



SİLİKON YAĞI AKIŞKANININ FARKLI ORTAM SICAKLIKLARINDA YÜZEY GERİLİMLİ KONVEKSİYON AKIŞ HAREKETLERİNİN İNCELENMESİ

ELA KATI SUNAY^{1*}, RAMAZAN SELVER¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

Anahtar Kelimeler

*Silikon Akışkanı,
Viskozite,
Yüzey Gerilimi,
Yarı-iletken,
Yerçekimi.*

Özet

Hayatımızın hemen hemen her alanında kullandığımız elektronik ürünlerin ana maddesi, yarı iletken adı verilen malzemelerdir. Bu nedenle yarı-iletkenlerin üretim kalitesi önem arz etmektedir. Yüzey gerilimli konveksiyon ile elde edilen kristalin yapısı; yarı iletkenler için en mükemmel kristal yapıdır. Yapmış olduğumuz çalışmada; 5 cSt kinematik viskoziteye sahip silikon akışkanı kullanılarak, dikdörtgen kap konfigürasyonu içerisinde yüzey gerilimli konveksiyon hareketi oluşturulmuştur. Bu yüzey gerilimli konveksiyon hareketi içerisinde yerçekimi vektörü nedeniyle oluşan doğal konveksiyonun etkilerini incelemek amacıyla 2 farklı ortam sıcaklığı ve iki farklı yerçekimi değeri (1g ve mikro yerçekimi değerlerinde) kullanılarak 4 ayrı numerik çözüm gerçekleştirilmiş ve bu çözümler içerisinde oluşan akım çizgileri incelenerek bir birleriyle karşılaştırılmıştır. Farklı ortam sıcaklıkları ve farklı yerçekimi vektörü şartlarında meydana gelen kombinasyonlar için gerçekleşen iki boyutlu konfigürasyonlar içerisinde, yüzey gerilim konveksiyonu yapan akışkanların akım hatlarında ve eş sıcaklık eğrilerinde farklılıkların meydana geldiği görülmüştür. Ortam sıcaklığı yükseldikçe tek hücreli vortex konveksiyonundan çift hücreli vortex konveksiyonuna geçiş eğilimi olduğu görülmüştür.

INVESTIGATION OF SURFACE TENSION CONVECTION FLOW OF SILICONE OIL AT DIFFERENT AMBIENT TEMPERATURES

Keywords

*Silicone Oil,
Viscosity,
Surface tension,
Semiconductor,
Gravity.*

Abstract

The main material of electronic products that we use in almost every area of our lives are products called semiconductors. Therefore, the production quality of semiconductors is important. The crystalline structure obtained by surface tension convection; It is the most perfect crystal structure for semiconductors. In our study; Surface tension convection motion was created in a rectangular container configuration by using a silicon fluid with a kinematic viscosity of 5 cSt. In order to examine the effects of natural convection caused by the gravity vector in this surface tension convection, 4 different numerical solutions were performed using 2 different ambient temperatures and two different gravity values (at 1g and microgravity values), and the streamlines formed in these solutions were examined and compared with each other. It has been shown that there are differences in the flow lines and isotherms of the fluids that make surface tension convection within the two-dimensional configurations realized for the combinations occurring under different ambient temperatures and different gravity vector conditions. It has been observed that as the ambient temperature rises, it tends to shift from unicellular vortex convection to bicellular vortex convection.

Alıntı / Cite

Katı Sunay E., Selver R., (2023). Silikon Yağı Akışkanının Farklı Ortam Sıcaklıklarında Yüzey Gerilimli Konveksiyon Akış Hareketlerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(2), 755-767.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Katı Sunay/ E. Katı Sunay, 0000-0002-4135-5241
R. Selver/ R. Selver, 0000-0002-9239-8700

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	23.05.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	28.02.2023
Kabul Tarihi / Accepted Date	17.03.2023
Yayın Tarihi / Published Date	28.06.2023

* İlgili yazar/Corresponding author: elakati@sdu.edu.tr

INVESTIGATION OF SURFACE TENSION CONVECTION FLOW OF SILICONE OIL AT DIFFERENT AMBIENT TEMPERATURES

Ela KATI SUNAY^{1†}, Ramazan SELVER¹

¹ Suleyman Demirel University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Isparta, Turkey

Highlights

- Crystal structure obtained by surface tension convection
- It is the most perfect crystal structure for semiconductors.
- For this crystal structure, numerical analysis was investigated in different conditions in a rectangular container configuration using a silicon fluid with a surface tension convection action and a kinematic viscosity of 5 cSt.

Purpose and Scope

The most important process affecting the quality of crystals forming semiconductor materials is mass and heat exchange, which is effective in the crystal development process. This effect; It is formed by natural convection and surface tension convection. Crystalline structure obtained by surface tension convection; It is the most perfect crystal structure obtained for semiconductor products. On the other hand, natural convection, which occurs with the effect of gravity vector, occurs in surface tension convection, negatively affecting the crystal quality. Therefore, studies in this field; concentrated on improving the crystal quality by reducing the negative effects of natural convection to low levels.

Design/methodology/approach

In our study; Surface tension convection and natural convection of the silicone oil in the rectangular prism shaped container were investigated and investigated in two dimensions by numerical calculation. According to this situation; The state steady flow lines and isotherm lines of the surface tension convection of the fluid were investigated under low (μg) and normal (1g) gravity and at different ambient temperatures where the experiment was performed. In cases where the gravity vector is normal 9.81m/s^2 and $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$, 2 different configurations are selected by selecting cold wall temperature (T_c) 15°C , hot wall temperature (T_H) 40°C and room temperature (T_r) 285 K and 330 K, respectively, created and solved numerically with the Boussinesq approach.

Findings

In our study, the silicon fluid with a kinematic viscosity of 5cSt in the rectangular prism and the air above it; Surface tension convection and natural convection movements, streamlines and isotherm curves were investigated in two dimensions at different ambient temperatures and at two different gravity vector values and compared with each other. In comparison, surface tension convection was found to be more effective (dominant) than natural convection. As the ambient temperature increased, there was a trend towards a shift from unicellular vortex convection to bicellular vortex convection.

Originality

The originality of our research is that it is an initial study for us and the researchers who do research on semiconductor materials that will come after us.

[†] Corresponding author: elakati@sdu.edu.tr, +90-246-211-1249

1. Giriş (Introduction)

İnsanlık, varoluşundan itibaren yaşam kalitesini arttırmak amacıyla sürekli yeni arayışlar, buluşlar ve gelişmeler içerisinde bulunarak birçok önemli buluşa imza atmıştır. Bu buluşların en büyüğü, elektronik ürünlerin icadı sonucu dijital çağın ortaya çıkmasıyla görülmüştür. Bu elektronik ürünlerin ana ürünü, yarı-iletken adı verilen malzemelerdir. Yarı-iletkenler, teknolojinin her alanında kullanılmakta ve bu nedenle üretim kalitesi önem arz etmektedir. Günümüzde birçok araştırmacı, yarı iletken malzeme kalitesini arttırmaya yönelik çalışmalar yapmaktadır.

Yarı iletken malzemeleri oluşturan kristallerin kalitesini etkileyen en önemli süreç, kristal geliştirme sürecinde tesirli olan kütle ve ısı alışverişidir. Bu tesir; doğal konveksiyon ve yüzey gerilimli konveksiyon ile oluşmaktadır. Yüzey gerilimli konveksiyon ile elde edilen kristalin yapısı; yarı iletken ürünler için elde edilen en mükemmel kristal yapıdır. Buna karşılık yerçekimi vektörü etkisi ile ortaya çıkan doğal konveksiyon, yüzey gerilimli konveksiyon içerisinde ortaya çıkarak kristal kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle bu alandaki çalışmalar; doğal konveksiyonun olumsuz etkisini düşük seviyelere indirerek, kristal kalitesini yükseltmeye yoğunlaşmıştır. Yerçekimi vektörü nedeniyle oluşan doğal konveksiyonun olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla (numerik ve deneysel olarak) mikro yerçekimi şartlarında çalışmalar yapılmaktadır.

