dolayı akışkanda rejim hali yüzey gerilim hareketi meydana gelir. Bu rejim hali haldeki yüzey gerilim hareketi Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.1.** Kritik sıcaklık farkının akışkanın boyutsal oranına ( $Ar$ ) göre değişimi

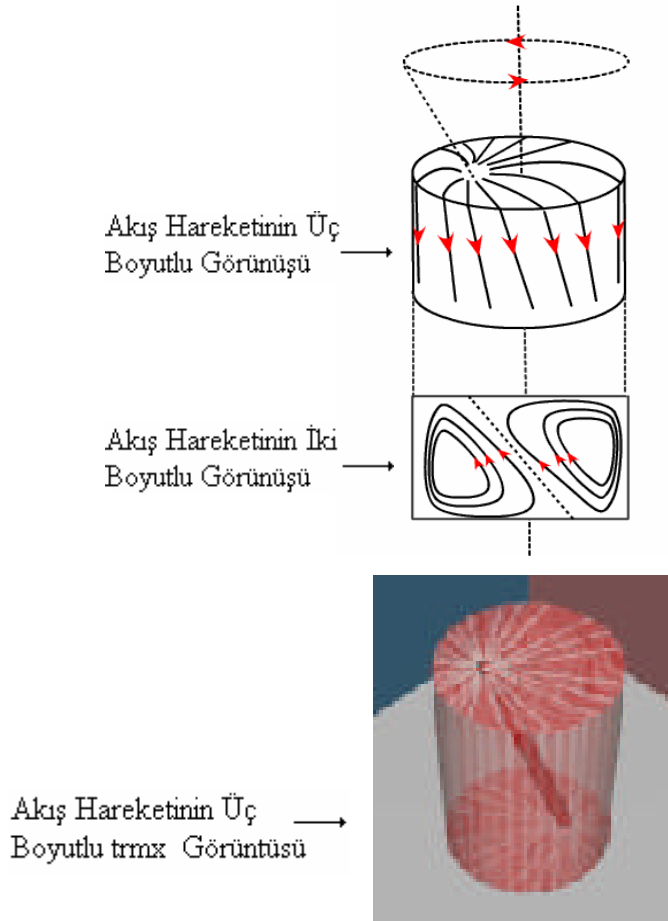


**Sekil 5.2.** Sicakliklarin akiskanin soguk duvar sicakligina göre degisimi

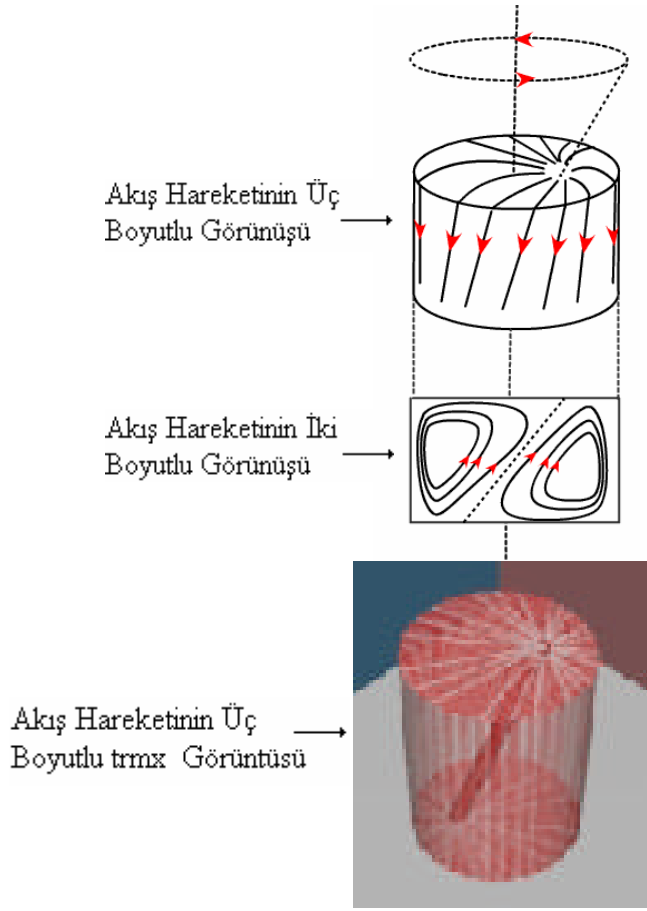


**Sekil 5.3.** Akiskanin rajim halindeki akis hareketinin görünüşü

Isitici duvar sıcaklığı yavaş ve kademeli olarak artırılırken, bu sıcaklık  $T_H = 61,0 \text{ }^\circ\text{C}$  değerini gösterdiğinde, rejim hali haldeki yüzey gerilim konveksiyon hareketi Sekil 5.3’de açıklandığı konumdan çıkarak birdenbire periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçmektedir. Periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçişte, ısıtıcı duvar sıcaklığı ( $T_H = 61,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ile sabit tutulan soğutucu duvar sıcaklığı ( $T_C = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) arasındaki fark bize kritik sıcaklık farkını ( $\Delta T_{kr} = 51,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) vermektedir. Periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketinin başladığı kritik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{kr}$ ) değeri tespit edildikten sonra, akışkanın periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketi izlenmeye devam edilir. Bu periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketi ise Sekil 5.4’da gösterilmiştir.



(a)



(b)

**Sekil 5.4.** Akışkanın osilasyonlu akış hareketinin görünüşü

Sekildeki akış hücreleri birbirleriyle karşılaştırıldığında hiç bir zaman simetrik konuma gelmemektedir. Sekil 5.4.a'daki gibi ayrılma yüzeyine göre; sol yarım düzlemde akışkanın akış hareketindeki hücre, sağ yarım düzlemdeki akışkanın akış hücresine baskı yaparak hareket etmekte ve ayrılma yüzeyine göre sağ tarafta hareket eden hücrenin boyutunu yukarı doğru küçülterek hareketini sürdürmektedir. Sekil 5.4.a'da gösterilen konumundaki akışkanın akış hareketi radyal yönde  $\theta$  açısı yaparak dönmekte ve  $\theta = 180^\circ$  olduğunda Sekil 5.4.b'deki konumuna gelmektedir. Sekil 5.4.b'deki konumunda görüldüğü gibi ayrılma yüzeyine göre; sağ yarım düzlemde akışkanın akış hareketindeki hücre, sol yarım düzlemdeki akışkanın akış hücresine baskı yaparak hareket etmekte ve sol taraftaki hücrenin üst boyutunun küçülmesine neden olmaktadır. Bu döne hareket, ısıtıcı duvar sıcaklığı ( $T_H$ ) ile soğutucu duvar

