



FARKLI SOĞUK DUVAR SICAKLIKLARININ OSİLASYONLU YÜZEY GERİLİM KONVEKSİYONA GEÇİŞE ETKİLERİ

*(EFFECTS OF TRANSITION TO OSCILLATORY THERMOCAPILLARY
CONVECTION UNDER VARIOUS COLD WALL TEMPERATURES)*

Ela KATI*, Ramazan SELVER*

ÖZET/ABSTRACT

Bu çalışmada, dikdörtgen kap konfigürasyonu içerisindeki akışkanın farklı soğuk duvar sıcaklıkları altında kararlı yüzey gerilim konveksiyondan osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyona geçişi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel akışkan olarak kinematik viskozitesi 5 cSt olan silikon yağı kullanılmış ve bu akışkanın farklı şartlar altında kararlı akış ve sıcaklık osilasyonları incelenmiştir. Farklı şartlar için kritik sıcaklık farkı ölçülmüş ve akış şekilleri mikroskop sistemi sayesinde gözlenmiştir. Akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının osilasyona başlama noktasına olan etkisi araştırılmıştır.

In this study, the transition from the steady to oscillatory thermocapillary convection flow of a rectangular container configuration under various cold wall temperatures effects have been investigated experimentally. Steady flow and temperature oscillations were observed under various conditions using 5 cSt silicone oil as a test fluid. The critical temperature differences were measured for various conditions and flow patterns were observed by a microscope system. The effect of heat transfer from the liquid free surface to surrounding air on the onset of the oscillations was investigated.

ANAHTAR KELİMELELER/KEYWORDS

Yüzey gerilim konveksiyon, Marangoni konveksiyon, Kararlı ve osilasyonlu konveksiyon, Sıcaklık farkı, Dikdörtgen kap

Thermocapillary convection, Marangoni convection, Steady and oscillatory convection, Temperature difference, Rectangular container

* Süleyman Demirel Ün., Mühendislik-Mimarlık Fak., Makine Müh. Böl., Batı Kampüsü, ISPARTA

1. GİRİŞ

Hayatımızın her alanında yer alan ileri teknoloji cihazlarının hızlı gelişmesi, bu cihazların ana malzemesi olan yarı iletken malzemelerin kalitesinin artırılmasına ve nanoteknolojideki yeni gelişmelere bağlıdır. Yarı-iletken malzemelerin en çok kullanıldığı alan bilgisayar teknolojileri alanıdır. Yarı-iletken kristaller kullanılarak diyotlar, transistörler ve entegre devreler üretilmektedir. Entegre devreyi oluşturan çipler, yüzbinlerce devre elemanı bulundurabilmektedir. Bu entegre devreleri bilgisayarın, televizyonların, videoların, saatlerin, kameraların, hesap makinelerinin, otomobillerin, uçakların, robotların, uzay araçlarının ve günümüzde kullanılan tüm haberleşme sistemlerinin kalbini oluşturmaktadır. Bu nedenle yarı-iletkenler olmadan modern bir dünya düşünülemez kavramı ortaya çıkmıştır.

Günümüz şartlarında insanların yeni teknolojileri kolayca benimseyip, hızlı bir şekilde tüketmesi, endüstriyi ve bilim insanlarını sürekli yeni teknolojiler geliştirmeye teşvik etmektedir. Bu gelişimin temelini, daha kaliteli yarı iletken kristallerin üretilmesi oluşturmaktadır. Özellikle nanoteknoloji ve savunma sanayi uygulamaları yarı-iletken malzemelerin gelişmesini hızlandırmıştır.

Günümüzde yarı iletken malzemelerin üretiminin temelini oluşturan kristallerin kalitesinin artırılması için yapılan çalışmalarda yüzey gerilim konveksiyon hareketi ile elde edilen kristal yapının yarı iletken malzemeler için ihtiyaç duyulan en iyi kristal yapı olduğu ortaya konmuştur.

Yüzey gerilim hareketi değişik şartlar altında Ostrach tarafından incelenmiştir (Ostrach, 1977). Schwabe vd. yeryüzü şartlarında (yerçekimi ivmesinin 1g olduğu konumda) yüzen bölge konfigürasyonunda yüzey gerilim hareketi yapan akışkan üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır (Schwabe vd., 1978). Bu araştırmacılar deney akışkanı olarak NaNO_3 kullanmışlardır. Akışkan ile temas halinde bulunan sıcak duvarın yüzey sıcaklığı ile soğuk duvarın yüzey sıcaklığı arasındaki fark belirli bir değeri geçtikten sonra, akışkanın kararlı akış türünden periyodik osilasyonlu akış türüne geçtiğini gözlemişlerdir. Akışkanın kararlı akış türünden periyodik osilasyonlu akış türüne tam olarak geçtiği noktadaki sıcaklık farkı ise kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) olarak tanımlanmıştır.

Chun ve West, yeryüzü şartlarında (1g) yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonunu kullanarak kritik sıcaklık farkı değerini (ΔT_{kr}) ve akışkanın kararlı konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu konveksiyon hareketine geçişini hem deneysel hem de teorik olarak incelemişlerdir (Chun vd., 1979).

Bir çok araştırmacı kaliteli kristal üretiminde osilasyonlu akış hareketinin olumsuz etkileri üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu araştırmacılar, periyodik osilasyonun başladığı kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değerini tespit ederek, akışkanın fiziksel özelliklerini içeren boyutsuz kritik Marangoni sayısını (Ma_{kr}) elde etmişlerdir. Boyutsuz sayıdan dolayı bu tür konveksiyon, Marangoni konveksiyon olarak adlandırılır. Yine bu araştırmacılar; yüksek Prandtl sayısına ($Pr > 1$) sahip akışkanları kullanarak, kritik Marangoni sayısı (Ma_{kr}) değerinin 1×10^4 mertebesinde olduğunu tespit etmişlerdir. Buna karşılık Napolitano vd.'nin, düşük yerçekimi ivmesine sahip uzay laboratuvarında yüzen bölge konfigürasyonu kullanarak yaptıkları bir deneyde, kritik Marangoni sayısı (Ma_{kr}) 4×10^5 mertebesinde elde edilmesine rağmen periyodik osilasyona rastlanmamıştır (Napolitano vd., 1986).

Kamotani vd. yarım yüzen bölge konfigürasyonunu kullanarak yaptıkları çalışmalarda, yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanın çevresindeki hava hareketini nümerik olarak incelemişlerdir (Kamotani vd., 2001), (Kamotani vd., 2003). Ayrıca, osilasyona başlama noktasının akışkan yüzeyindeki ısı transfer değerlerine (ısı kaybı ve ısı kazancına) göre farklılık gösterdiğini deneysel olarak kanıtlamışlardır. Bahsedilen bu çalışmada, deney

akışkanının etrafına yatay vaziyette şeffaf plastik bir disk yerleştirildiğinde, havanın doğal konveksiyonundan kaynaklanan ısı transferi nedeniyle oluşan zararlı etkilerin azaldığını gözlemlemiştir.

Selver; farklı boyutsal oranlara sahip yarım yüzen bölge konfigürasyonunu kullanarak, ortam sıcaklığının yüzey gerilim hareketi yapan akışkanın kararlı halden osilasyonlu hale geçiş noktasına etkilerini deneysel olarak araştırmıştır (Selver, 2005). Ayrıca, soğuk duvar sıcaklık değerinin osilasyona başlama noktasına etkilerini de bir başka parametre olarak incelemiştir. Deneyler sonucunda, yüzeyde meydana gelen ısı kaybının artması durumunda osilasyona başlama noktasının düştüğünü ortaya koymuştur.