Yapmış olduğumuz çalışmada; 5 cSt kinematik viskoziteye sahip silikon akışkanı kullanılarak, dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisinde yüzey gerilimli konveksiyon gerçekleştirilmiştir. Bu yüzey gerilimli konveksiyon içerisinde yerçekimi vektörü ile oluşan doğal konveksiyonun etkilerini incelemek amacıyla 2 farklı ortam sıcaklığı ve iki farklı yerçekimi şartlarında (1g ve mikro g şartlarında) 4 ayrı numerik çözüm gerçekleştirilmiş ve bu konfigürasyonlar içerisinde oluşan akım çizgileri incelenerek bir birleriyle karşılaştırılmıştır. Kaynaklar kısmında, bizi aydınlatan çalışmalardan bahsedilmiş ve kendi çalışmamızın farkı belirtilmiştir. Araştırma bulguları bölümünde deney kabı içerisinde oluşan akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri şekillerle gösterilmiş ve açıklanmıştır. Sonuç ve tartışma bölümünde ise elde edilen verilerin değerlendirilmesi yapılmış ve bir sonraki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

- Ostrach (1977; 1979; 1982) kararlı haldeki yüzey gerilimli akış hareketini inceleyen ilk araştırmacılardan biridir. Çalışmalarında matematiksel olarak, değişik koşullar altında incelemeler yapmıştır. Bu çalışmalar altında, sıcaklık ve viskozite eğimlerinin birbirleri ile ilişkili olarak bir arada bulunduğu durumdaki yüzey gerilimli konveksiyonlu akış alanını açıklamak amacıyla, uygun boyutsuz parametreleri kullanmış ve diğer başka araştırmacılara da bu parametrelerin kullanılmasını tavsiyede bulunmuştur. Ayrıca mikro seviyedeki yerçekimine sahip olan mekânlarda yüzey gerilimli konveksiyon hareketlerini inceleyerek uzay çalışmalarının önemini dile getirmiştir.
- Zeng vd. (1999) tarafından yapılan numerik çalışmada, akışkan olarak silikon akışkanının kullanıldığı yarım yüzen bölge konfigürasyonunda, boyutsal orana bağlı olarak osilasyonun radyal frekansının değiştiği ortaya konulmuştur.
- Lai (2004) yapmış olduğu çalışmada, dikdörtgen kap konfigürasyonu içerisinde osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyon yapan yüksek Prandtl sayısındaki akışkanın akış hareketine, akışkanlar mekaniğindeki süreklilik, N-S ve enerji denklemlerindeki boyutsuz parametrelerden her birinin ayrı ayrı etki ettiğini ortaya koymuştur.
- Selver (2005), yüzey gerilimli konveksiyon içerisinde gelişen doğal konveksiyonun etkilerini minimize etmek amacıyla ısıtıcı yüzeyin üst tarafta soğutucu yüzeyin alt tarafta bulunduğu "yarım yüzen bölge" konfigürasyonu ile değişik parametreler altında elde edilen kritik Marangoni sayısı değerlerini araştırmıştır.
- Wang vd. (2008), yarım yüzen bölge konfigürasyonu içerisindeki yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanın serbest yüzeyinde oluşan ısı transferinin, osilasyonun ortaya çıkması üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirterek, yarım yüzen bölge konfigürasyonunun üstten ve alttan ısıtılması durumlarındaki hava akış değişimlerini numerik ve deneysel olarak ayrı ayrı incelemişlerdir.
- Selver ve Katı (2009a,b) tarafından yapılmış çalışmalarda, Prandtl sayısı yüksek olan akışkanın dikdörtgenler prizması şeklindeki deney kabı içerisindeki yüzey gerilim konveksiyonları araştırılmıştır. 5 cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı kullanılan bu çalışmalarda akışkan serbest yüzeyinden çevreye ısı transferinin olmadığı durum için iki farklı yerçekimi vektörleri ile yüzey gerilim konveksiyonun hız vektörleri akışkanın serbest yüzeyindeki hız ve sıcaklık eğrileri nümerik çözümlü 2 boyutlu olarak incelenmiştir.
- Hashim vd. (2009) yapmış oldukları numerik çalışmada, yarım yüzen bölge konfigürasyonunda alt duvarın ısıtıcı üst duvarın soğutucu duvar olduğu durumda, akışkanın sıvı serbest yüzeyinde bir ısı

artırımı yapıldığında kararlı haldeki yüzey gerilim konveksiyon hareketindeki stabilitenin daha dengeli olduğunu ortaya koymuşlardır.