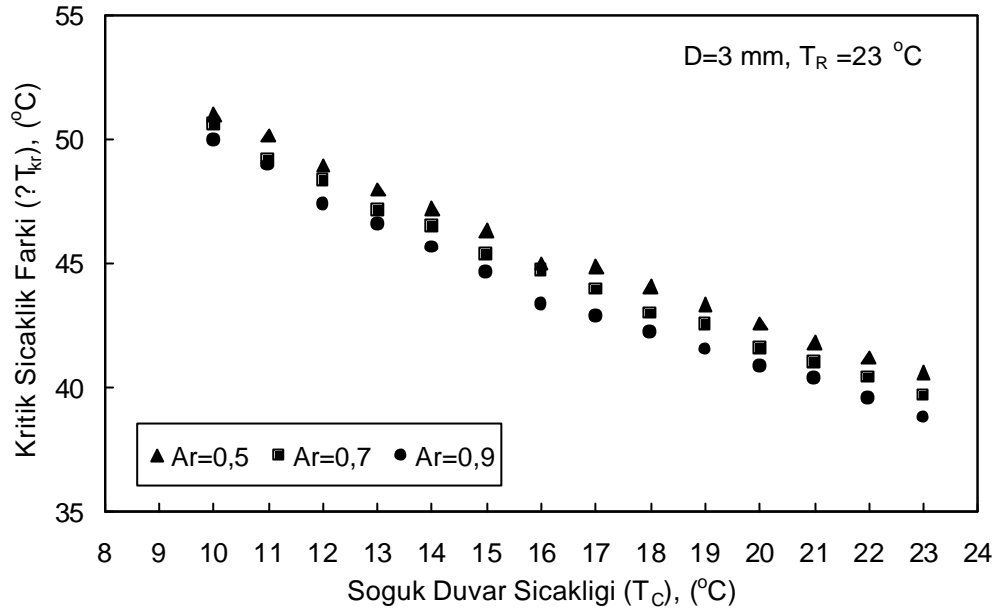


sicakligi ( $T_C$ ) arasindaki fark, kritik sicaklik farkindan daha büyük oldugunda devam etmektedir ve süreklilik kazanmaktadır. Periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketi Preisser v.d. (1983) tarafından elde edilmiş olup, bu deneysel çalışmada elde edilen periyodik osilasyonlu konveksiyon hareketi ile benzerlikleri görülmüştür.

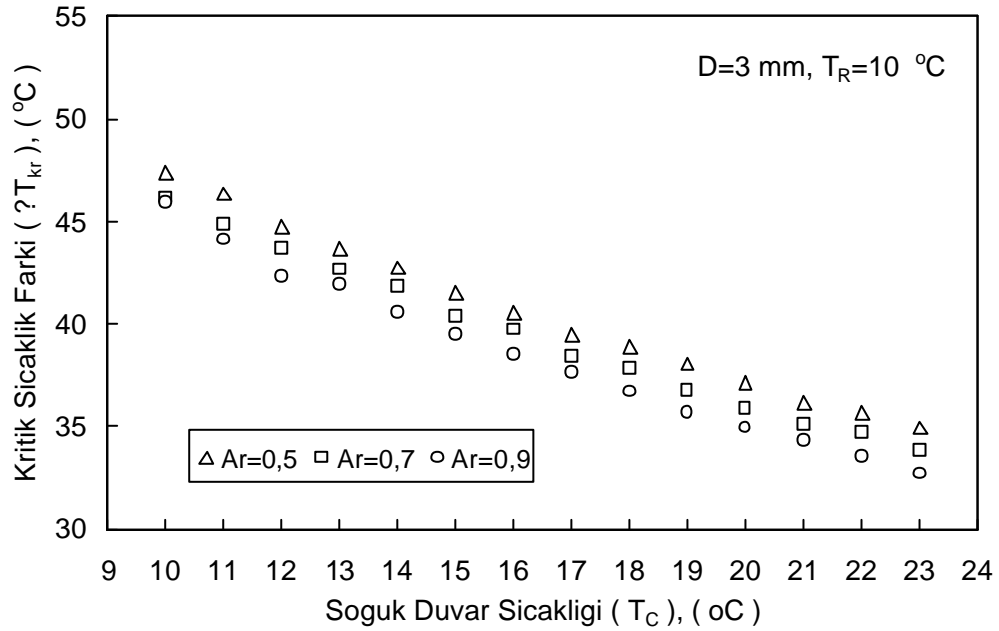
Bu periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketi devam ederken ısıtıcı duvar sıcaklığı yavaş ve kademeli olarak yine artırılmaya devam edildiğinde, belirli bir sıcaklık farkından sonra periyodik osilasyonlu konveksiyon hareketi kaotik yüzey gerilim konveksiyon akis hareketine geçmektedir. Bu kaotik akis hareketinde, akışkan yüksek sıcaklığa sahip olmasından dolayı akışkanın bir kısmı buharlaşarak yok olmaktadır. Buharlaşmış olan akışkandan dolayı deney başlangıcındaki akışkanın hacmi değişmektedir. Bu değişim, akışkanın kaotik akis hareketindeki Transport Fenomenlerini etkilemektedir. Bundan dolayı deney durdurulmakta ve bir sonraki soğutucu duvar sıcaklığı  $T_C = 11$  °C için deney düzeni tamamen temizlenip, taze akışkan deney düzenine yerleştirilmektedir. Deney düzenine yerleştirilen akışkan yukarıda bahsedilen  $T_C = 10$  °C de yapılan işlemler ve prosedür  $T_C = 11$  °C için de yapılır ve bu değerler ile diğer  $T_C = 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22$  ve  $23$  °C sıcaklık değerleri tekrarlanarak Şekil 5.2'deki sayısal değerler elde edilir. Genel olarak, Şekil 5.2 incelendiğinde, soğutucu duvar sıcaklığı arttıkça rejim hali yüzey gerilim konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçiş noktasını belirleyen kritik sıcaklık farkı ( $T_{kr}$ ) değeri azalmaktadır. Bu azalış değeri şöyle izah edilir; deney başlangıcında akışkan sıcaklığı, seçilen ve sabit tutulan soğutucu duvar sıcaklığı ile ısıtılmaya başlanmış olan ısıtıcı duvar sıcaklığı (deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı ile dengede yani  $T_H \cong T_R$ ) arasındaki aritmetik ortalama sıcaklığıdır. Bu sıcaklık değeri  $T_M = \frac{1}{2}(T_H + T_C)$  ile ifade edilir. Karşılaştırma için, akışkanın ortalama sıcaklığı ( $T_M$ ) ile deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı ( $T_R$ ) başlangıçta dengede (sıcaklık farkının olmadığı) olduğunu düşünerek; ısıtıcı duvara verilen ısı sayesinde, akışkanın ortalama sıcaklığı ( $T_M$ ) deneyin yapıldığı ortam sıcaklığından yüksek olacaktır. Bu nedenle ısı transferi, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru kendiliğinden