Yukarıda bahsedilen tüm araştırmacılar, kararlı yüzey gerilimli akıştan osilasyonlu yüzey gerilimli akışa geçiş olayını çeşitli yöntem ve şartlar altında incelemiştir. Çalışmalarda genel olarak, osilasyona başlama noktasına etki eden veya akışkan hareketinin homojenliğini bozan faktörleri azaltmaya yönelik uğraşlar vermişlerdir.

Lee ve Kamotani vd., sabit sıcaklık konfigürasyonunu kullanarak ilk deneysel çalışmaları yapmışlardır (Lee, 1990; Kamotani vd., 1992). Deneylerinde 3 mm yarıçaplı silindirik kap konfigürasyonunu kullanarak yüzey gerilimli akış hareketini incelemiştir. Kararlı ve osilasyonlu durumlarda akış ve sıcaklık alanları için detaylı tanımlamalar yapmışlar ve maksimum sıcaklık osilasyonlarının olduğu bölgeleri belirlemiştir. Ayrıca, boyutsal oranın osilasyonlu akışa etkilerini araştırmışlardır.

Schwabe vd., çok küçük boyutsal oranlarda sabit sıcaklık konfigürasyonları kullanarak kararlı yüzey gerilimli akış hareketini deneysel olarak gözlemiştir (Schwabe vd., 1992). Kamotani vd. çalışmalarındaki tüm sıcaklık gradienleri için tek hücreli akış alanları gözlemlerine rağmen, Schwabe seçtiği çok küçük boyutsal oranlar için çok hücreli akış alanları gözlemiştir (Kamotani vd., 1992), (Schwabe, 1992).

Lavalley vd., sabit sıcaklık konfigürasyonunda kararlı yüzey gerilimli akış hareketini deneysel olarak PIV (Particle Image Velocimetry) cihazı ile izlemişler ve yaptıkları nümerik hesaplamalarla uyumunu göstermişlerdir (Lavalley vd., 2001). Ayrıca, osilasyonlu durum için akışkan içerisindeki sıcaklık eş çizgilerinin periyodik değişimini inceleyerek, iki farklı osilasyon tipini gözlemiştir.

Sim, sabit sıcaklık konfigürasyonunu da içeren silindirik geometrilerin kullanıldığı genel bir çalışma yaparak, yüzey gerilimli akış hareketini, deneysel, teorik ve nümerik olarak incelemiştir (Sim, 2002). Bu çalışmada da, Lavalley vd.'nin çalışmasında olduğu gibi osilasyon mekanizması nümerik olarak iki farklı tipte gözlenmiş ve bu tiplerin sayılarının ve oluşum şekillerinin konfigürasyonun boyutsal oranları ile alakalı olduğu bildirilmiştir (Lavalley vd., 2001).

Sim ve çalışma grubu sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı konfigürasyonlarında, serbest yüzey deformasyonunun kararlı ve osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketine etkileri hakkında detaylı çalışmalar yapmışlardır (Sim, 2002; Sim vd., 2002; Sim vd., 2004). Bu çalışmalarında, yüzen bölge konfigürasyonlarında olduğu gibi serbest yüzey şeklinin veya kap içerisindeki akışkan hacminin osilasyona başlama noktasına önemli bir şekilde etki ettiğini göstermişlerdir.

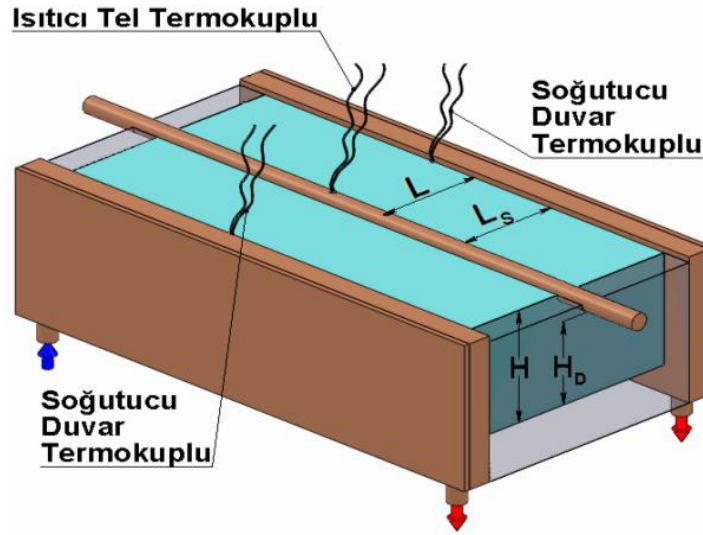
Simon Ostrach ve Yasuhiro Kamotani yönetiminde ki, sabit ısı akısı ve sabit sıcaklık konfigürasyonları kullanılarak yüksek maliyetli iki seri şeklinde "Surface Tension Driven Convection Experiment" adlı (STDCE-1, STDCE-2) deneyler uzay istasyonunda gerçekleştirilmiştir.

İlk deneyde (STDCE-1), Kamotani vd., kararlı yüzey gerilimli akış hareketini farklı sıcaklık gradienlerinde incelemiştir (Kamotani vd., 1993; Kamotani vd., 1994). İlk deneyin sonuçlarında, yeryüzünde Lee tarafından yapılan deneylere göre 5-6 kat daha büyük

Marangoni sayılarına ulaşılmasına rağmen osilasyona rastlanmamıştır (Lee, 1990). Bu durum, osilasyona başlama noktası için Marangoni sayısının tek parametre olmadığını göstermiştir.

İkinci deney serisinde (STDCE-2) ise, sabit ısı akısı ve sabit sıcaklık konfigürasyonları kullanılarak STDCE-1 deki deneyler tekrarlanmış ve yeryüzündeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır (Kamotani, 1999). Sonuç olarak, her iki konfigürasyon için de birinci seri ile benzer sonuçlara ulaşılmışlardır.

Bizim yapmış olduğumuz bu deneysel çalışmada ise konfigürasyon olarak Şekil 1’de görülen dikdörtgenler prizması şeklindeki deney seti, deney akışkanı olarak da yüksek Prandtl sayısına ve 5 cSt’lik viskoziteye sahip olan silikon yağı kullanılmıştır. Silikon yağı, Şekil 1’de görüldüğü gibi iki tarafından soğutucu bakır levhalar ile soğutulurken serbest yüzeyinin tam ortasından geçen ısıtıcı tel çubuk yardımıyla da ısıtılmıştır. Böylece yüzey gerilim hareketi yapan akışkanın kararlı yüzey gerilimli akıştan periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akışa tam olarak geçtiği nokta olarak tanımlanan kritik sıcaklık farkı (ΔT_{Kr}) değerleri araştırılmıştır. Bu nokta yarı iletken malzemelerin üretiminde kristal büyütülmesindeki homojen yapının bozulma noktası olarak isimlendirilir. Bizlerden önceki araştırmacıların yapmış olduğu çalışmalarda soğutucu duvar sıcaklığı deneyin yapıldığı ortam sıcaklığına eşit değerlerde tutulmuştur. Bizim yapmış olduğumuz bu çalışmada ise, soğutucu duvar sıcaklığı oda sıcaklığında ve oda sıcaklığının altındaki değerlerde tutularak, kritik sıcaklık farkı değerinin değişimi üzerine deneyler yapılmıştır. Ayrıca soğuk duvar sıcaklığının; dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisindeki akışkanın yüzey gerilim konveksiyon hareketinin yönü ile, batmazlık (doğal konveksiyon) hareketine etki eden yerçekimi vektörünün yönünün birbirine dik olduğu konfigürasyona etkileri araştırılmıştır.