- Selver vd. (2010) tarafından yapılmış olan başka bir çalışmada ise dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisine konulan yüksek Prandtl sayısına sahip silikon akışkanı, serbest yüzeyi ile temaslı kare kesitli ince bir tel ile ısıtılarak yüzey gerilim konveksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan deney kabının eşsıcaklık eğrileri ve akım hatları, 2 farklı yer çekimi vektörü değeri için numerik olarak hesaplatılmış ve değerler bulunmuştur.
- Selver ve Katı (2011), dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisindeki yüksek Prandtl sayısına sahip silikonun, farklı soğuk duvar sıcaklıkları altında zamandan bağımsız hareketten, osilasyonlu (zamana bağımlı) harekete geçişini deneysel olarak araştırmışlardır. Soğuk duvar sıcaklığının değişmesi durumunda, osilasyonun başlamasında etkili olan kritik sıcaklık farkının da değiştiğini gözlemlemişler ve bu değişimin sıvı serbest yüzeyindeki ısı kaybından kaynaklandığını ispatlamışlardır.
- Karabıyık (2015) yapmış olduğu çalışmada; dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisinde iki farklı akışkanın (su ve silikon akışkanı) $g=9,81 \text{ m/s}^2$ yerçekimi vektörü altında, yüzey gerilimli konveksiyon ve doğal konveksiyondan meydana gelen sirkülasyonların akış çizgilerini, eşsıcaklık eğrilerini ve hız vektörlerini farklı boyutsal oranlarda numerik olarak karşılaştırmıştır. Araştırmasında; büyük boyutsal oranda konfigürasyon içerisinde her iki akışkan içinde tek hücreli sirkülasyon gerçekleşirken, küçük boyutsal oranda suyun çok hücreli bir sirkülasyon oluşturduğunun sonucuna ulaşmıştır.
- Mielniczuk vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada, yüzen bölge konfigürasyonu içerisindeki kılcal etkileşimleri analitik model kullanarak analiz etmişlerdir. Yerçekiminin konfigürasyona olumsuz etki ettiğini (simetri kaybı) gözlemlemişler ve bu deformasyondan kaçınmak için mikro-yerçekimi koşullarında da testler yapmışlardır. Bu testlerde; normal yer çekimi koşullarındaki deney sonuçlarına göre daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.
- Nguyen vd. (2020) yapmış oldukları çalışma ile yüzen bölge konfigürasyonunu kullanarak tek dağılımlı küresel parçacıklar arasındaki kılcal köprülerden bir sıvının yüzey gerilimini ölçmek için özgün bir yaklaşım sunmuşlardır. Kullandıkları bu yöntem, Young-Laplace'ın kesin analitik çözümüne dayanmaktadır. Önerilen yaklaşımın doğruluğu ve etkinliği, silikon yağı, hint yağı ve saf olmayan suyun yüzey gerilimlerinin ölçülmesiyle kanıtlanmıştır. Geliştirilen kılcal köprü yöntemi, sadece küçük bir hacim gerektiren tüm sıvılara yüksek doğrulukla uygulanabilmektedir.
- Mendis vd. (2021) yapmış oldukları çalışma ile soğuk yüzeyin üst ve sıcak yüzeyin alt tarafta olduğu "yarım yüzen bölge konfigürasyonunu" kullanarak, Si-Ge akışkanı için farklı boyutsal oranlarda ve sıfıra yakın yerçekimi etkisi altında üç boyutlu olarak yüzey gerilim konveksiyon hareketlerini incelemişlerdir. Boyutsal oranın akış hareketlerini büyük ölçüde etkilediği sonucuna ulaşmışlardır.
- Zhiyong vd. (2022) yapmış oldukları çalışma ile akış kuvveti, yüzey gerilimi kaynaklı akış olup bunların konsantrasyon seyreltmesi ile korelasyon rollerini incelemek için, 3D boyutunda ısı ve kütle transferi modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışma için yenilikler şu şekilde özetlenmiştir; geliştirilen sayısal modele kütle ilavesi dikkate alınarak eriyik havuzunun iç, dış, ve deneysel safhalarının analizi gerçekleştirilmiştir. Ardından, tahrik mekanizmasını anlamak için ana itici gücün sayısal bir açıklaması yapılmıştır. Gerilim kuvvetin ve termal gerilim kuvvetin konveksiyon akışı üzerindeki rolleri, daha sonra kaplama yolunun gelişimini incelemek için temel olarak analiz edilmiştir. Akış kuvvetinin temel anlayışına dayanarak, yüzey gerilimi kaynaklı akışın mekanizması niteliksel olarak araştırılmıştır. Yüzey gerilim konveksiyon hareketinin kütle transferi fenomenini derinlemesine anlamak için akışkan akışı ile çözünen seyreltme arasındaki özel ve yönlü korelasyon incelenmiştir.
- Haiting vd. (2022) yapmış oldukları çalışma ile Marangoni etkisi olan ve olmayan duvar damlacıklarının buharlaştırma işlemindeki ısı ve kütle transfer farklılıklarını karşılaştırmışlardır. Marangoni etkisinin altında ortam sıcaklığının ve ilk damlacık boyutunun buharlaşma üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Buharlaşma sırasında Marangoni konveksiyonunun katkısı paralel olarak analiz edilmiştir. Marangoni etkisinin damlacık buharlaşma süreci üzerindeki etkisi ve farklı başlangıçtaki damlacık yarıçapı ve ortam sıcaklığının sıcaklık ve akış parametreleri üzerindeki etkileri, damlacık içindeki alanlar karşılaştırılmıştır. Bu araştırma ile Marangoni etkisi dikkate alınmadan damlacık hacminin 20 L ve damlacıktaki maksimum akış hızının 0,34 mm/s olduğu görülmüştür. Marangoni etkisi dikkate alındığında maksimum akış hızı yaklaşık 100 kat artmaktadır. Marangoni etkisinin, damlacıktaki konveksiyonun yön değiştirmesine ve o yönde akışın oluşmasına neden olabildiği görülmüştür.
- Billy-Joe vd. (2022) yapmış oldukları çalışma ile orta ölçekte eklemeli imalat ve kaynak bağlamında PFEM'in genel uygunluğunu göstermeyi amaçlamışlardır. Odak noktası, eriyik havuzunun evrimi, kaldırma kuvveti ve Marangoni etkisi gibi akışı yönlendiren fiziktir. Eklemeli imalatta PFEM kod geliştirmesinin bu aşamasında iki ana basitleştirme yapılmıştır. İlk olarak, katı malzeme, elasto-plastik bir katı kullanmak yerine, donma üzerine daha fazla deformasyonu önleyen momentum çökmesi terimine sahip bir akışkan ile değiştirilir. İkinci olarak, tüm simülasyonlar 2D düz gerilim varsayımını kullanır. Bu basitleştirmeler hem faz değişimini hem de eriyik havuzundaki konvektif akışları ve katıdaki artık

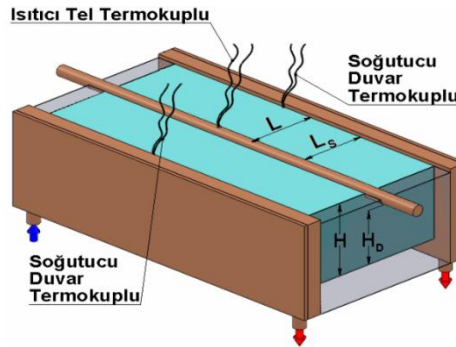
gerilmeleri 3 boyutlu olarak simüle edebilen bir simülasyon yöntemine ulaşmak için planlanmıştır. Yöntemin faz değişimi ve akışkan dinamiği ile simülasyonlara uygunluğunu göstermek için üç doğrulama testi durumu sunulmuş ve literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. PFEM'in bilinen sınır şartları, geleneksel FEM ile karşılaştırıldığında sık sık yeniden ağ oluşturma nedeniyle artan hesaplama maliyeti oluşturur. Ayrıca, sürekli değişen bağlantı ile çözme sürecinin paralel hale getirilmesi zordur ve mevcut koda dahil edilmemiştir. Bunun dışında, sınırlamalar geleneksel FEM'leri içerir.

Bu çalışmanın yeniliği, daha önce yalnızca bir kez yayınlanmış olan ve gizli ısının inceliklerine ve katıdan sıvıya geçişe sınırlı odaklanan faz değişimi için PFEM'nin kullanılmasında yatmaktadır. Eklemeli imalat ve kaynak gibi uygulamalar, faz geçişinin doğru oluşumuna karakteristik olarak duyarlıdır. Bu çalışma, gelecekteki eklemeli imalat ve kaynak uygulamalarının simülasyonu için doğrulama görevi görmüştür.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada ise; dikdörtgen kap konfigürasyonu içerisine yerleştirilen silikon akışkanının, serbest yüzeyinin tam ortasından geçen ve serbest yüzeyi boyunca temas eden dairesel kesitli ince krom-nikel bir tel ile ortasından ısıtılması ve yan tarafların bakır duvarlar yardımıyla soğutulmasıyla oluşan yüzey gerilimli konveksiyon içerisindeki batmazlık etkisi, sıcaklık ve akım çizgileri; farklı yerçekimi vektörleri altında ve farklı ortam sıcaklıklarında numerik olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Böylece akışkan serbest yüzeyi üzerinde oluşan ısı transferinin normal ve mikro yerçekimi vektörleri altında oluşan yüzey gerilimli konveksiyon ve doğal konveksiyon hareketlerine etkileri ortaya çıkartılmıştır.

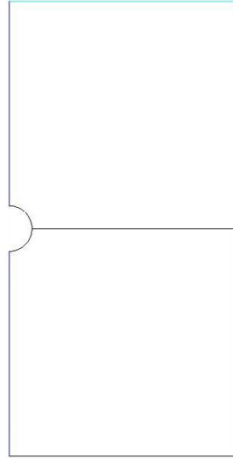
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışmamızda; dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisindeki silikon yağının yüzey gerilim konveksiyon hareketleri ve doğal konveksiyon hareketleri nümerik hesaplama ile iki boyutlu halde incelenmiş ve araştırılmıştır. Bu duruma göre; akışkanın yüzey gerilim konveksiyonunun zamandan bağımsız (kararlı) durumdaki akım hatları ve eş sıcaklık çizgileri, düşük (μg) ve normal (1g) yerçekimi şartları altında ve farklı ortam sıcaklıklarında incelenmiştir. Şekil 1' de, kullanmış olduğumuz dikdörtgen kap konfigürasyonunun 3 boyutlu modeli görülmektedir.