gerçekleşeceğinden; akışkan yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama doğru ısı geçişi olacaktır. Böylece akışkan yüzeyi ısı kaybedeceğinden; kaybedilen ısı miktarı arttıkça akışkanın rejim hali yüzey gerilim konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçişteki kritik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{kr}$ ) değerinin düşmesine neden olacaktır. Bu ifadeye göre; soğutucu duvar sıcaklığının düşük olmasıyla meydana gelen ısı kaybı, soğutucu duvar sıcaklığının yüksek olmasıyla meydana gelen ısı kaybindan daha düşük olmaktadır. Matematiksel olarak;  $\Delta T_{T_c=10^\circ\text{C}} = (T_{M_{T_c=10^\circ\text{C}}} - T_R)$  ve  $\Delta T_{T_c=23^\circ\text{C}} = (T_{M_{T_c=23^\circ\text{C}}} - T_R)$  olur. Bu iki matematiksel ifade karşılaştırıldığında ( $\Delta T_{T_c=10^\circ\text{C}} < \Delta T_{T_c=23^\circ\text{C}}$ ) olarak gösterilebilir. Isı kaybı, akışkanın serbest yüzeyinin ortalama sıcaklığı ile deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı değerine bağlı olduğundan dolayı; yukarıdaki matematiksel ifadeden anlaşılacağı gibi, ( $Q_{T_c=10^\circ\text{C}} < Q_{T_c=23^\circ\text{C}}$ ) olacaktır. Dolayısıyla, sıcaklık farkı değerinin küçülmesiyle ısı transferi azalacak, akışkan yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama geçen ısı miktarı soğutucu duvar sıcaklığı küçüldükçe azalacaktır. Bizim yapmış olduğumuz deney çalışma sonuçları Kamotani v.d.(2001-2003) ortam sıcaklığının normal şartlardan yüksek olduğu durumlarda 2 cSt ve 5 cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı ile yapmış oldukları deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçları ile benzerlikler görülmüştür.

Deneyler  $Ar=0,5$ ;  $Ar=0,7$  ve  $Ar=0,9$  boyutsal oranlarında ve  $T_R = 23^\circ\text{C}$ ,  $T_R = 10^\circ\text{C}$  ortam sıcaklığı değerlerinde yapılmış olup; bu deneylerin sonuçları Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.  $T_R = 23^\circ\text{C}$ ,  $T_R = 10^\circ\text{C}$  ortam sıcaklıklarında ve farklı boyutsal oranlardaki yüzey gerilim konveksiyonunun kritik sıcaklık farklarının değerleri verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında; boyutsal oran ( $Ar$ ) arttıkça kritik sıcaklık farkı değerleri azalmaktadır. Boyutsal oran ( $Ar$ ), akışkan yüksekliği ( $H$ ) ile doğru orantılı olup, akışkan yüksekliği arttıkça boyutsal oran artmaktadır. Akışkan yüksekliğindeki artma, akışkan serbest yüzeyinin artmasına sebep olacak; bundan dolayı akışkanın serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama olan ısı kaybının artmasına neden olacaktır. Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı, periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyonunun başlangıç noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri azalacaktır.

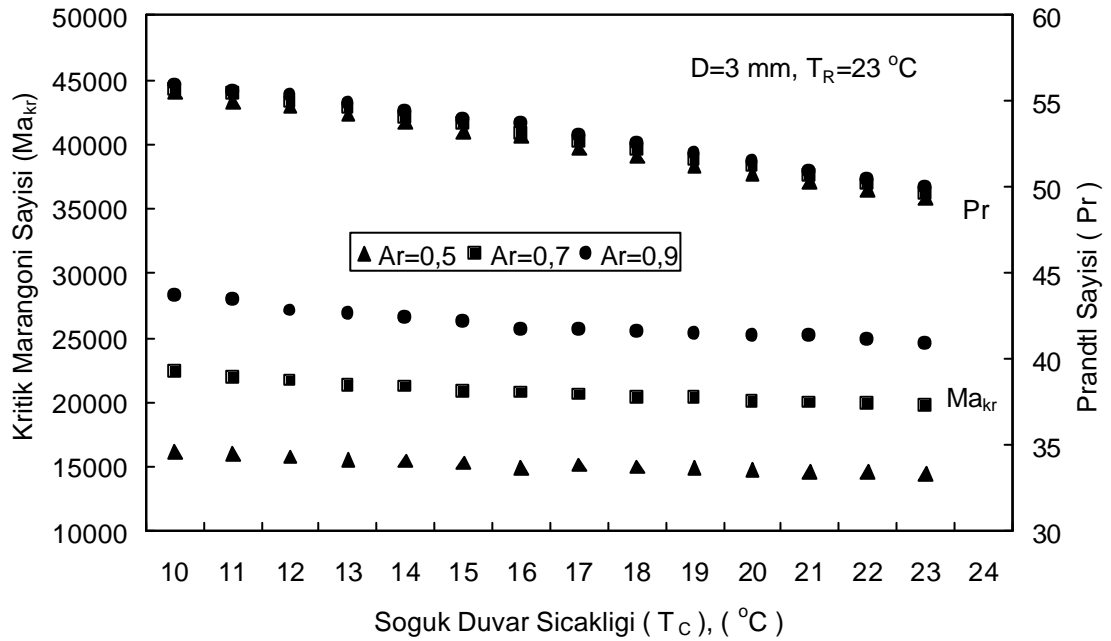


**Sekil 5.5.** Ortam sıcaklığı  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  olduğu durumda farklı boyutsal oranlardaki kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

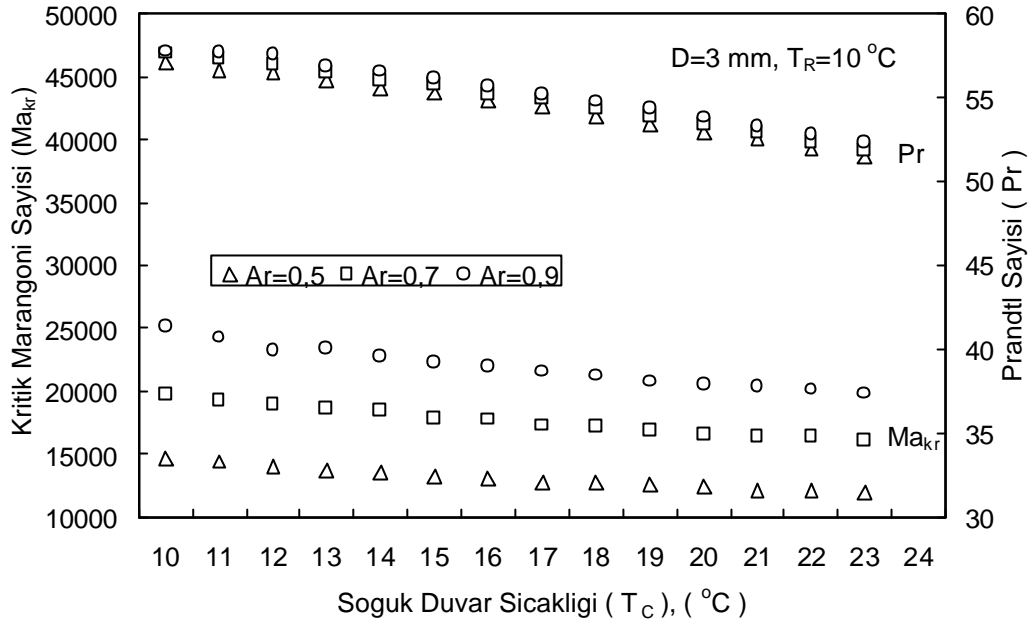


**Sekil 5.6.** Ortam sıcaklığı  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  olduğu durumda farklı boyutsal oranlardaki kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