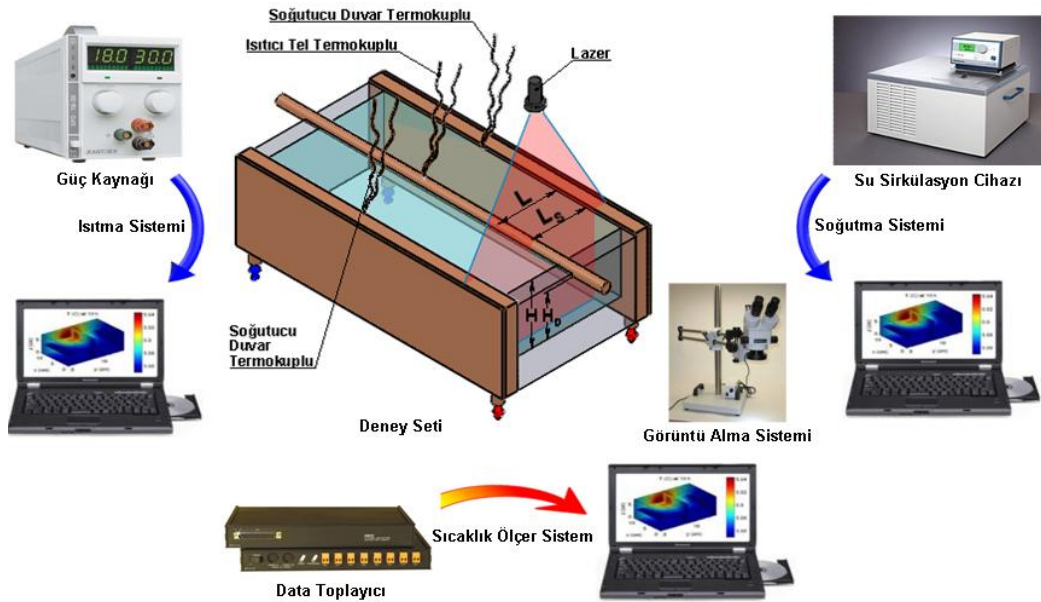
Şekil 1. Dikdörtgenler prizması konfigürasyonunun şematik gösterilişi

2. Deney Aparatları ve Prosedürü

Araştırmamızda kullanılan deney düzeneği Şekil 2’de verilmiştir. Bu düzenekte, karşılıklı iki dikey duvarı ile tabanı yalıtılmış ve diğer iki dikey duvarı soğutulmuş olan dikdörtgenler prizması şeklindeki konfigürasyonda akışkandaki doğal taşınım etkisini en aza indirmek için ısıtıcı krom-nikel tel çubuğun üst tarafta olduğu, yani ısıtıcı telin akışkan serbest yüzeyinin tam ortasından, serbest yüzeyi boyunca akışkana temas ettiği yöntem kullanılmıştır.

Akışkanın fiziksel özelliklerinden biri olan viskozite sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklık arttıkça viskozite değeri düşmektedir. Dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisindeki sıvı kristalin serbest yüzeyi boyunca uygulanan sıcaklık farkı, sıcaklık gradienlerini oluşturmaktadır. Bu sıcaklık gradienleri de serbest yüzeydeki hava-sıvı arakesiti boyunca viskozite gradienlerini oluşturmaktadır. Böylece teorik, analitik ve deneysel çalışmalarda yüzey gerilim konveksiyon akış olarak adlandırılan akış hareketi başlamış olmaktadır. Konfigürasyon içerisindeki sıvının hava-sıvı arakesiti boyunca viskozitesinin değişmesi (viskozite değeri sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru artmaktadır) ile başlayan akış hareketi, hacimsel akış hareketini tamamlayarak akışın sürekliliğini sağlamaktadır.

Şekil 2’de verilen şematik deney düzeneği; deney akışkanı, deney bölgesi ısıtma sistemi, deney bölgesi soğutma sistemi, termokupullar, sıcaklık ölçme sistemi ve akış görüntüleme sisteminden oluşmuştur.



Şekil 2. Deney aparatlarının şematik gösterimi

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

Deney düzeneğinde, ısıtmayı gerçekleştirmek amacıyla silikon yağının serbest yüzeyi ile temas halinde bulunan 2 mm dış çapında ve 20 mm uzunluğundaki içi boş krom-nikel malzeme içerisinde 0.5 mm çapındaki krom-nikel telden oluşan bir rezistans geçirilmiştir. Rezistans telin uçları Şekil 3’ te görüldüğü gibi ‘XATREX’ firması tarafından üretilen DC akım veren ve 18 volt 30 ampere kadar kombinasyonlu olarak çalışan programlanabilir güç kaynağına bağlanmıştır.

Deney düzeneğinde soğutucu duvarları oluşturan bakır levhalar; soğutma özelliği verecek ve deney anında deney akışkanı ile temas halindeki yüzey sıcaklığını sabit ve yüzeyel olarak homojen bir değerde tutacak şekilde tasarlanmıştır. Buna göre; bakır levhaların bir yüzeyine içerisinde soğutucu akışkanın geçebileceği kanallar açılmış ve bu yüzeylerin üstü ince birer bakır levha ile kapatılmıştır [Şekil 2,3]. Soğutucu bakır duvarların soğutulması için 0-300 °C

aralığında soğutma ve ısıtma yapabilen “Polyscience” firması tarafından üretilen 0.1 °C hassasiyete sahip su sirkülasyon cihazı kullanılmıştır.

Çizelge 1. 5 cSt viskoziteye sahip silikon yağının 25 °C’ deki fiziksel özellikleri (Selver, 2005)

Özellik	Birimler	Değer
Yoğunluk (ρ)	Kg/m ³	913
Isı İletim Katsayısı (k)	W/m.K	0.1088568
Isıl Yayılım Katsayısı (α)	m ² /s	7.42x10 ⁻⁸
Dinamik Viskozite (μ)	N.s/ m ²	4.4554x10 ⁻³
Kinematik Viskozite (ν)	m ² /s	4.88 x10 ⁻⁶
Yüzey Gerilim (σ)	N/m	19.7x10 ⁻³
Yüzey Gerilim Sıcaklık Katsayısı $ \sigma_T , \partial\sigma/\partial T $	N/m.K	-0.0587x10 ⁻³
Özgül Isı (C _p)	J/Kg.K	1716.588
Isısal Genleşme Katsayısı (β)	1/K	0.00105
Prandtl Sayısı (Pr)		67
Akışkanın Kinematik Viskozitesinin Değişimi [cSt]		
$\nu=8.185-0.2T+3.74\times 10^{-3}T^2-4.865\times 10^{-5}T^3+3.474\times 10^{-7}T^4-9.76\times 10^{-10}T^5$		
Not: Silikon Yağının fiziksel özelliklerinden biri olan yüzey gerilim değeri sıcaklığın fonksiyonu olup, sıcaklık değeri arttıkça yüzey gerilim değeri lineer olarak azalmaktadır. Bu azalmanın sayısal değeri ise tablo içerisindeki yüzey gerilim sıcaklık katsayısı $ \sigma_T = \partial\sigma/\partial T =-0.0587\times 10^{-3}$ [N/m.K] değerine göre değişmektedir.		

Şekil 2’de görülen krom-nikel malzemedan yapılmış 2 mm çapında ve 20 mm uzunluğundaki içi boş ısıtıcı duvarın sıcaklığı, soğutucu bakır duvarların sıcaklığı ve deneyin yapıldığı deney ortamının sıcaklığı; 0.0762 mm çapındaki ve 0.015 °C hassasiyetindeki bakır-constantan T tipi izoleli termokupllar ile ölçülmüştür.