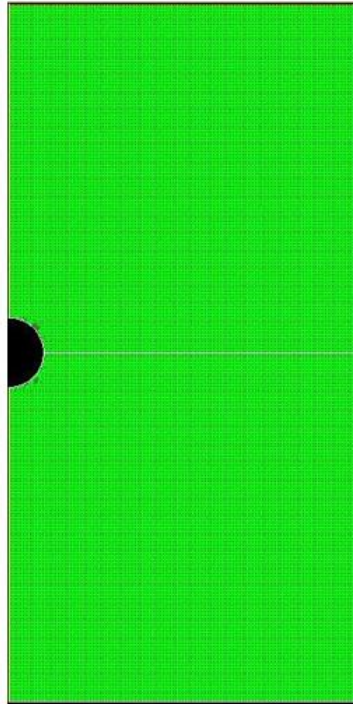
Şekil 1. Dikdörtgen kap konfigürasyonunun 3 boyutlu modeli (Kati, 2009)
(3-D model of rectangular container configuration)

Çalışmamızda; 5 cSt'luk kinematik viskoziteye sahip silikon akışkanının Şekil 1' de görülen dikdörtgenler prizması şeklindeki kap içerisine konulduğu, akışkan serbest yüzeyinin tam ortasından geçen dairesel kesitli ince krom-nikel bir tel ile ısıtıldığı ve deney kabına ait yan bakır duvarlar yardımıyla yanlarından soğutulduğu konfigürasyon modellenmiştir. Numerik hesaplama için geometrik model oluşturulurken, deney kabı içerisindeki akışkanın serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama olan ısı kaybının da hesaba dahil edilmesi düşünülmüştür. Bu doğrultuda akışkan serbest yüzeyi üzerinde kalan, deney kabı boyutları kadarlık bir yüzey de geometrik modele dahil edilmiştir, bu durum Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Dikdörtgen kap konfigürasyonunun iki boyutlu geometrik modeli (Katı Sunay, 2013)
(Two-dimensional geometric model of rectangular container configuration)

Şekil 2’de görülen geometrik modelde; boyutsal oranın 1 ($Ar=H/L=1$, H yükseklik, L genişlik) olduğu durum için alttaki dörtgen konfigürasyonu, üstteki dörtgen ise konfigürasyon üzerindeki havayı oluşturmaktadır. Buna göre sınır şartları belirlenirken alttaki dörtgenin; tabanı izolasyonlu yüzey ve sol dikey yüzey simetri ekseni olup, sağ dikey yüzeyi soğutucu duvar yüzeyi ve bitişik iki dörtgen yüzey arasındaki yatay yüzey ise akışkan serbest yüzeyi olarak tanımlanmıştır. Üstteki dörtgenin sol dikey yüzeyi simetri çizgisi, sağ dikey yüzeyi hava girişi, üst yüzeyi hava çıkışı olup, akışkan ve hava ile temaslı olan yarım daire kesitli yüzey ise sıcak duvar çizgisi olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3. Dikdörtgen kap konfigürasyonunun iki boyutlu geometrik modelindeki mesh yapısının görünümü (Katı Sunay, 2013)
(View of the mesh structure in the 2-D geometric model of the rectangular container configuration)

Çalışmamızda kullanılan geometrik modelin mesh yapısı oluşturulurken, daha hassas sonuçlar elde edebilmek amacıyla mümkün olduğunca sık ve düzenli bir mesh yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Ancak geometrik modelimizdeki ısıtıcı duvar kısmındaki dairesellikten dolayı, sadece ısıtıcı duvarın yüzey bölgesine yakın olan yerlerde non-uniform mesh sistemi kullanılmıştır. Bu durum örnek olarak Şekil 3’de görülmektedir.

Çalışmamızda deney akışkanı olarak kullanılan silikon akışkanının fiziksel özellikleri Tablo 1’de ve deneyin yapıldığı çevredeki çevre akışkanı olarak kullanılan havanın fiziksel özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. 5 cSt viskoziteye sahip Silikon Akışkanının fiziksel özellikleri (Selver, 2005)
(Physical properties of Silicone Oil with a viscosity of 5 cSt)

Özellik	Birimler	Değer
Yoğunluk (ρ)	Kg/m ³	913
Termal Kondüksiyon Katsayısı (k)	W/m.K	0.1088568
Termal Difüzyon Katsayısı (α)	m ² /s	7.42x10 ⁻⁸
Dinamik Viskozite (μ)	Ns/ 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 Kapasitesi (C_p)	J/Kg.K	1716.588
Isıl Genleşme Katsayısı (β)	1/K	0.00105
Prandtl Sayısı (Pr)		67
Akışkanın Kinematik Viskozitesinin Değişimi		
$\nu = 8.185 - 0.2T + 3.74 \times 10^{-3}T^2 - 4.865 \times 10^{-5}T^3 + 3.474 \times 10^{-7}T^4 - 9.76 \times 10^{-10}T^5$		

Tablo 2. Havanın fiziksel özellikleri (Çırak, 2009) (Physical properties of air)

Özellik	Değer	Birim
μ Dinamik viskozite	1.789 x 10 ⁻⁵	kg/m.s
β Isıl genleşme sabiti	3.43 x 10 ⁻³	1/K
c_p Özgül ısı sığası	1006.43	J/kg.K
k Isıl iletkenlik katsayısı	0.0242	W/m.K
ρ Yoğunluk	1.225	kg/m ³

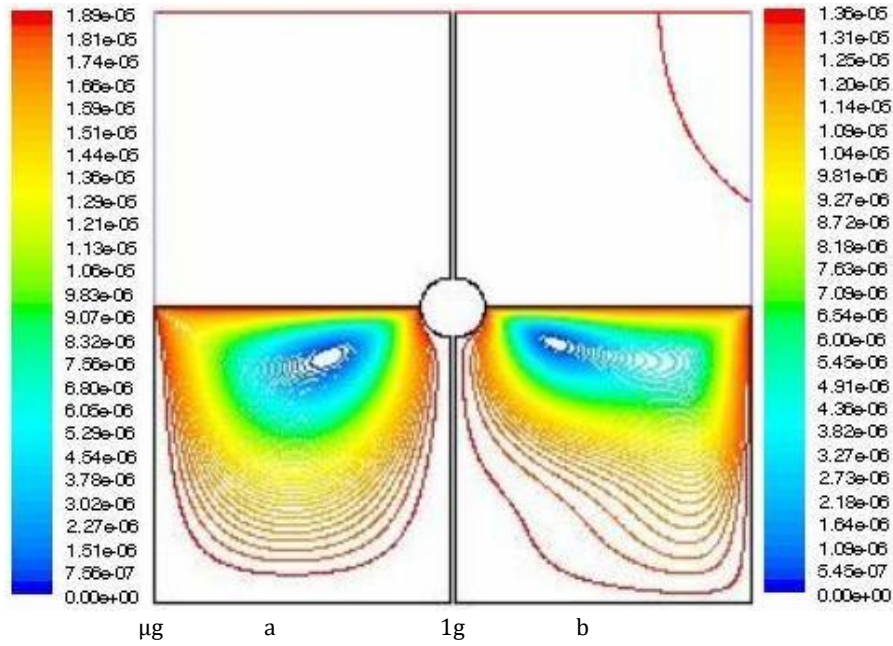
Yapmış olduğumuz çözümlerlerde, akışkanın akış çesidi laminar seçilmiş olup, Süreklilik Denklemi, N-S Denklemleri ve Enerji denklemi SIMPLE (Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations) algoritması kullanılmıştır. Çözümlemede, geometrik modeli oluşturan deney kabı içerisindeki akışkanın serbest yüzeyinin tamamen düz ve yatay konumda olduğu, sıvı serbest yüzeyi ile ortam arasında ısı alış-verişinin gerçekleştiği ve iki boyutlu geometrik modelin yüzeyleri ile çevre arasında radyasyon yolu ile ısı alış-verişinin gerçekleşmediği kabulleri yapılmıştır.