Sekil 5.5 ve Sekil 5.6'da elde edilen rejim hali yüzey gerilim konveksiyon hareketinin periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçiş noktası olan kritik sıcaklık farkı değerlerini, yüzey gerilim konveksiyon hareketinin kendisini meydana getiren boyutsuz Marangoni sayısına dönüştürüldüğünde elde edilen kritik Marangoni sayılarının soğuk duvar sıcaklıkları ile değişimi Sekil 5.7 ve Sekil 5.8'de gösterilmiştir. Boyutsuz Marangoni sayısı Tablo 2'de verilen silikon yağının kinematik viskozitesinin değişimini veren formül kullanılarak, akışkanın ortalama sıcaklığı ( $T_M$ ) ile hesaplanmıştır. Sekil 5.8'de görüldüğü gibi boyutsal oran azaldıkça ve soğuk duvar sıcaklığı arttıkça boyutsuz Marangoni sayısı azalmaktadır. Boyutsal oranın artması ile birlikte kritik sıcaklığın azalması akışkanın fiziksel özelliği olan kinematik viskozite değerinin yükselmesi Prandtl sayısı değerinin artışı ile orantili olarak değiştiği görülmektedir. Diğer bir deyişle boyutsal oran arttıkça Prandtl sayısı artmakta, buna karşılık soğuk duvar sıcaklığı arttıkça Prandtl sayısı azalmaktadır.

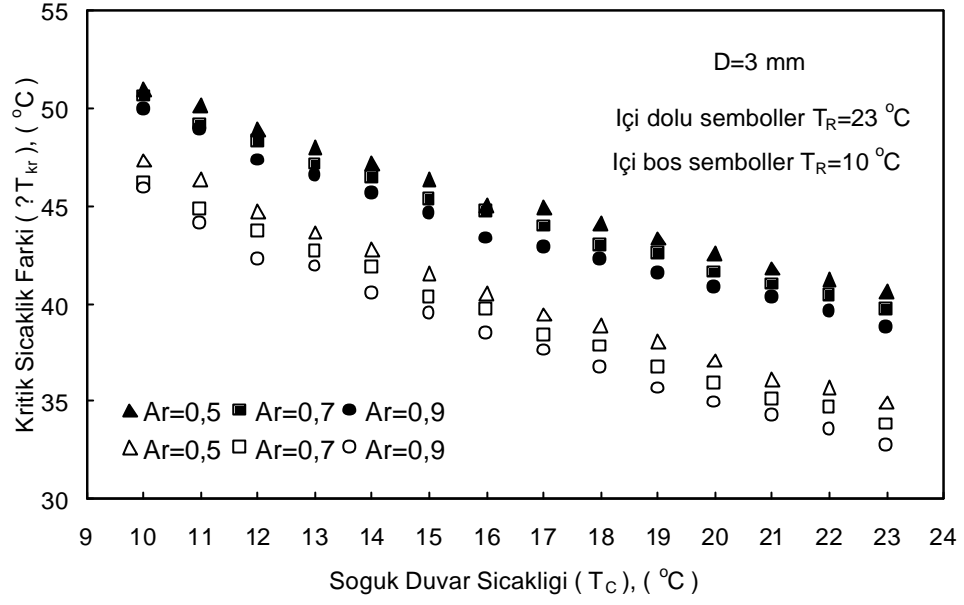


**Sekil 5.7.** Ortam sıcaklığı  $23\text{ }^\circ\text{C}$  olduğu durumda farklı boyutsal oranlardaki kritik Marangoni sayılarının ve Prandtl sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

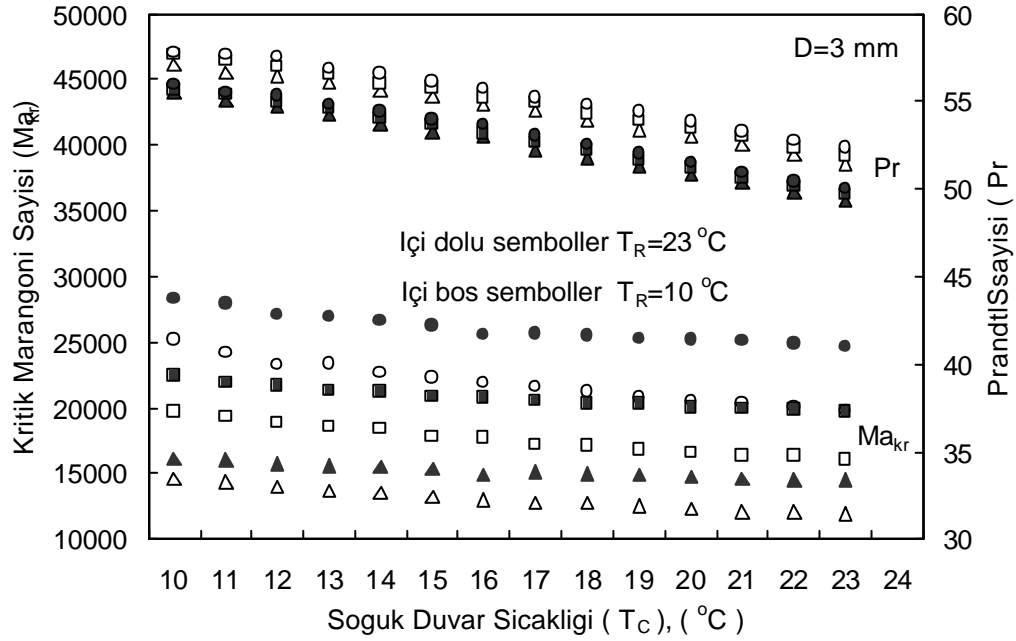


**Sekil 5.8.** Ortam sicakligi  $10^{\circ}\text{C}$  oldugu durumda farkli boyutsal oranlardaki kritik Marangoni sayilarinin ve Prandtl sayilarinin akiskanin soguk duvar sicakligina göre degisimi

Ortam sicakligi  $23^{\circ}\text{C}$  ve  $10^{\circ}\text{C}$  için  $Ar=0,5$ ;  $Ar=0,7$  ve  $Ar=0,9$  boyutsal oranlarında kritik sicaklik farklarinin soguk duvar sicakligina göre degisimleri karsilastirildiginda Sekil 5.9 elde edilir. Sekilde görüldüğü gibi ortam sicakligi azaldikça ortama olan isi kaybi arttigi için kritik sicaklik farklarinin azaldigi görülmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi akiskanin ortalama sicakliklari ( $T_M$ ) ile ortam sicakliklari ( $T_R$ ) arasindaki sicaklik farkinin degisimi ortama transfer edilen isiya bagli olarak degismektedir. Farkli ortam sicakliklari ve boyutsal oranlarda elde edilen boyutsuz Marangoni ve Prandtl sayilari soguk duvar sicakligina göre karsilastirilmesi Sekil 5.10'da gösterilmistir. Sekilde görüldüğü gibi boyutsal oranlara bagli olarak akis karakterini belirleyen Marangoni sayisi ortam sicakligi azaldikça artmaktadır. Diger bir deyişle ortama olan isi kaybi arttikça Kritik Marangoni sayisi azalmaktadır. Sekil 5.10'da ortam sicakligi azaldikça ve ortama olan isi kaybi arttikça Prandtl sayisinin azaldigi gösterilmistir.