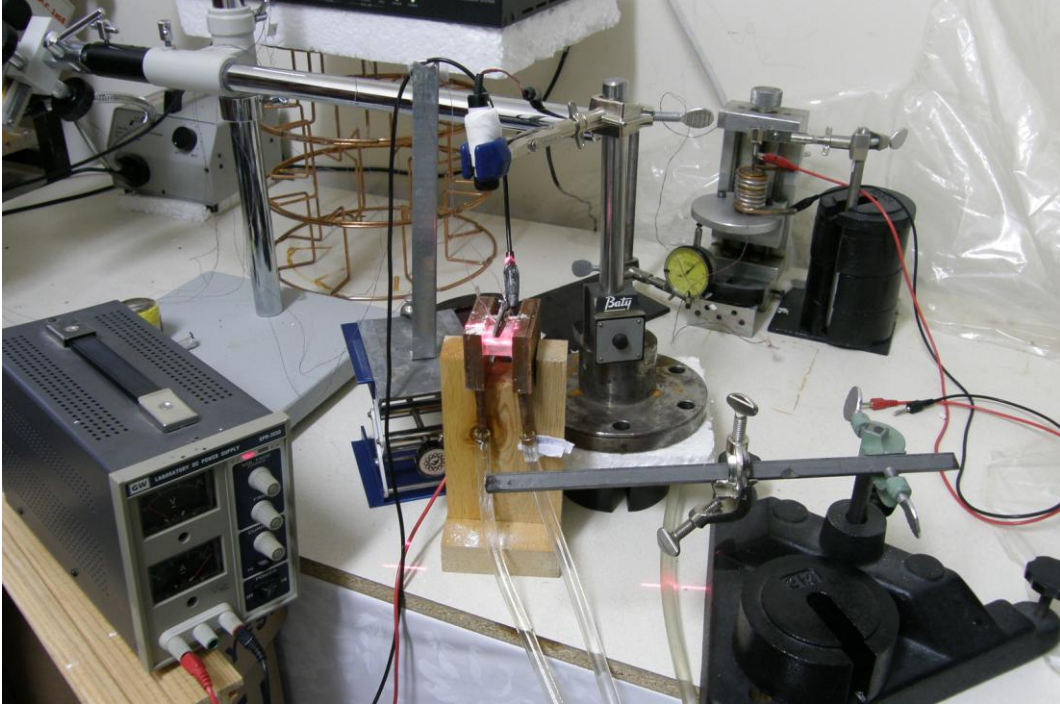
Isıtıcı ve soğutucu duvarlara yerleştirilen termokuplların ve ortam sıcaklığını ölçecek olan termokuplların diğer uçları “Omega” firması tarafından üretilen ve 0.1 °C hassasiyete sahip olan “OMB–TEMPSCAN-1100” data toplayıcısına bağlanmıştır. Şekil 2’de gösterilen bu cihaz 32 kanallıdır ve her kanalı saniyede 100 data toplama özelliğine sahiptir.

Deney akışkanı olarak kullandığımız silikon yağının saydamlığından dolayı konfigürasyon içerisinde yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan akışkan partikülleri gözle görülememektedir. Bu nedenle akışkan partiküllerinin daha rahat gözlemlenebilmesi için deney akışkanı içerisine iğne ucu ile eser miktarda 1 µm çapında Al₂O₃ eklenmiştir.

Tasarlanan konfigürasyonda meydana gelen yüzey gerilim konveksiyon hareketinin içerisine eklenen Al_2O_3 partiküllerinin y derinliği üzerindeki vorteks hareketlerinin tam olarak izlenebilmesi için tam z düzleminden geçen ve dalga boyu 630-670 μm olan kırmızı lazer ışığı kullanılarak deney kabı üzerine Şekil 2' de görüldüğü gibi 10 mikron kalınlığında lazer perdesi oluşturulmuştur. Deney kabının karşılıklı 2 kısa duvarı saydam, 7 mm kalınlığında ve ısı iletkenliği $\lambda=0.002$ [Watt/cm-h-K] olan plexiglas malzemeden yapılmıştır. Deney kabının içerisine konulan deney akışkanının saydam olması nedeni ile deney kabının içerisinden yüzey gerilim hareketi yapan akışkan partiküllerinin plexiglas malzemenin dışından çıplak gözle ve kamera ile izlenmesi mümkün değildir. Bu nedenden dolayı Şekil 2' de görülen lazerden çıkan lazer perdesi, plexiglas duvarlara paralel olacak şekilde deney kabının üzerine yerleştirilmiş ve deney akışkanı içerisine eser miktarda 1 μm çapında Al_2O_3 partikülleri eklenmiştir. Böylece deney kabı içerisinden yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan saydam deney akışkanı partikülleri ile birlikte eş zamanlı olarak hareket eden Al_2O_3 partiküllerinin hareketleri plexiglas malzemenin dışından çıplak gözle ve kamera yardımı ile izlenmiştir. Oluşturmuş olduğumuz lazer perdesi; deney anında saydam akışkan partikülleri ile aynı hareketi yapan Al_2O_3 partiküllerinin izlenmesine yardımcı olmaktadır.

DeneySEL çalışmalar titreşimsiz ve $T_R = +23$ °C'lik homojen bir sıcaklığa sahip olan deney odasında gerçekleştirilmiştir.

Deneylere başlamadan önce; deneyde kullandığımız dikdörtgenler prizması konfigürasyonu etil alkol ile temizlenmiştir. Daha sonra küçük bir el pompası yardımıyla konfigürasyon içerisine hava pompalanmış ve yüzeylerdeki küçük partiküllerin tamamen temizlenmesi sağlanmıştır. Böylece deney anında yüzey gerilim hareketi yapan akışkanın izlenmesinde, kirlilikten dolayı meydana gelecek olumsuz faktörler ortadan kaldırılmıştır. Akışkan; temiz bir enjektör ile yukarıda bahsedilen deney konfigürasyonunun içerisine ilave edilmiştir. Akışkanın akış hareketinin rahat bir şekilde izlenebilmesi için eser miktarda Al_2O_3 partikülleri iğne ucu ile yüzey gerilim hareketi yapan akışkana ilave edilmiştir. Daha sonra, Şekil 3' te görüldüğü gibi deney setinde kullanılan güç kaynağı, soğutucu duvarların sıcaklığını sabit tutan su sirkülasyon cihazı, lazer, sıcaklık ölçer cihaz, bilgisayarlar ve kamera dikdörtgenler prizması şeklindeki konfigürasyona bağlanıp kendi hassasiyetleri ölçüsünde çalışır konuma getirilmiştir.



Şekil 3. Deney ortamından bir görüntü

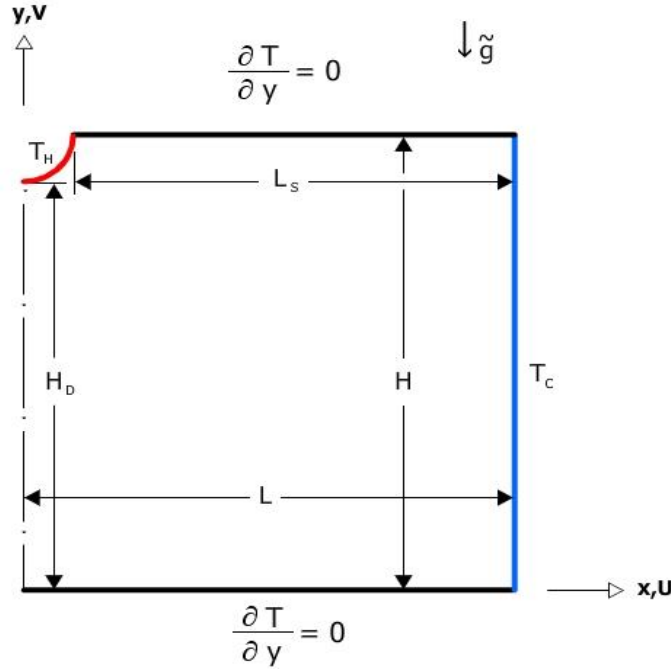
Deney için öncelikle soğutucu duvarların sıcaklığının istenilen sıcaklık değerlerine ulaşması amacı ile soğutmayı sağlayan su sirkülasyon cihazı açılmış ve istenilen sıcaklık değeri olan $T_C = +12 \text{ }^\circ\text{C}$ ye ayarlanmıştır. Mikroskop sistemi, akışkan hareketinin üstten izleneceği yere odaklanırken bir kamera da aynı yerin yatay doğrultusundaki akışkan hareketini izlemek amacıyla odaklanmıştır. Böylece kontrol hacmin hem üstten görünüşünü hem de yatay görüntüsünü aynı anda izleme imkanı sağlanmıştır. Bu aşamada ısıtıcı çubuğa ısı sağlayan güç kaynağına volt ve akım verilmeden, dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisindeki akışkanın yüzey gerilim hareketi yaptığı, deney akışkanının içerisinde ilave edilen Al_2O_3 partiküllerinin hareket etmesinden anlaşılmıştır. Daha sonra güç kaynağından ısıtıcı çubuğa kademeli olarak voltaj verilmeye başlanmıştır. Bu voltaj, güç kaynağının ısıtıcı çubuğa vermiş olduğu sıcaklık ile bağıntılı olup, hassasiyet derecesi ise bilgisayar ekranında görülen sıcaklık değerine göre manuel olarak ayarlanmıştır. Voltaj yükseltme kademesi ne kadar küçük değerlerde seçilirse deney anında meydana gelebilecek olan belirsizlikler o derece azalmış olur. Ayrıca güç adım adım artırılırken her adım sonrası bekleme zamanı akışkanın yayılım zamanına ya eşit ya da bundan büyük olmalıdır.