Çalışmamızda, öncelikle yerçekimi vektörünün normal 9.81m/s² olduğu durumda soğuk duvar sıcaklığı (T_C) 15°C, sıcak duvar sıcaklığı (T_H) 40 °C ve oda sıcaklığı değerleri (T_r) sırasıyla 285 K ve 330 K seçilerek 2 farklı konfigürasyon oluşturulmuş ve Boussinesq yaklaşımı ile nümerik olarak çözdürülmüştür. Daha sonra aynı işlemler yerçekimi vektörünün 1.0x10⁻⁶ m/s² (Micro Yerçekimi) olduğu durum için de tekrarlanmıştır. Böylece akışkanın kararlı yüzey gerilimli konveksiyon hareketi için 4 farklı nümerik çözüm elde edilmiştir.

4. Nümerik Sonuçlar (Numerical Results)

Yapmış olduğumuz çalışmada, zamandan bağımsız (kararlı) yüzey gerilimli konveksiyonunun iyi bir şekilde anlaşılması için farklı nümerik çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu çözümler sonucunda; 1g ve mikro g (μ g) yerçekimi vektörleri altında, farklı ortam sıcaklıkları kullanılarak nümerik olarak 2 boyutlu halde oluşturulan deney modellemeleri içerisinde zamandan bağımsız (kararlı) olarak yüzey gerilimli konveksiyon hareketi yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri elde edilmiştir.

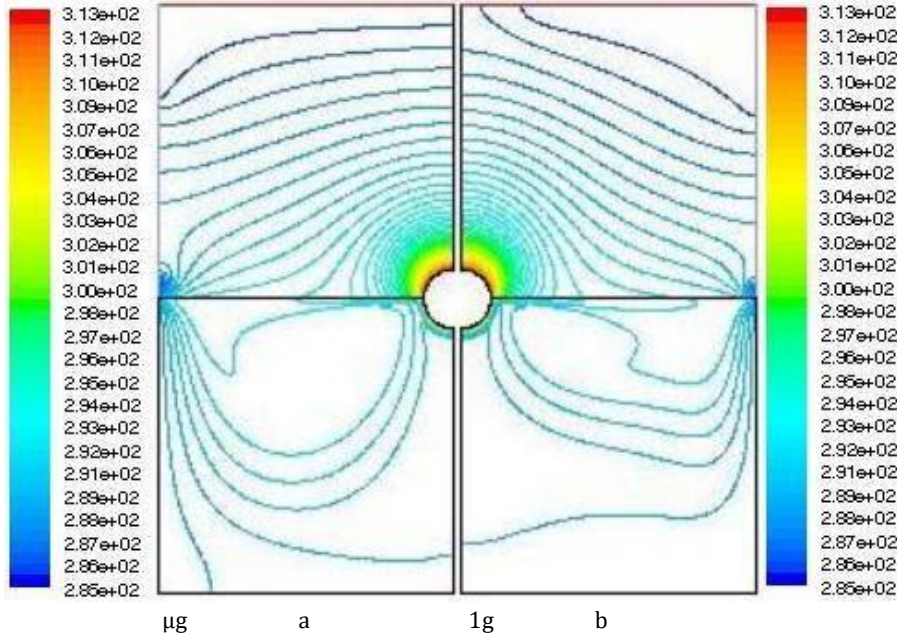
Çalışmamızın 2 boyutlu geometrik modelini oluştururken, konfigürasyon içerisindeki akışkan serbest yüzeyi ile atmosfer arasında gerçekleşen ısı transferinin de hesaba katılması planlanmıştır. Bu amaçla akışkan serbest yüzeyi üzerinde kalan, konfigürasyon boyutları kadarlık bir alan da geometrik modele dahil edilmiştir ve bu durum Şekil 4'te gösterilmiştir. Buna göre Şekil 4.a ve 4.b' de; alt tarafta dörtgen prizma şeklindeki kap içerisindeki silikon akışkanı ve üst tarafta yine dörtgen prizma şeklindeki çevre havası birlikte çözdürülmüş olup; bu iki alandaki akım çizgileri birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4. $Tr=285$ K iken yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın akım çizgileri görüntüsü a- Mikro yerçekimi vektörü altında b- 1g yerçekimi vektörü altında
(The flow streamlines view of the silicone oil and the air on the silicone oil making surface tension convection when $Tr=285$ K a- Under micro gravity vector b- Under 1g gravity vector)

Şekil 4.a 'da mikro yerçekimi vektörü altında, boyutsal oranın $Ar=1$ ($Ar=H/L=1$; H yükseklik, L genişlik) ve ortam sıcaklığının $Tr=285$ K olduğu durumda yüzey gerilim konveksiyonu yapan akışkanın ve bu akışkan üzerindeki havanın akım çizgileri gösterilmektedir. Şekil 4.b' de ise normal (1g) yerçekimi vektörü altında, boyutsal oranın $Ar=1$ ve ortam sıcaklığının $Tr=285$ K olduğu şartlarda yüzey gerilim konveksiyonu yapan akışkanın ve bu akışkan ile temaslı olan havanın akım çizgileri gösterilmektedir. Bu şekilde, mikro yerçekimi şartlarındaki hava hareketinin tamamen durgun ve hareketsiz olduğu gözlenmektedir. 1g yerçekimi şartlarında ise akışkan hava ara yüzeyi bölgesindeki hava, τ gerilimi etkisiyle akışkanın hareketi yönünde mikron kalınlığı mertebesinde hareket etmektedir. Bu hava hareketi, kalınlığının küçük olması nedeniyle Şekil 4.b' de görülmemektedir. Burada silikon akışkanı üzerindeki hava bölgesinin akım çizgileri, silikon bölgesindeki akım çizgilerinden daha azdır hatta hiç görünmeme durumu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni ise silikon akışkanı üzerinden havaya olan ısı transferinin ve doğal konveksiyonun az olmasıdır.

Şekil 5' te boyutsal oranın $Ar=1$ ve ortam sıcaklığının $Tr= 285$ K olduğu deney kabında 2 farklı yerçekimi vektöründe yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın çizgisel eş sıcaklık eğrilerinin görüntüsü gösterilmektedir. Hava bölgesinde kondüksiyon yoluyla ısı transferinin etkin olmasından dolayı; düşük ve normal yerçekimi vektörleri altındaki eş sıcaklık eğrilerinde çok fazla farklılık görülmemektedir. Silikon akışkanı bölgesinde ise ortam sıcaklığının düşük yani $Tr= 285$ K olmasından dolayı atmosfere olan ısı kaybı ile birlikte silikon içerisindeki ısı transferi, konveksiyon ve kondüksiyon yoluyla gerçekleşmektedir. Buradaki doğal konveksiyonun etkisinden dolayı normal (1g) yerçekimi vektörü altındaki eş sıcaklık eğrileri ile mikro yerçekimi vektörü altındaki eş sıcaklık eğrileri karşılaştırıldığında çok bariz bir şekilde farklılıklar görülmüştür.