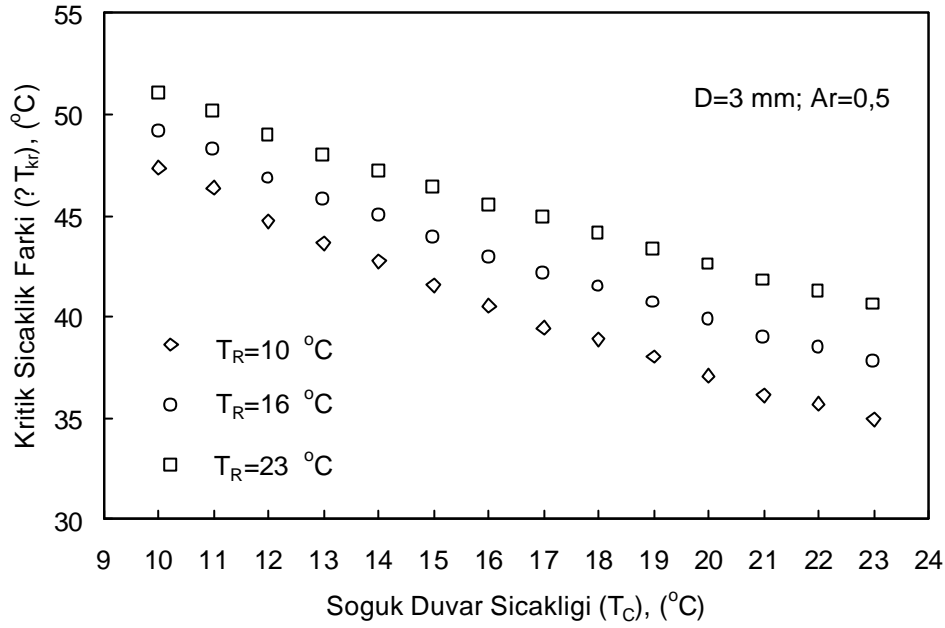


**Sekil 5.9.** Ortam sıcaklıkları  $23\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $10\text{ }^\circ\text{C}$  için farklı boyutsal oranlardaki kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi



**Sekil 5.10.** Ortam sıcaklıkları  $23\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $10\text{ }^\circ\text{C}$  için farklı boyutsal oranlardaki kritik Marangoni sayılarının ve Prandtl sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

Farklı ortam sıcaklıklarında  $T_R = 10\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_R = 16\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $T_R = 23\text{ }^\circ\text{C}$  için boyutsal oran  $Ar = 0,5$  değerinde sabit tutularak, akışkanın osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçişindeki kritik sıcaklık farkı ( $\Delta T_{kr}$ ) değerleri Şekil 5.11’de gösterilmiştir.

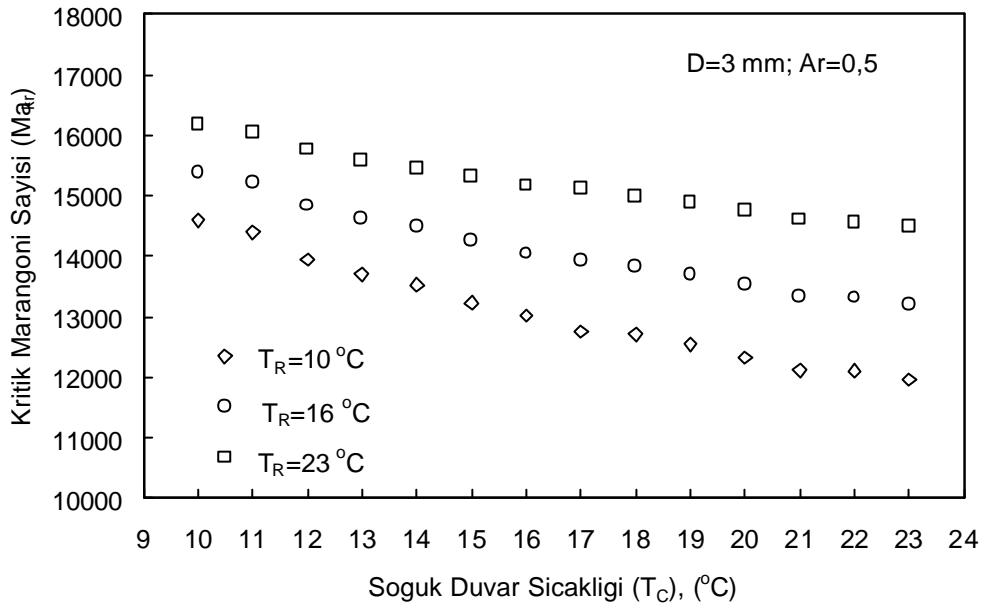


**Şekil 5.11.** Farklı ortam sıcaklıklarında kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

Aynı boyutsal oranda ve farklı ortam sıcaklıklarındaki yüzey gerilimli konveksiyon hareketinin kritik sıcaklık farklarının değerleri verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında ortam sıcaklığı ( $T_R$ ) arttıkça kritik sıcaklık farkı değerleri azalmaktadır. Ortam sıcaklığının artması akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının azalmasına sebep olacağı için kritik sıcaklık farkı değeri artacaktır. Bu sebeplerden dolayı periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyon hareketinin başlangıç noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri, ortam sıcaklığının artması ile artacaktır.

Şekil 5.11’de elde edilen rejim hali yüzey gerilimli konveksiyon hareketinin periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçiş noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri, yüzey gerilimli konveksiyon hareketinin kendisini meydana

getiren boyutsuz Marangoni sayısına dönüştürüldüğünde, elde edilen kritik Marangoni sayılarının soğuk duvar sıcaklıkları ile değişimi Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi aynı boyutsal oran için ortam sıcaklığı azaldıkça, boyutsuz Marangoni sayısı ve soğuk duvar sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Diğer bir ifade ile soğuk duvar sıcaklığı arttıkça, boyutsuz Marangoni sayısı azalmaktadır.



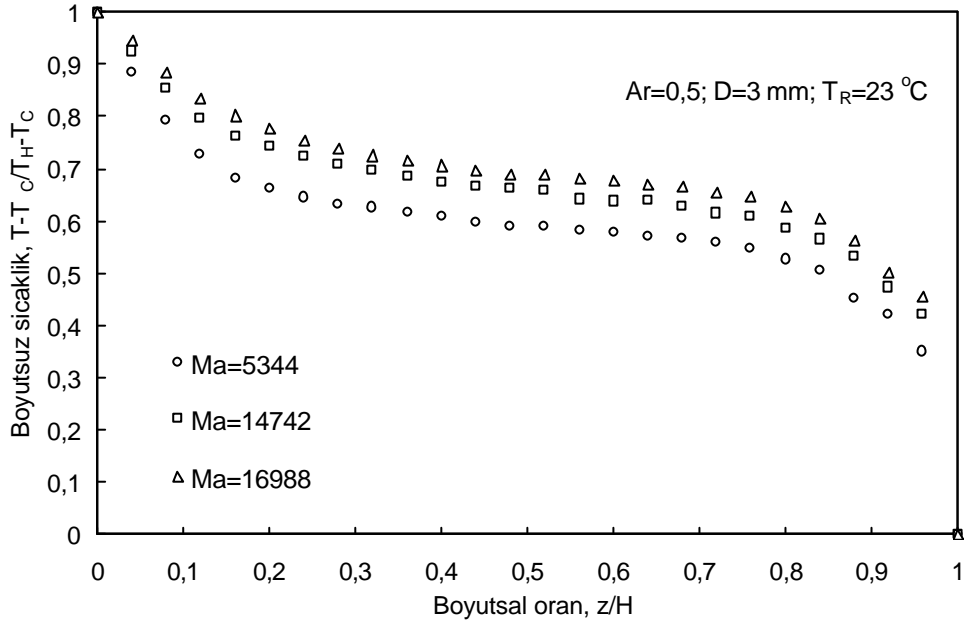
**Şekil 5.12.** Farklı ortam sıcaklıklarında kritik Marangoni sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