Akışkanın yayılım zamanı ise, $t = L_s^2 / \alpha$ ifadesi ile tanımlanır. Isıtıcı tel sıcaklığı kademeli olarak artırılırken dikdörtgenler prizması şeklindeki kabın içerisindeki deney akışkanı kararlı yüzey gerilim hareketini gerçekleştirmektedir. Bu sırada ısıtıcı çubuk sıcaklığı (T_H ve soğutucu duvar sıcaklığı (T_C) ölçülmüş ve ölçülen bu sıcaklıklar arasındaki fark $\Delta T = T_H - T_C$ denklemi ile belirlenmiştir.

3. ÖNEMLİ BOYUTSUZ PARAMETRELER

Şekil 4'te 2-boyutlu ve yarım kesitli hali görülen dikdörtgenler prizması şeklindeki konfigürasyon; H derinliğine ve 2L genişliğine sahip bir kabın içerisine doldurulmuş akışkandan oluşmaktadır. Dikdörtgenler prizması şeklindeki kabın karşılıklı iki duvarı $T_C = 12$

°C sıcaklığında sabit tutulurken, akışkan serbest yüzeyine temas halinde bulunan ve L genişliğinin %10 u kadarlık bir yarıçapa sahip olan ısıtıcı çubuk ise istenilen sıcaklıklarda sabit tutulmuştur.



Şekil 4. Konfigürasyonun iki boyutlu şematik gösterimi

Dikdörtgenler prizması şeklindeki konfigürasyon içerisinde yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan akışkanın akış karakterini bazı önemli boyutsuz parametreler tanımlamaktadır. Bu parametreler akışkanlar mekaniğinin temel kavramlarını oluşturan süreklilik, Navier-Stokes (N-S) ve enerji denklemlerinin ayrı ayrı boyutsuzlaştırılmasıyla çıkartılır. Katı, bu denklemleri ayrı ayrı boyutsuzlaştırarak bazı önemli boyutsuz sayıları elde etmiştir (Katı, 2007). Buna göre; tasarlanan konfigürasyon içerisinde gerçekleşen yüzey gerilim konveksiyon hareketinin z doğrultusu boyunca simetri olacağı düşünülürse.

x- doğrultusundaki boyutsuz N-S denklemi

$$\mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{y}} = -\frac{1}{\rho} \mathbf{Pr} \frac{\mathbf{Ar}^2}{\mathbf{V}^2} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\mathbf{Ar}}{\mathbf{Re}} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}^2} + \frac{1}{\mathbf{Re}} \frac{1}{\mathbf{Ar}} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \mathbf{y}^2}$$

y-doğrultusundaki boyutsuz N-S denklemi

$$\mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{y}} = -\frac{1}{\rho} \mathbf{Pr} \frac{1}{\mathbf{V}^2} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{y}} + \frac{\mathbf{Ar}}{\mathbf{Re}} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}^2} + \frac{1}{\mathbf{Re}} \frac{1}{\mathbf{Ar}} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial \mathbf{y}^2} + \frac{\mathbf{Gr}}{\mathbf{Re}^2 \mathbf{Ar}^2} \theta$$

Boyutsuz enerji denklemi ise;

$$\mathbf{u} \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{v} \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{y}} = \frac{1}{\mathbf{Pr}} \frac{\mathbf{Ar}}{\mathbf{Re}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \mathbf{x}^2} + \frac{1}{\mathbf{Re}} \frac{1}{\mathbf{Pr}} \frac{1}{\mathbf{Ar}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \mathbf{y}^2} \text{ şeklindedir.}$$

Deneysel olarak gerçekleştirilen yüzey gerilim konveksiyon hareketlerinin ve doğal konveksiyon hareketlerinin karakterlerini yukarıdaki N-S ve enerji denklemlerindeki boyutsuz sayılar belirlemektedir.

Yukarıdaki boyutsuz sayılarda, H akışkanın dikey derinliği, L ısıtıcı tel merkezi ile soğutucu duvar arasındaki yatay mesafe, ν akışkanın kinematik viskozitesi, α akışkanın ısısal

yayılma katsayısı, μ akışkanın dinamik viskozitesi, $|\sigma_T|$ akışkanın yüzey gerilim sıcaklık katsayısı, ΔT akışkana uygulanan sıcaklık farkı değeri ($\Delta T = T_H - T_C$), θ boyutsuz sıcaklık değeri ($\theta = (T_H - T_C) / (\Delta T)$), β akışkanın hacimsel genişleme katsayısı, g ise yerçekimi ivmesi değeridir. Ayrıca Ar konfigürasyonun boyutsal oranı olup, Prandtl sayısı, Yüzey gerilim Reynolds sayısı, Marangoni sayısı ve Grashof sayısı akışkanın fiziksel özelliklerini içeren boyutsuz parametrelerdir. Bu boyutsuz parametreler yüzey gerilim hareketi yapan akışkan için akış karakterini etkileyen en önemli parametrelerdir. Marangoni sayısı, akışkanın kararlı yüzey gerilim hareketinden, periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçişinde önemli bir rol oynamaktadır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

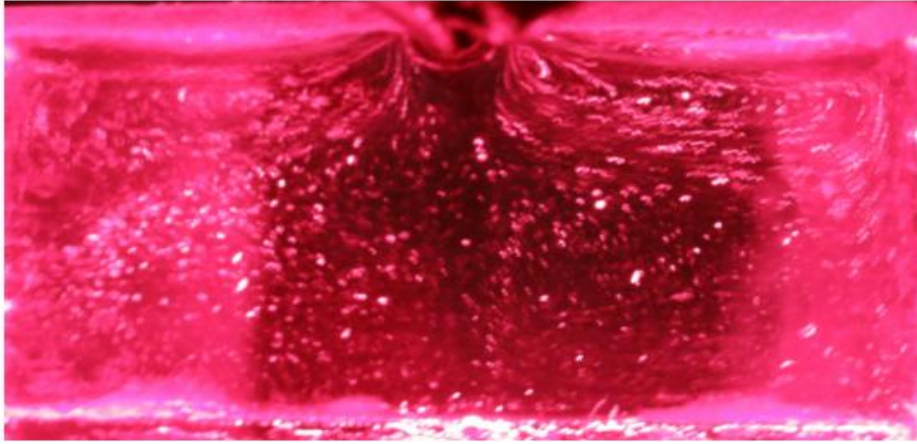
Dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisindeki akışkan yüzeyinin bölgesel olarak ısıtıldığı konfigürasyonda, yerçekimi vektörü ile yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan akışkanın hız vektörünün birbirlerine dik olduğu durumda oluşan batmazlık kuvveti Şekil 5'te açık bir şekilde görülmektedir. Bu konfigürasyonda akışkan partikülü; sıvı serbest yüzeyinde ısıtıcı tel bölgesinden soğutucu bölgeye doğru yüzey gerilim konveksiyon hareketi yaparak ilerlemektedir. Deney akışkanın serbest yüzeyinde ilerleyen akışkan, daha önceden bahsettiğimiz boyutsuz parametrelerin etkisi altındadır.