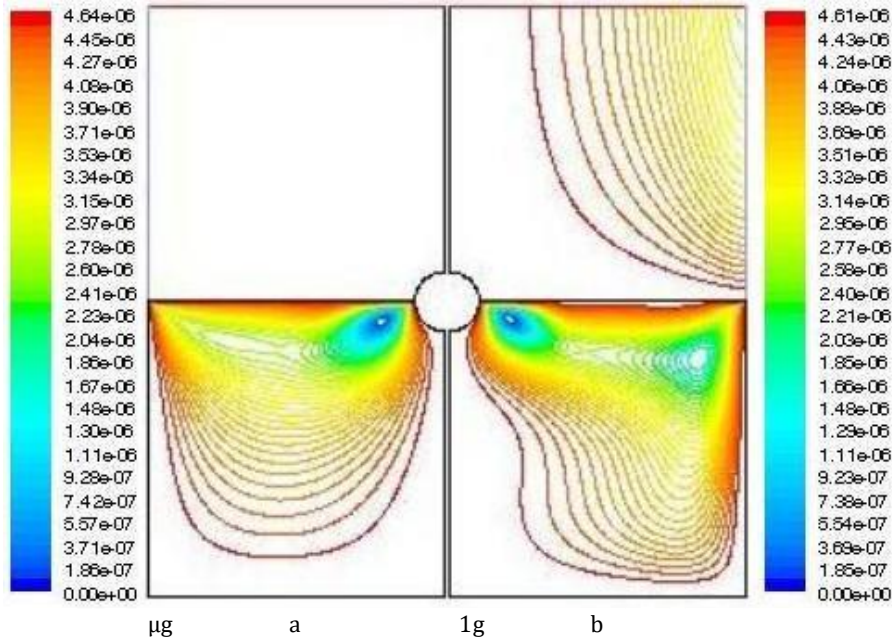


Şekil 5. $T_r=285$ K iken yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın çizgisel eş sıcaklık eğrilerinin görüntüsü a- Mikro yerçekimi vektörü altında b- 1g yerçekimi vektörü altında
(The shown of the isotherm values of the silicone oil and the air on the silicone oil making surface tension convection when $T_r=285$ K a- Under micro gravity vector b- Under 1g gravity vector)

Çalışmamızda; ortam sıcaklığının farklı değerleri için yapılan numerik hesaplamalarda farklı sonuçlar elde edilmiştir. En bariz farklılıklar ortam sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu çalışmalarda gözlemlenmiştir. Bu nedenle ortam sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu durum için yapılan numerik çözümlerden elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanacaktır.

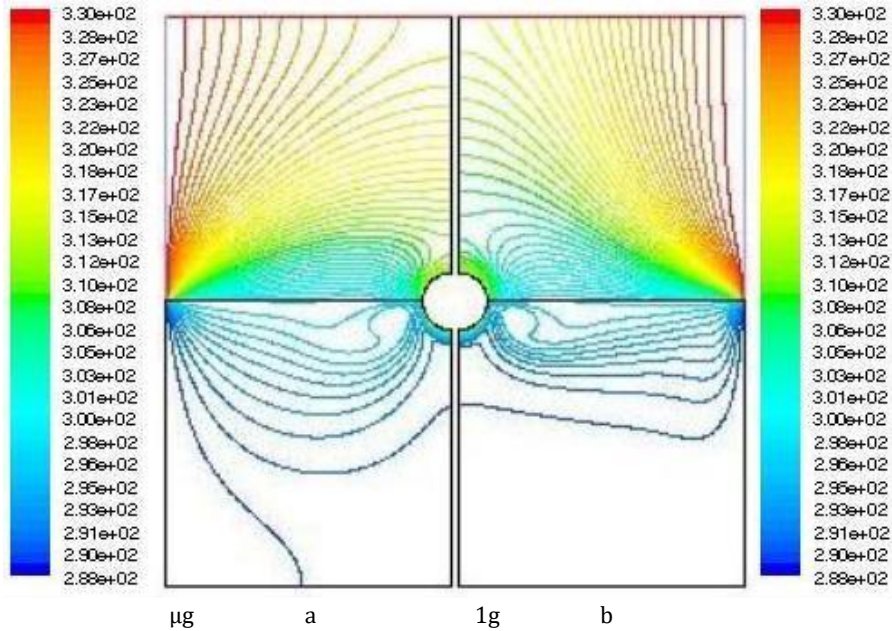
Şekil 6.a 'da mikro g yerçekimi vektörü altında, boyutsal oranın $Ar=1$ ve ortam sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu şartlarda yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın akım çizgileri görülmektedir. Şekil 6.b' de ise 1g yerçekimi vektörü altında, boyutsal oranın 1 ve ortam sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu durumda yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın akım çizgileri görülmektedir. Şekil 6.a' da görülen mikro yerçekimi vektörü altındaki çözümde, akışkanın serbest yüzeyinden atmosfere olan ısı kaybının mümkün olduğunca az ve sadece kondüksiyon yoluyla olması nedeniyle silikon akışkanı içerisindeki akışkan partiküllerinin hareketi "Yüzey Gerilim Reynolds Sayısına (Re_σ)" bağlıdır. Yüzey Gerilim Re_σ Sayısı, yüzey gerilim atalet kuvvetlerinin, viskoz kuvvetlere oranı olarak bilinmektedir. Burada Yüzey Gerilim Re_σ Sayısındaki viskoz kuvvetlerin sıcaklıkla azalmasından kaynaklanan bir değişim gözlemlenmiştir. Sıcaklık değişiminin oldukça az olmasından dolayı; yüzey gerilim atalet kuvvetleri, sıcak duvarla soğuk duvar sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının ortalama bir fonksiyonu olarak görülmektedir.

Düşük yerçekimi vektörü altındaki akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının az olması nedeniyle soğuk duvarla sıcak duvar arasındaki ortalama akışkan serbest yüzey sıcaklığı; çevre sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu durumda, çevre sıcaklığının $T_r=285$ K olduğu duruma göre daha yüksektir. Şekil 6' da da görüldüğü gibi çevre sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu durumda; silikon akışkanı içerisindeki vortex hücrenin merkezi, akışkan serbest yüzeyi ile ısıtıcı duvar bölgesine daha yakın bir noktada meydana gelmektedir. Ayrıca Şekil 6.a' daki hava bölgesinde hava hareketi görülmemektedir. Bunun nedeni mikro yerçekimi (μg) altında havanın batmazlık etkisinin 0'a yakın olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6. $Tr=330$ K iken yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın akım çizgileri görüntüsü a- Mikro yerçekimi vektörü altında b- 1g yerçekimi vektörü altında
(The flow streamlines view of the silicone oil and the air on the silicone oil making surface tension convection when $Tr=330$ K a- Under micro gravity vector b- Under 1g gravity vector)

Şekil 7.a 'da mikro yerçekimi vektörü altında, boyutsal oranın $Ar=1$ ve ortam sıcaklığının $Tr=330$ K olduğu durumda yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın eş sıcaklık eğrileri gösterilmektedir. Şekil 7.b' de ise 1g yerçekimi vektörü altında, boyutsal oranın 1 ve ortam sıcaklığının $Tr=330$ K olduğu şartlarda yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın eş sıcaklık eğrileri gösterilmektedir.