Yüzey bölgesi konfigürasyonunda akışkanın serbest yüzeyinin düz olduğu durumda, akışkana farklı sıcaklık farkları uygulanarak, akışkanın boyutsal oran  $Ar = 0,5$ ; ortam sıcaklığı  $T_R = 23^\circ\text{C}$  ve soğuk duvar sıcaklığı  $T_C = 16^\circ\text{C}$  de sabit tutularak, sıcak duvar sıcaklıkları  $T_H = 35^\circ\text{C}$ ;  $61,35^\circ\text{C}$  ve  $65^\circ\text{C}$  için akışkanın serbest yüzeyinin sıcaklık dağılımları Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi akışkanın serbest yüzeyindeki sıcaklık dağılımları rejim hali ( $Ma = 5344$ ), osilasyona başlama ( $Ma = 14742$ ) ve periyodik osilasyonlu ( $Ma = 16988$ ) yüzey gerilimli konveksiyon akış hareketi durumundadır. Şekilde görüldüğü gibi akışkan serbest yüzeyinin boyutsuz sıcaklığı  $\frac{T - T_C}{T_H - T_C}$ , ve boyutsuz uzunluğu  $\frac{Z}{H}$  oranları ile belirlenmiştir. Burada;  $T$



akiskanin H yükseklik boyunca ölçülen sıcaklık değerleri,  $T_C$  akiskanin soğuk duvar sıcaklığı,  $T_H$  akiskanin sıcak duvar sıcaklığı, Z akiskanin serbest yüzeyinde eksen boyunca aldığımız noktaların uzunluklarını ve H ise akiskanin yükseklik boyutunu göstermektedir.

Sekil 5.13'de görüldüğü gibi akiskanin serbest yüzeyindeki sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında; rejim hali konveksiyon akış durumundaki sıcaklık dağılımlarına göre, osilasyonun başlangıcı ve osilasyonlu konveksiyon akış durumundaki sıcaklık dağılımlarında taşınım olayları doğrultusunda aradaki farkın momentuma yani kinetik enerjiye dönüştüğü görülür.



**Sekil 5.13.** Ortam sıcaklığı 23 °C de akiskanin boyutsuz sıcaklıklarının boyutsuz uzaklığına göre değişimi

Akiskanin serbest yüzeyinde oluşan yüzey gerilim kuvveti sıcak ve soğuk bölgelerin etkisinde olmasına rağmen bu kuvvet Ma sayısının da artmasına bağlı olarak sıcak bölgede etkisini göstermiştir. Akiskanin serbest yüzeyindeki ince sinir tabakası ısıtıcıya yakın olan bölgede (sıcak köşe) yüzey sıcaklığı yüksek sıcaklık gradyanı (z eksenine doğrultusunda) oluşmasına sebep olur. Sonuçta bu bölgede akiskanin hızı oldukça yüksek olacak ve dolayısıyla hız gradyanı da büyük olacaktır. Akiskanin

yüzey gerilim kuvveti yüksek degerlere ulastiginda serbest yüzeyin sicak bölgesini de içine alan belirli bir kismda viskoz sinir tabakasi olusur. Daha sonra ince bir sinir tabaka ile sinirlanan kütle akisi hacimsel bölgeye göre oldukça küçük olacaktır ve sicak bölgedeki yüzey gerilim kuvvetleri tüm akis için süreklilik kazanacaktır.

Akiskanin sicak bölgesinden soguk bölgesine dogru gerçekleşen isi akisi serbest yüzey boyunca isil sinir tabaka olusmasına neden olur. Yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketi sinir tabakasi ile belirlenir. Yapılan çalismalarda Marangoni sayisi yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketinin karakterini belirlemede önemli bir parametredir. Akiskana uygulanan sicaklik farki arttikça, akiskanin sicaklik gradyenleri ve hiz gradyenleri artacaktır. Akiskandaki sicaklik farki kritik sicaklik degerlerin üzerine çikarsa osilasyonlu konveksiyon akis hareketi baslayacaktır. Osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketinde akis hareketi simetriden uzaklasir. Bu yüzden akiskanin rejim hali yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketinden osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketine geçisi kristal olusumunda istenmeyen bir durumdur (Chun 1979, Kamotani v.d. 1984-2001).

Sonuç olarak saf yari iletken kristallerin üretilmesinde zararli etkileri azaltilip teknolojide kullanilmasini saglamaktir. Bu nedenle yeryüzü sartlarinda kristallerin üretilmesi (büyütülmesi) sirasinda zararli etki olusturan yerçekimi ve dogal konveksiyonun etkisinin minimize edilmesi gerekmektedir. Günümüzde bilimsel çalismalarda düşük yerçekimi ivmesinin olduğu sartlarda yüksek kalitede kristal üretme çareleri arastirilmaktadır. Bizde yüzen bölge konfigurasyonu ile yaptigimiz çalismada bu etkilerin azaltilmasi için deney bölgesi oldukça küçük tutulmustur. Akiskan üstten isitma metodu kullanilarak dogal konvesiyonun etkisi minimize edilirken yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketi daha etkin hale getirilmistir.

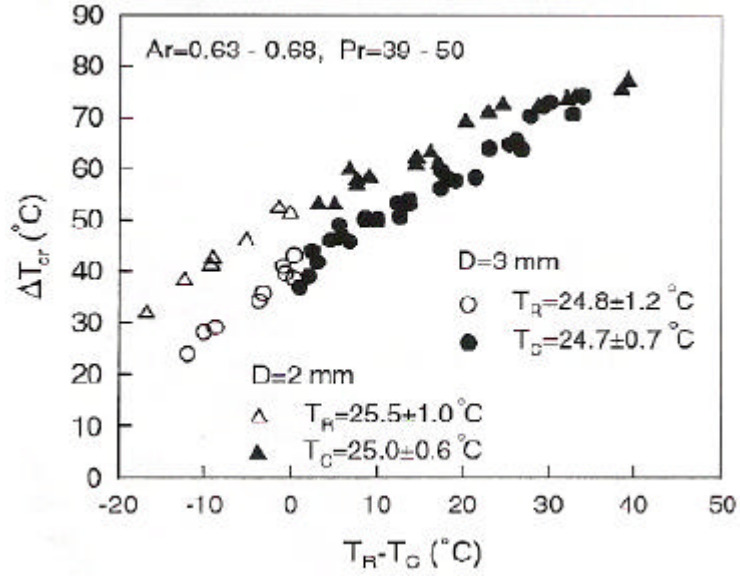
Akiskandaki yüzey gerilim konveksiyon akis hareketi sicakligin fonksiyonudur. Akiskan-hava ortak yüzeyi üzerindeki sicaklik gradyeni viskozite gradyenini olusturur. Bu viskozite gradyeni yüzey gerilim gradyenini meydana getirir. Yüzey gerilimli konveksiyon akis hareketi, akiskanda sicaklik farkinin bir taraftan diger tarafa dogru artirilmasi meydana gelir. Akiskan-hava ortak yüzeyi boyunca