Yüzey Gerilim Konveksiyon	{	$Ar = \frac{H}{L}$	→	Boyutsal Oran
		$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$	→	Prandtl Sayısı
		$Re_{\sigma} = \frac{ \sigma_T (\Delta T)L}{\nu \mu}$	→	Reynolds Sayısı
		$Ma = Pr Re_{\sigma} = \frac{ \sigma_T (\Delta T)L}{\alpha \mu}$	→	Marangoni Sayısı
		$V_{Ma} = \frac{\sigma_T \Delta T}{\mu}$	→	Marangoni Hız

Doğal Konveksiyon	{	$Ar = \frac{H}{L}$	→	Boyutsal Oran
		$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$	→	Prandtl Sayısı
		$Gr = \frac{\beta_T g (\Delta T) L^3}{\nu^2}$	→	Grashof Sayısı

$$Ra = Gr Pr = \frac{\beta_T g (\Delta T) L^3}{\nu \alpha} \longrightarrow \text{Rayleigh Sayısı}$$

$$V_g = \frac{\beta_T g (\Delta T) L^2}{\nu} \longrightarrow \text{Doğal Konveksiyon Hızı}$$



Şekil 5. Deneysel konfigürasyon içerisinde yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan akışkanın deneysel akım hatları görüntüsü

Hemen hemen her akışkan için viskozite değeri sıcaklık artışı ile azalmaktadır. Serbest yüzey boyunca oluşan sıcaklık değişimi ile meydana gelen viskozite değişimi, serbest yüzeye paralel olarak sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru Şekil 5' teki gibi bir akışa sebep olmaktadır. Bu akış karakterinde yüzey gerilim kuvvetlerinin şiddeti Marangoni sayısı ile, batmazlık kuvvetlerinin şiddeti ise Grashof sayısı ile belirlenir.

Yeryüzünde yüzey gerilim kuvvetleri her yerde ve her zaman batmazlık kuvvetleri ile birlikte var olacaktır. Yapmış olduğumuz çalışmada, batmazlık kuvvetlerinden meydana gelen doğal konveksiyon kuvvetlerinin yüzey gerilim kuvvetleri üzerindeki olumsuz etkisini en aza indirebilmek için, sıvı serbest yüzeyinin tam ortasından serbest yüzey boyunca ısıtılan ve yandaki iki uzun kenarları soğutucu duvar olarak kullanılan dikdörtgenler prizması konfigürasyonu tercih edilmiştir.

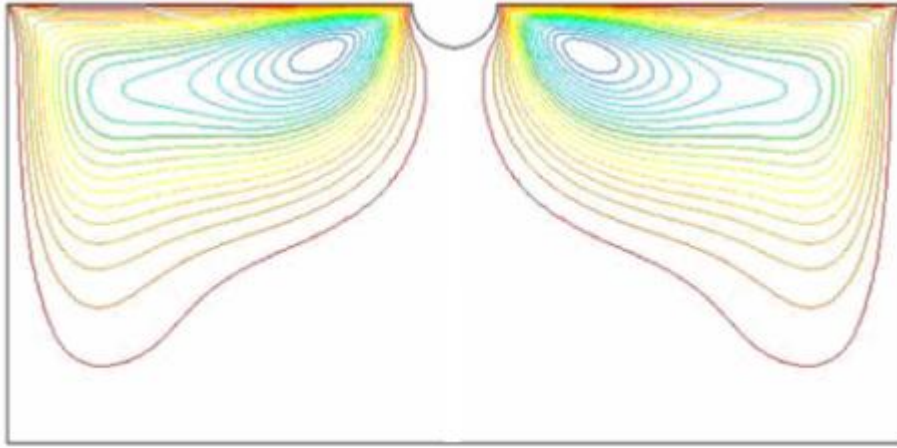
Çalışmamızda, deney odası sıcaklığının $T_R = + 23 \text{ }^\circ\text{C}$ değerinde ve boyutsal oranın $Ar=1.0$ olduğu durumda farklı soğuk duvar sıcaklık değerlerinin yüzey gerilim konveksiyon hareketlerine etkileri incelenmiştir.

Literatürde yüzey gerilim konveksiyon hareketi Marangoni Konveksiyon olarak bilinmektedir. Bunun nedeni yüzey gerilim konveksiyon hareketinin karakterinin Marangoni sayısı tarafından belirlenmesidir. Yukarıda, önemli boyutsuz parametreler bölümünde bahsedildiği gibi Marangoni sayısının önemli parametrelerinden biriside kritik sıcaklık farkıdır. Bu parametre yüzey gerilim konveksiyon hareketinin kararlı halden periyodik osilasyonlu hale geçişinde etkilidir. Yüzey gerilim konveksiyonunda Marangoni sayısı sabit olduğundan dolayı, konfigürasyonun boyutsal oranı $Ar=1.0$ değerinde sabit tutulurken, akışkanın serbest yüzeyindeki uzunluk (L) değeri de sabit kalmaktadır. Böylece yapmış

olduğumuz deneyde Marangoni sayısı içerisindeki sıcaklık farkı (ΔT) kararlı yüzey gerilim konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçiş için önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sıcaklık farkı deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı (T_R) ile soğuk duvar sıcaklıklarından (T_C) etkilenmektedir. Deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı $T_R=+23$ °C de ve deney konfigürasyonundaki soğutucu duvar sıcaklığı $T_C=+12$ °C de sabit tutulup, her kademede akışkanın hesaplanan yayılım zamanı ($t = L_s^2 / \alpha$) beklendikten sonra ısıtıcı tel sıcaklığı yavaş yavaş kademeli olarak arttırılmıştır. Bu esnada akışkan, ısıtıcı tel sıcaklığı ile soğutucu duvar sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından dolayı serbest yüzeyi boyunca yüzey gerilim konveksiyon hareketine maruz kalmaktadır.

Başlangıçta akışkanın serbest yüzeyi boyunca başlayan hareketin ivmeli bir hareket olmasından dolayı akışkan partikülleri aşağıya doğru yönelmektedirler. Aşağıya doğru yönelen akışkan partikülleri soğuk duvarı takip ederek akışkanın derinliklerine doğru batmakta ve bu hareket sayesinde ısınan iç bölgedeki akışkan partikülleri (konveksiyon ve kondüksiyon yolu ile) doğal konveksiyon etkisiyle yukarıya doğru ilerlemekte ve akış hareketinin devamlılığını sağlamaktadır. Bu hareket esnasında sıcaklık farkı kritik sıcaklık farkından düşük olduğundan dolayı akışkan, kararlı haldeki yüzey gerilim konveksiyon hareketini sürdürür. Bu kararlı haldeki yüzey gerilim konveksiyon hareketi numerik olarak Fluent programı kullanılarak $T_C= + 15$ °C, $T_H= + 40$ °C ve $T_R= + 23$ °C deki değerlerine göre Katı tarafından çözdürülmüş ve Şekil 6' da akım hatları gösterilmiştir (Kati, 2009).