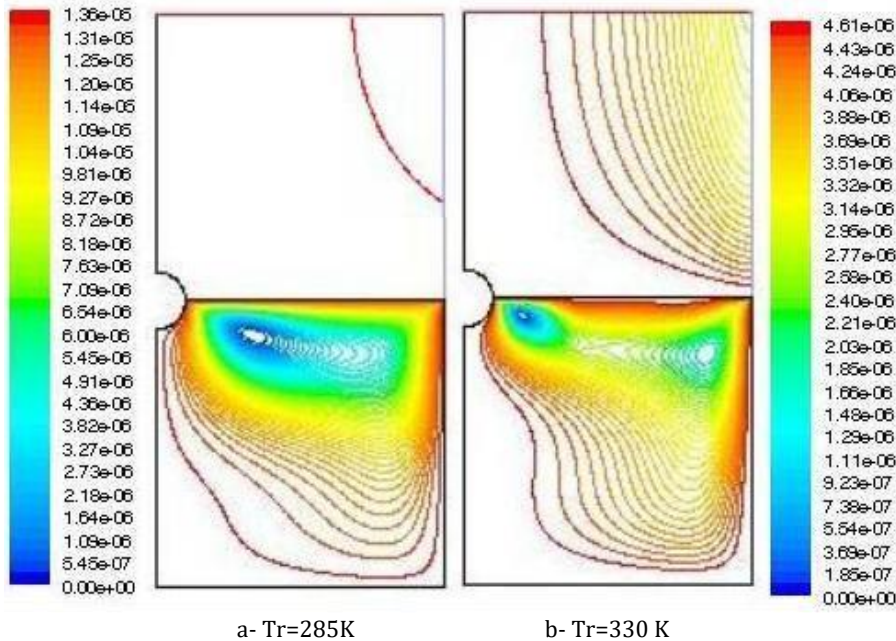


Şekil 7. $Tr=330$ K iken yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın çizgisel eş sıcaklık değerlerinin görüntüsü a-Mikro yerçekimi vektörü altında b- 1g yerçekimi vektörü altında
(The shown of the isotherm values of the silicone oil and the air on the silicone oil making surface tension convection when $Tr=330$ K a- Under micro gravity vector b- Under 1g gravity vector)

Şekil 5. a ve Şekil 7. a' da ki eş sıcaklık eğrileri karşılaştırıldığında aralarında hissedilir derecede farklılıklar olduğu görülmektedir. Hava bölgesindeki farklılıklar, kondüksiyon yoluyla oluşan ısı transferinden meydana gelmektedir. Silikon akışkanı bölgesinde ortam sıcaklığının $Tr=285$ K olduğu durum için akışkan serbest yüzeyinden atmosfere kondüksiyon yoluyla ısı kaybı meydana gelirken, çevre sıcaklığının $Tr=330$ K olduğu durum için ise atmosferden akışkan serbest yüzeyine ısı kazancı meydana gelmektedir. Bu durum; Şekil 5. a ve Şekil 7. a'

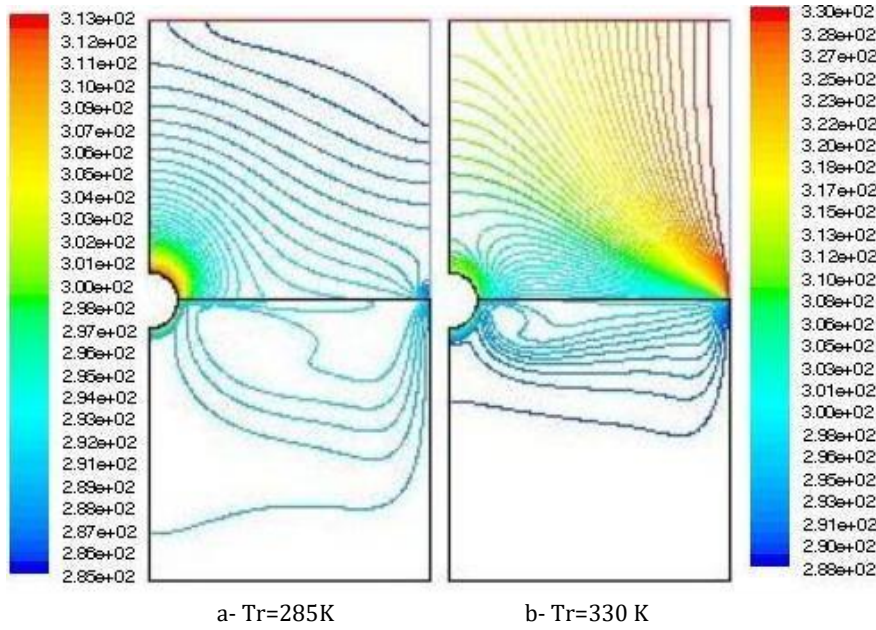
da ki silikon akışkanının eş sıcaklık eğrilerindeki farklılıkları meydana getirmektedir. Çevre sıcaklığının $T_r=330$ K olması durumundaki eş sıcaklık eğrileri, $T_r=285$ K olması durumundaki eş sıcaklık eğrilerine göre akışkan serbest yüzeyine daha yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır. Akışkan serbest yüzeyi boyunca ortalama sıcaklık farkının yüksek olması, serbest yüzey boyunca akışkanın viskozite değerinin düşük olmasına sebep olmaktadır.

Şekil 8’de, farklı ortam sıcaklıklarındaki ($T_r=285$ ve $T_r=330$ K) silikon akışkanı ve havanın 1g yerçekimi vektörü altındaki akım çizgileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada, çevre sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu durumda hava bölgesindeki ısıl momentumun $T_r=285$ K olduğu durumdakine göre daha etkin olduğu görülmektedir. Çevre sıcaklığının $T_r=285$ K olduğu durumda; akışkan serbest yüzeyinden havaya olan ısı transferinin az olması nedeniyle, akışkanın serbest yüzeyi üzerindeki mikron seviyesindeki havada ısıl momentum gerçekleşirken ısıl sınır tabaka kalınlığını oluşturmakta ve akışkan serbest yüzeyi üzerinde zarf etkisi meydana getirmektedir. Bu zarf etkisi, ağırlıklı olarak konveksiyon yoluyla ısı transferinin gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Çevre sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu durumda ise, $T_r=285$ K olduğu durumun tam tersine havadan, akışkan serbest yüzeyine ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu nedenle, akışkan serbest yüzeyi üzerindeki mikron seviyesindeki havada oluşan ısıl momentum; ısıl sınır tabaka kalınlığını oluşturarak akışkan serbest yüzeyi üzerinde zarf etkisi meydana getirmektedir. Burada oluşan zarf etkisi; çevre sıcaklığının $T_r=285$ K olduğu durumdan farklı olarak; hem konveksiyon yolu ile hem de konveksiyon yoluyla ısı transferinin gerçekleşmesine sebep olmaktadır.



Şekil 8. Ortam sıcaklığının $T_r=285$ K ve $T_r=330$ K olduğu konfigürasyonlarda yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın akım çizgilerinin 1g yerçekimi vektörü altındaki görüntüsü
(The view of the streamlines of the silicone oil and the air above the silicone oil under 1g gravity vector, which performs surface tension convection in configurations where the ambient temperature is $T_r=285$ K and $T_r=330$ K)

Şekil 8’deki akım çizgilerinin karşılaştırmasında, silikon akışkanı bölgelerindeki akım hareketlerinde de farklılıklar görülmektedir. Ortam sıcaklığının $T_r=285$ K olduğu durumda, akım hareketini oluşturan vortex hücrenin merkezinin ısıtıcı telden daha uzak noktada gerçekleştiği görülmektedir. Bunun nedeni ise; akışkan serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybından dolayı, silikon akışkanı konveksiyonunun ve Yüzey Gerilim Re_σ Sayısının ortam sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu durumdakine göre daha düşük olmasıdır. Ortam sıcaklığının $T_r=330$ K olduğu durum incelendiğinde ise akım çizgilerinin tek hücreli “vorteks”ten çift hücreli “vortek”se ayrılma noktasına geldiği görülmektedir. Bunun nedeni ise Yüzey Gerilim Re_σ Sayısının, ortam sıcaklığının $T_r=285$ K olduğu durumdakine göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. İki hücreli vortex hareketinin kritik başlangıç noktasına ulaştığı, Şekil 8.b’deki akışkan serbest yüzeyinin almış olduğu şekilden de anlaşılmaktadır.