gerçekleşen sıcaklık gradyeni bölgesel olarak değişeceğinden, akışkanın viskozite gradyeninin de bölgesel olarak değişmesine neden olacaktır. Akışkanın viskozite gradyeninin bölgesel olarak değişmesi ile akışkanın yüzey gerilim kuvveti de bölgesel olarak değişecektir. Bölgesel olarak değişen yüzey gerilim kuvveti sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru çekilmiş olacaktır. Akışkanda sıcaklık farkı var olduğu sürece, akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca gerçekleşen akış hareketi ortak yüzeyi tamamladıktan sonra hacimsel akış türüne geçerek akışkanın sürekliliği sağlanmış olacaktır.

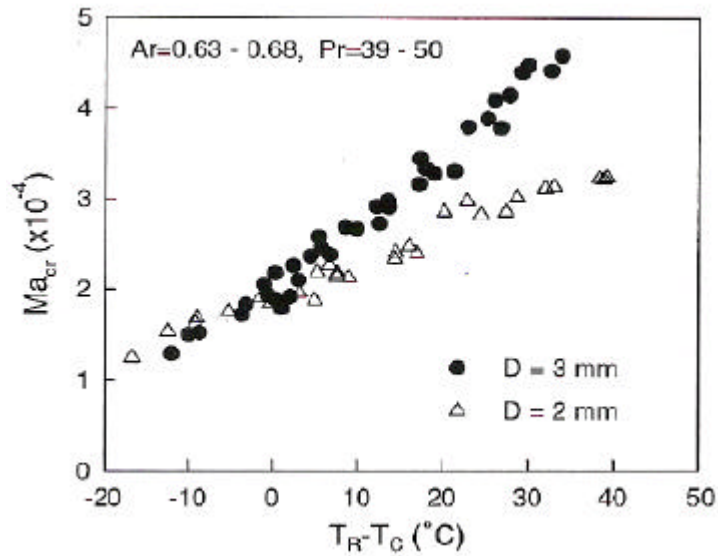
Kamotani v.d. (2003) yaptıkları deneysel çalışmalarda, kinematik viskozitesi 2 cSt ve 5 cSt olan silikon yağı kullanmışlardır. Çalışmalarında ortam sıcaklıklarını ve soğuk duvar sıcaklıklarını 23 °C den yüksek tutarak, akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının yüzey gerilimli konveksiyon akış hareketine etkilerini incelemişlerdir. Bu araştırmacıların 5 cSt olan silikon yağı yapmış oldukları çalışmalar Şekil 5.14’de ve Şekil 5.15’de görülmektedir. Yapmış oldukları çalışmalarda ortama olan ısı kaybı arttıkça akışkanın rejim hali konveksiyon akış hareketinden osilasyonlu akış hareketine geçişteki kritik sıcaklık farkı değerlerinin azaldığını belirlemişlerdir.

Bizde tez çalışmamızda, Prandtl sayısı  $Pr=72$  olan ve 5 cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı kullanılarak akışkanın yüzey gerilimli konveksiyon yüzünden yüzer bölgede oluşan rejim hali ve osilasyonlu durumdaki sıcaklık dağılımı ile ilgili çalışmalar yaptık. Yüzey gerilimli konveksiyon akış hareketi Marangoni konveksiyon olarak da adlandırılır. Yapılan çalışmalarda akışkan serbest yüzeyinin düz olduğu durumlar için; farklı boyutsal oranlar ( $Ar = 0,5; 0,7; 0,9$ ), farklı soğuk duvar sıcaklıkları ( $T_C = 10\text{ °C}, 11\text{ °C}, 12\text{ °C}, \dots, 23\text{ °C}$ ) ve farklı ortam sıcaklıkları ( $T_R = 10\text{ °C}, 16\text{ °C}, 23\text{ °C}$ ) kullanılarak akışkanın akış karakterini belirleyen parametreler elde edilmiştir. Akışkanın farklı boyutsal oranlarında, farklı soğuk duvar sıcaklıklarında ve farklı ortam sıcaklıklarında yapılan çalışmalarda akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybı arttıkça akışkanın rejim hali konveksiyon akış hareketinden osilasyonlu konveksiyon akış hareketine geçiş noktaları azalmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçların referanslarda bahsedilen makale

sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Daha sonraki çalışmalarımızda farklı viskozitelerdeki silikon yağları kullanılarak düşük ortam sıcaklıklarında, serbest yüzeyin düz ve boyunlu olduğu durumlarda deneysel ve teorik çalışmalar yapılacaktır.



**Sekil 5. 14.** Akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının kritik sıcaklık farklarının farklı ortam ve farklı soğuk duvar sıcaklıklarına göre değişimi



**Sekil 5. 15.** Akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının kritik Marangoni sayılarının farklı ortam ve farklı soğuk duvar sıcaklıklarına göre değişimi

**KAYNAKLAR**

- Chang, C. E., Wilcox, W. R., 1975, Inhomogenities due to thermocapillary flow in floating zone melting, *Journal of Crystal Growth*, p. 8.
- Chang, C. E., Wilcox, W. R. 1976, Analysis of surface tension driven flow in floating zone melting, *Int. Jour. of Heat Transfer*, p. 355.
- Chang, C. E., Wilcox, W. R., Lefever, R. A., 1979, Thermocapillary convection in floating melting influence of zone geometry and Prandtl number at zero gravity, *Mat. Res. Bul.*, p. 527.
- Clark, P. A., Wilcox, W. R., 1980, Influence of gravity on thermocapillary convection in floating zone melting of silicon, *Journal of Crystal Growth*, p. 461.
- Chun, H., Wuest, W., 1978, A microgravity simulation of Marangoni convection, *Acta Astronautica*, p. 681.
- Chun, C. H., Wuest, W., 1979, Experiments on the transition from the steady to the oscillatory Marangoni convection of a floating zone under reduced gravity effect, *Acta Astronautica*, p. 1073.
- Chun, C. H., 1980, Experiments on steady and oscillatory temperature distribution in a floating zone due to the Marangoni convection, *Acta Astronautica*, p. 479.
- Chun, C. H., 1980, Marangoni convection in a floating zone under reduce gravity, *Journal of Crystal Growth*, 48, p. 600-610.
- Chun, C. H., 1986, Experiments on steady and oscillatory temperature distribution in a floating-zone due to the Marangoni convection, *Acta Astrona*, 73, 352-360.