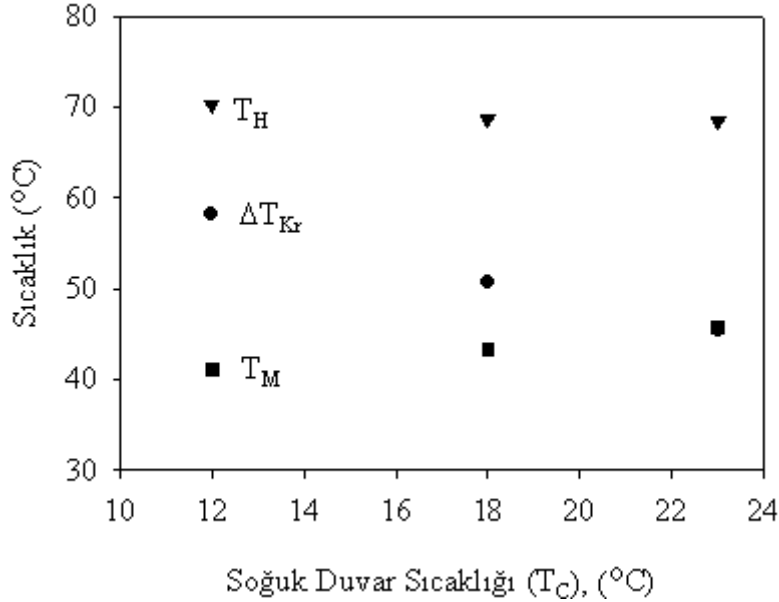
Nümerik olarak iki boyutlu yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan akışkanın akım hatları (Şekil 6) ile aynı şartlar altında deneysel olarak üç boyutlu yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan akışkanın akım hatları (Şekil 5) birbirleri ile tam bir benzerlik görülmüştür.



Şekil 6. Dikdörtgenler prizması şeklindeki konfigürasyon içerisinde kararlı yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan akışkanın akım hatları ($T_C= + 15$ °C, $T_H= + 40$ °C ve $T_R= + 23$ °C) (Kati, 2009)

Isıtıcı duvar sıcaklığı lineer olarak arttırılırken $T_H= +70,30$ °C değerine ulaşıldığında kararlı haldeki yüzey gerilim konveksiyon hareketi Şekil 5'te açıklandığı konumdan çıkarak aniden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçmiştir. Periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçişte ısıtıcı duvar sıcaklığı ($T_H= +70,30$ °C) ile $T_C= +12$ °C' de sabit tutulan soğutucu duvar sıcaklığı arasındaki fark bize kritik sıcaklık farkını ($\Delta T_{Kr}= +58,30$ °C) vermektedir. Ortam sıcaklığının $T_R= +23$ °C de sabit

tutulduğu bir konfigürasyonda; farklı soğuk duvar sıcaklıklarındaki kritik sıcaklık farkı değerleri, ısıtılan telin sıcaklık değerleri ve akışkanın ortalama sıcaklık değeri $T_M=1/2(T_H+T_C)$ Şekil 7' te gösterilmiştir.



Şekil 7. Kritik sıcaklık farkı değerinin soğuk duvar sıcaklık değerleriyle değişimi

Şekil 7'de, soğuk duvar sıcaklığı değişimine göre ısıtıcı tel sıcaklığı değişimi hemen hemen sabit kalırken, kritik sıcaklık farkı değerlerinin değişimi görülmektedir. Soğuk duvar sıcaklığı artarken kritik sıcaklık farkı değerleri azalmaktadır. Bu azalmaya neden olan sebep aşağıdaki paragraflarda açıklanmıştır. Periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketinin başladığı nokta olan kritik sıcaklık farkı (ΔT_{Kr}) değerleri tespit edildikten sonra ısıtıcı tel sıcaklığı yine lineer olarak artırılarak periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketi izlenmeye devam edilmiştir.

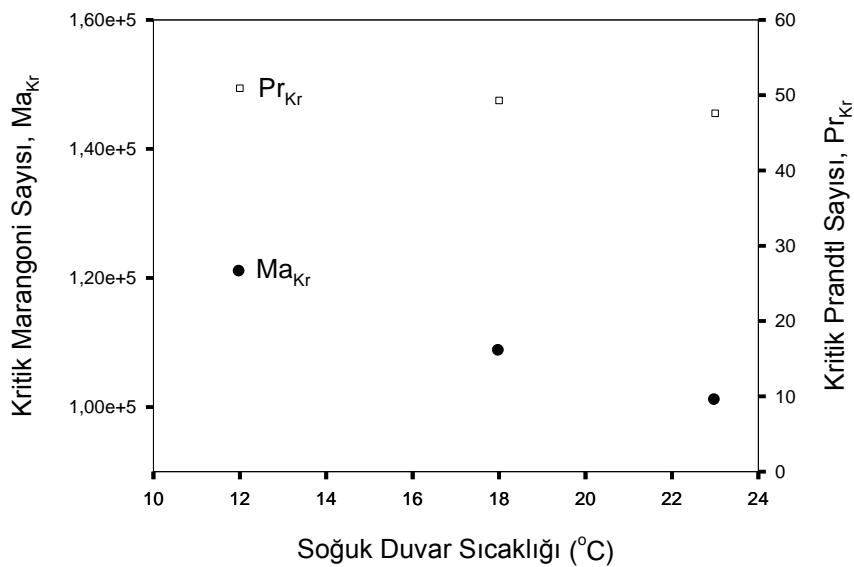
Periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyonlu akış hareketi devam ederken ısıtıcı tel sıcaklığı lineer olarak yavaş yavaş arttırılmaya devam edildiğinde ise belirli bir sıcaklık farkından sonra periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketi kaotik yüzey gerilim konveksiyon akış hareketine geçmektedir. Bu hareket tamamıyla istenilmeyen bir harekettir. Bu karmaşık akış hareketinde, yüksek sıcaklığa sahip olan akışkanın bir kısmı buharlaşarak yok olmaktadır. Buharlaşıp yok olan akışkandan dolayı deney başlangıcındaki akışkanın serbest yüzeyi düz yatay konumdan konkav konuma gelmekte ve toplam akışkan hacmi de değişmektedir. Bu değişim akışkanın kaotik akış hareketindeki transport fenomenlerini de etkilemektedir. Bu aşamadan sonra deney durdurulmuş ve bir sonraki soğutucu duvar sıcaklığı olan $T_C= +18$ °C için deney düzeneği tamamen temizlenip taze akışkan deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Daha sonra $T_C= +12$ °C de yapılan işlemler ve prosedür, $T_C= +18$ °C ve $T_C= +23$ °C için de sırayla tekrarlanmış ve Şekil 7'deki sayısal değerler elde edilmiştir. Genel olarak Şekil 7 incelendiğinde soğutucu duvar sıcaklığı arttıkça kararlı yüzey gerilim konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçiş noktasını belirleyen ΔT_{Kr} değerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalış değeri ise şöyle ifade edilir; deney başlangıcında soğutucu duvar sıcaklığı, ısıtıcı tel sıcaklığı ve akışkan sıcaklığı deneyin yapıldığı ortam sıcaklığındadır ($T_R= +23$ °C). Isıtıcı tel

sıcaklığı yavaş yavaş lineer olarak arttırılmaya başlandığında termik denge konumunda olan akışkan harekete geçmektedir. Deneysel sırasındaki herhangi bir anda T_H değerinin T_R değerinden büyük olmasından dolayı akışkanın aritmetik ortalama değeri $T_M = 1/2 (T_H + T_C)$ ortam ve soğutucu duvar sıcaklıklarından büyük 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 artışı akışkanın kararlı yüzey gerilim konveksiyondan periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyona geçişteki kritik sıcaklık farkı değerinin düşmesine neden olacaktır. Bu ifadeye göre; soğutucu duvar sıcaklığının düşük olmasıyla meydana gelen ısı kaybı, soğutucu duvar sıcaklığının yüksek olmasıyla meydana gelen ısı kaybından daha düşük olmaktadır. Matematiksel olarak; $[\Delta T_{T_C=+12^\circ\text{C}} = (T_{M_{T_C=+12^\circ\text{C}}} - T_R)]$ ve $[\Delta T_{T_C=+23^\circ\text{C}} = (T_{M_{T_C=+23^\circ\text{C}}} - T_R)]$ karşılaştırıldığında $[\Delta T_{T_C=+12^\circ\text{C}} < \Delta T_{T_C=+23^\circ\text{C}}]$ olduğu görülmektedir.

Yukarıdaki matematiksel ifadeden de anlaşıldığı gibi ısı kaybı, akışkanın serbest yüzeyinin ortalama sıcaklığı ile deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı değerine bağlı olduğundan dolayı akışkan serbest yüzeyi sabit kalmak şartıyla, $Q_{T_C=+12^\circ\text{C}} < Q_{T_C=+23^\circ\text{C}}$ olacaktır. Dolayısıyla sıcaklık farkı değerinin küçülmesiyle ısı transferi azalmakta, diğer bir ifade ile akışkan serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama geçen ısı miktarı soğutucu duvar sıcaklığı büyüdükçe artmaktadır.

Şekil 8’ de; Şekil 7’ de gösterilen kritik sıcaklık farkı değerlerinin, boyutsuz Marangoni sayısına dönüştürülmesinden elde edilen kritik Marangoni sayılarının soğuk duvar sıcaklıkları ile değişimi gösterilmiştir.

Buna göre boyutsuz kritik Marangoni sayısı kritik sıcaklık farkı değerini içermekte olup; silikon yağının kinematik viskozitesinin değişimini veren formül (Çizelge 1) kullanılarak, ortalama akışkan sıcaklığı (T_M) ile hesaplanmıştır. Şekil 8’ de görüldüğü gibi soğuk duvar sıcaklığı arttıkça boyutsuz kritik Marangoni sayısı ve kritik Prandtl sayısı azalmaktadır.



Şekil 8. Kritik Marangoni ve Kritik Prandtl sayılarının soğuk duvar sıcaklık değerleriyle değişimi

Sonuç olarak; dikdörtgenler prizması şeklindeki konfigürasyon kullanılarak yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanın kararlı haldeki yüzey gerilim konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketine geçiş noktası olan kritik sıcaklık farkı değerinin, akışkanın serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama olan ısı kaybı değerine bağlı olduğu ve bu ısı kaybı değerinin ise soğutucu duvar sıcaklığına bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Buna göre sıvı serbest yüzeyinde 2 çeşit ısı transferi oluşmaktadır. Bunlardan biri konveksiyon yoluyla diğeri ise radyasyon yoluyla olan ısı transferidir. Radyasyon yoluyla olan ısı transferini ihmal edersek, konveksiyon yoluyla olan ısı transferi de 2 şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar, akışkanın kendi içerisindeki konveksiyon hareketinden meydana gelen ısı transferi ve ortamla serbest yüzey arasında meydana gelen ısı transferidir. Akışkanın serbest yüzeyi ile ortam arasındaki ısı transferi 2 kısımdan oluşmaktadır. Bunun nedeni soğuk duvar sıcaklığının ortam sıcaklığının altında olmasıdır. Buna göre sıcak duvar ile soğuk duvar arasında bulunan ve ortam sıcaklığına eşdeğer sıcaklıkta olan nokta ısı transferini iki kısma bölmektedir. 1. kısım ısı kaybının olduğu kısımdır. Bu kısım ısıtıcı yüzeyle ortam sıcaklığının bulunduğu nokta arasındaki kısımdır. Bu kısımda kaybolan ısının ortalama ısı akısı yaklaşık olarak $70 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerindedir. Ortam sıcaklığı ile soğuk duvar arasında olan ikinci kısımda ise ortamdan deney akışkanına ısı kazancı meydana gelmektedir ve bu ortalama ısı akısı da yaklaşık olarak $40 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerindedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından 1586-YL-07 nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimine teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Chun C. H., Wuest W. (1979): “Experiments on Transition from Steady to Oscillatory Marangoni Convection of a Floating Zone Under Reduced Gravity Effect”, *Acta Astronautica*, 6, s. 1073-1082.
- Kamotani Y., Lee J. H., Ostrach S., Pline A. (1992): “An Experimental Study of Oscillatory Thermocapillary Convection in Cylindrical Containers”, *Physics of Fluids A*, 4, s. 955-962.
- Kamotani Y., Ostrach S., Pline A. (1993): “A Thermocapillary Convection Experiments in Microgravity”, *Heat Transfer in Microgravity* (Avedesian, C.T., and Arpacı, V.A., eds) ASME, 289, s. 23-30.
- Kamotani Y., Ostrach S., Pline A. (1994): “Analysis of Velocity Data Taken in Surface Tension Driven Convection Experiment in Microgravity”, *Physics of Fluids*, 6, 11, s. 3601-3609.
- Kamotani Y. (1999): “Thermocapillary Flow Under Microgravity–Experimental Results”, *Advanced Space Research*, 24, 10, s. 1357-1366.
- Kamotani Y., Wang L., Hatta S., Selver R., Yoda S. (2001a): “Effect of Free Surface Heat Transfer on Onset of Oscillatory Thermocapillary Flow of High Prandtl Number Fluid”, *Journal of Japan Society of Microgravity Applications*, 18, 4, s. 283-288.
- Kamotani Y., Wang L., Hatta S., Selver R., Bhunia P. S., Yoda S. (2001b): “Effect of Old Wall Temperature on Onset of Oscillatory Thermocapillary Flow”, 39 th AIAA Aerospace Sciences Meeting and 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*, 46, s. 3211-3220.
- Katı E. (2007): "Yüzey Gerilim Hareketi Yapan Akışkanın Sıcaklık Profilinin Matematiksel Çıkarılması", SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Semineri, Isparta.
- Katı E. (2009): "Yarı İletken Malzemeler İçin Termokapiler Konveksiyon Üzerine Deneysel Bir Çalışma", SD. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Lavalley R., Amberg G., Alfredsson H. (2001): "Experimental and Numerical Investigation of Nonlinear Thermocapillary Oscillations in a Annular Geometry", *European Journal of Mechanics B-Fluids*, 20, s. 771-797.
- Lee J. H. (1990): "An Experimental Study of Thermocapillary Convection in a Cylindrical Container", Case Western Reserve University, Ms. thesis, Cleveland, Ohio.
- Napalitano L. G., Monti R., Russo G. (1986): "Marangoni Convection in One and Two Liquids Floating Zones", *Naturwissenschaften*, 73, s. 352-360.
- Ostrach S. (1977): "Motion Induced by Capillarity", *Physico-Chemical Hydrodynamics*, 2, s. 571-589.
- Schwabe D., Scharmann A., Preisser F., Oder R. (1978): "Experiments on Surface Tension Driven Flow in Floating Zone Melting", *Journal of Crystal Growth*, 43, s. 305-312.
- Schwabe D., Moller V., Schneider J., Scharmann A. (1992): "Instabilities of Shallow Dynamic Thermocapillary Liquid Layers", *Physics of Fluids A*, 4, 11, s. 2368-2381.
- Selver R. (2005): "Experiments on the Transition From the Steady to the Oscillatory Marangoni Convection of a Floating-Zone Under Various Cold Wall Temperatures and Various Ambient Air Temperature Effects", *Microgravity Science and Technology*, 17, 4, s. 25-35.
- Sim B.C. (2002): "Thermocapillary Convection in Cylindrical Geometries", The State University of New Jersey, PhD thesis, New Jersey.
- Sim B. C., Zebib A. (2002): "Thermocapillary Convection with Undeformable Curved Surfaces in Open Cylinders", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, s. 4983-4994.
- Sim B. C., Kim W. S., Zebib A. (2004): "Axisymmetric Thermocapillary Convection in Open Cylindrical Annuli with Deforming Interface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, s. 5365-5373.