- Fu, I., 1982, Numerical solutions of floating zone crystal growth, Ph. D. Dissertation, Dep. of Mech. and Aerospace Eng., Case Western Reserve University, Cleveland Ohio.
- Hirata, A., Sakurai, M., Ohishi, N., 1997, Effect of gravity on Marangoni convection in a liquid bridge, *J. Japon Soc. Microgravity Appl.*, 14, p. 130-136.
- Hirata, A., Nishizawa, S., Sakurai, M., 1997, Experimental results of oscillatory Marangoni convection in a liquid bridge under normal gravity, *J. Japon Soc. Microgravity Appl.*, 14, p. 122-129.
- Hu, W. R., Shu, J. Z., Zhou, R., Tang, Z. M., 1994, Influence of liquid bridge volume on the onset of oscillation in floating zone configuration I. experimentals, *Sci. China*, 35, p. 1101-1109.
- Kamotani, Y., Ostrach, S., Vargas, M., 1984, Oscillatory thermocapillary convection in a simulated floating-zone configuration, *J. of Crystal Growth*, p. 83.
- Kamotani, Y., Lee, K. J., 1989, Oscillatory thermocapillary flow in a column heated by a ring heater, *Physico Chemical Hydrodynamics*, 11, p. 729-736.
- Kamotani, Y., Lee, J. K., Ostrach, S., Pline, A., 1992, An experimental study of oscillatory thermocapillary convection in cylindrical containers, *Physics of Fluids*, p. 955.
- Kamotani, Y., Ostrach, S., 1998, Theoretical analysis of thermocapillary flow in cylindrical columns of high Prandtl number fluids, *Journal. of Heat Transfer*, 758, p. 758-764.
- Kamotani, Y., Wang, L., Hatta, S., Selver, R., Bhunia, P. S., ve Yoda, S., 2001, Effect of old wall temperature on onset of oscillatory thermocapillary flow, 39. AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 8-11 January Reno, NV.

- Kamotani, Y., Wang, L., Hatta, S., Wang, A., Yoda, S., 2003, Free surface heat loss effect on oscillatory thermocapillary flow in liquid bridges of high Prandtl number fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 7, p. 3211-3220.
- Kuhlmann, H. C., Rath, H. J., 1993, Hydrodynamic instabilities in cylindrical thermocapillary liquid bridge, *J. of Fluid Mech.*, 152, p. 341-346.
- Kuhlmann, H. C., Neinhüser, C., Rath, H. J., and Yoda, S., 2002, Influence of the volume of liquid on the onset of three-dimensional flow in thermocapillary liquid bridges, *Adv. Space Res.*, 29, p. 639-644.
- Lee, K. J., 1991, Experiments on oscillatory thermocapillary flow in simulated floating-zone configurations, Ph. D. Dissertation, Dep. of Mech. and Aerospace Eng., Case Western Reserve University, Cleveland Ohio.
- Levich, V. G., 1962, "Physicochemical Hydrodynamics", Prentice-Hall Inc., p. 372.
- Levich, V. G, Krylov, V. S., 1969, Surface tension driven phenomena, *Ann. Rev. Fluid Mec.*, p. 293.
- Masud, J., Kamotani, Y., Ostrach, S., 1997, Oscillatory thermocapillary flow in cylindrical columns of high Prandtl number fluids, *J. Thermophys. And Heat Transfer*, 11, p. 105-111.
- Monti, R., Fortezza, F., 1991, The scientific results of the experiment of oscillatory Marangoni flow performed in telepresence on TEXUS 23, *Microgravity Quarterly*, p. 163.
- Monti, R., Savino, R. and Lappa, M., 2000, Influence of geometrical aspect ratio on the oscillatory Marangoni convection in liquid bridges, *Acta Astronautica*, 47, p. 753-761.

- Munson, B. R., Young, D. F., Okushi, Theodore H., 1994, Fundamental of fluid mechanics, USA.
- Napalitano, L. O., Monti, R., Russo, O., 1986, Marangoni convection in one and two liquids floating zones, naturwissens chaften, p., 352.
- Ostrach, S., 1982, Low-gravity fluid flows, Ann. Rev. Fluid Mech., p. 313.
- Ostrach, S., 1977, Motion induced by capillarity, Physicochem. Hydrodyn., p. 571.
- Ostrach, S., 1979, Convection due to surface-tension gradients, COSPAR, Space Research, p. 563.
- Ostrach, S., Kamotani, Y., Lai, C., 1985, Oscillatory thermocapillary flows, Physicochem. Hydrodyn., p. 585.
- Ohtaka, M., Takagi, K., Natsui, H., Arai, T., Yod, S., 2001, Experimental study of thermocapillary flow in the half-zone liquid bridge of low Prandtl number fluid, NASDA, p. 145-180.
- Ostrach, S., Kamotani, Y., 1992, Surface tension driven convection experiment, USML-1 Spacelab Mission, June.
- Pearson, J. R. A., 1958, On convection cells induced by surface tension, J. Fluid Mech., 4, p. 489-501.
- Pimputkar, S. M., Ostrach, S., 1981, Convective effects in crystals grown from melt, Journal of Crystal Growth, p. 614.
- Preisser, F., Schwabe, D., Scharmann, A., 1983, Steady and oscillatory thermocapillary convection in liquid columns with free cylindrical surface, Journal of Fluid Mech., p. 545.



- Ringer, C., 1995, Eine fachbereits aus physik, Haupttermin, 87, Graz.
- Rohsenow, W. M., Hartneft, J. P., Cho, Y. I., 1998, Henbook of heat transfer, USA.
- Rupp, R., Muller, G., Neumann, G., 1989, Three dimensional time dependent modeling of a Marangoni convection in zone melting configuratins for GaAs, J. Crystal Growth, 97, p. 34-41.
- Serway, A, A., Beichner R, J., 2000, Physics for scientists and engineers with modern physics, Saunders College, USA.
- Schwabe, D., Scharmann, A., Preisser, F., Oeder, R., 1978, Experiments on surface tension driven flow in floating zone melting, Jour. of Crystal Growth, p. 305.
- Schwabe, D., Scharmann, A., Preisser, F., 1979, Steady and oscillatory Marangoni convection in floating zone under 1-g, Proc. of 3 rd European Sym. on Mat. Sci. in Space, ESASP-142, p. 327.
- Schwabe, D., Scharmann, A., 1979, Some evidence for the existence and magnitude of a critical Marangoni number for the onset of oscillatory flow in crystal growth melts, Journal. of Crystal Growth, p. 125.
- Schwabe, D., Scharmann, A., 1981, Marangoni convection in boat bnd crucible, Journal of Crystal Growth, p. 435.
- Schwabe, D., 1981, Marangoni effects in crystal growth melt, Physicochem Hydrodyn., 4, p. 263.
- Schwabe, D., Velten, R., Scharmann, A., 1990, The instability of surface tension driven flow in models for floating zones under normal and reduced gravity, Jour. of Cyrstall Growth, p. 1258.

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

Vargaftik, N. B., 1983, *Handbook of physical properties of liquids and gass*, USA, New York.

Wanschura, M., Shevtsove, V. M., Kuhlmann, H. C., Rath, H. J., 1995, Convective instability mechanisms in thermocapillary liquid bridges, *Phys. Fluids*, 7, p. 912-925.

Yamamoto, M., Torii, K., 1997, Theoretical examination for the onset of oscillatory Marangoni convection in liquid bridge, *J. Crystal Growth*, 182, p.485-492.