Şekil 9. Ortam sıcaklığının $Tr=285$ K ve $Tr=330$ K olduğu konfigürasyonlarda yüzey gerilim konveksiyonu yapan silikon akışkanının ve silikon akışkanı üzerindeki havanın çizgisel eş sıcaklık değerlerinin $1g$ yerçekimi vektörü altındaki görüntüsü
(The view of the isotherm values of the silicone oil and the air on the silicone oil under $1g$ gravity vector, which performs surface tension convection in configurations where the ambient temperature is $Tr=285$ K and $Tr=330$ K)

Şekil 9' da, farklı ortam sıcaklıklarındaki ($Tr=285$ ve $Tr=330$ K) silikon akışkanı ve havanın $1g$ yerçekimi vektörü altındaki eş sıcaklık eğrileri görülmektedir. Ortam sıcaklığının $Tr=285$ K olduğu durumda, akışkan serbest yüzeyi üzerindeki mikron seviyesindeki sınır tabakadan ortama olan ısı transferi görülürken, ortam sıcaklığının $Tr=330$ K olduğu durumda ise ortamdan akışkan serbest yüzeyi üzerindeki mikron seviyesindeki sınır tabakaya ısı transferi olduğu görülmektedir. Silikon akışkanı bölgelerinde ise; ortam sıcaklığının $Tr=330$ K olduğu durumda ortamdan akışkan serbest yüzeyine olan ısı kazancı nedeniyle akışkan serbest yüzeyindeki sıcaklık, ortam sıcaklığının $Tr=285$ K olduğu durumdakine göre daha yüksektir. Bu nedenle ortam sıcaklığının $Tr=330$ K olduğu durumdaki eş sıcaklık eğrileri akışkan serbest yüzeyine doğru yoğunlaşmıştır. Ortam sıcaklığının $Tr=330$ K olduğu durumdaki batmazlık kararlılığı ise ortam sıcaklığının $Tr=285$ K olduğu durumdakine göre daha yüksektir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Çalışmamızda, dikdörtgenler prizması içerisindeki $5cSt$ 'luk kinematik viskoziteye sahip silikon akışkanının ve üzerindeki havanın; yüzey gerilim konveksiyon ve doğal konveksiyon hareketleri, akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri, farklı ortam sıcaklıklarında ve iki farklı yerçekimi vektörü değerinde, iki boyutlu olarak incelenmiş ve bir birleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada, yüzey gerilim konveksiyonun doğal konveksiyondan daha etkin (baskın) olduğu görülmüştür. Ayrıca, farklı ortam sıcaklık şartlarında ve farklı yerçekimi vektörü şartlarında meydana gelen kombinasyonlar için düşünülen iki boyutlu konfigürasyonlar içerisinde yüzey gerilim konveksiyonu yapan akışkanların akım çizgileri ve eş sıcaklık çizgilerinde farklılıkların olduğu görülmüştür. Ortam sıcaklığı yükseldikçe tek hücreli vortex konveksiyonundan çift hücreli vortex konveksiyonuna geçişe doğru bir eğilim olduğu görülmüştür.

Yarı iletken ürünlerin üretimindeki kristal kalitenin artırılması için homojen bir yapının var olması şarttır. Homojen kristal yapı, yüzey gerilim konveksiyonu ile gerçekleşeceğinden dolayı, osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyonunun başlama noktası ne kadar uzaklara ötelenirse kristal yapının homojenlik aralık değeri de o kadar büyüyerek ötelenmiş olacaktır. Dolayısıyla ilerleyen çalışmalarda, zamandan bağımsız (kararlı) yüzey gerilimli konveksiyondan periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli konveksiyona geçiş noktasını etkileyen diğer parametrelerin üzerine yoğunlaşılması bu alandaki gelişmeleri hızlandıracaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest has been declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Billy-Joe Bobach, Romain Boman, Diego Celentano, Vincent E. Terrapon, Jean-Philippe Ponthot, 2021. Simulation of the Marangoni Effect and Phase Change Using the Particle Finite Element Method. *Applied Science*, 11(24), 11893.
- Çırak, Ç., 2009. Farklı ortam sıcaklıklarında ve farklı soğuk duvar sıcaklık etkileri altındaki sabit sıcaklık konfigürasyonunun, rejim halinden osilasyonlu marangoni konveksiyonuna geçiş üzerine deneyler. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 75, Isparta.
- Hashim, I., Othman, H., Awang Kechil, S., 2009. Stabilization of thermocapillary instability in a fluid layer with internal heat source. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 161-165.
- Haiting L., Jiewen D., 2022. Influence of Marangoni Effect on Heat and Mass Transfer during Evaporation of Sessile Microdroplets. *Micromachines*, 13(11), 1968.
- Karabyık, E., 2015. Dikdörtgen kap içerisinde yüzey gerilim hareketi yapan farklı iki akışkan için boyutsal oran etkisinin incelenmesi. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 46, Isparta
- Katı, E., 2009. Yarı iletken malzemeler için termokapiler konveksiyon üzerine deneysel bir çalışma. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 60, Isparta.
- Katı Sunay, E., 2013. Farklı parametreler altında kararlı ve osilasyonlu yüzey gerilim konveksiyon hareketlerinin incelenmesi. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 93, Isparta.
- Lai, C.L., 2004. Multiple-scale analysis of oscillatory thermocapillary convection of high Prandtl number fluids in a rectangular cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 1069-1078.
- Mendis, R. L. A., Sekimoto, A., Okano, Y., Minakuchi, H., and Dost, S., 2021. The relative contribution of solutal marangoni convection to thermal marangoni flow instabilities in a liquid bridge of smaller aspect ratios under zero gravity. *Crystals*, 11, 116-128.
- Mielniczuk, O., Millet, O., Gagneux, G., El Youssoufi, M. S., 2018. Characterisation of pendular capillary bridges derived from experimental data using inverse problem method. *Granular Matter*, 20, 14-23.
- Nguyen, H. N. G., Zhao, C., Millet, O., Gagneux, G., 2020. An original method for measuring liquid surface tension from capillary bridges between two equal-sized spherical particles. *Powder Technology*, Volume 363, Pages 349-359.
- Ostrach, S., 1977. Motion induced by capillarity. *Physico-Chemical Hydrodynamics*, 2, 571-589.
- Ostrach, S., 1979. Convection due to surface tension gradients. *COSPAR Space Research*, 19, 563-570.
- Ostrach, S., 1982. Low-gravity fluid flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 14, 313-345.
- 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, 25-35.
- Selver, R., Katı, E., 2009. Dikdörtgenler prizması içerisinde yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan akışkanın hız vektörlerinin farklı yerçekim vektörleri altında incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6, 3, 19-33.
- Selver, R., Katı, E., 2009. Dikdörtgenler prizması içerisinde yüzey gerilim konveksiyon hareketi yapan akışkanın serbest yüzeyindeki sıcaklık ve hız profillerinin farklı yerçekimi vektörleri altında incelenmesi. *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21, 37-61.
- Selver, R., Katı, E., Karakuş, M.A., 2010. Akışkanın yüzey gerilim hareketlerinin dikdörtgenler prizması içerisinde incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7, 1, 83-96.
- Selver, R., Katı, E., 2011. Transition from the steady to the oscillatory thermocapillary convection in a rectangular container under various cold wall temperature effects. *Microgravity Science and Technology*, 23, 277-285.
- Wang, L., Kamoroni, Y., Yoda, S., 2008. Effect of heating orientation on oscillatory thermocapillary flow in liquid bridges. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, 1249-1252.
- Zeng, Z., Mizuseki, H., Higashino, K., Kawazoe, Y., 1999. Direct numerical simulation of oscillatory Marangoni convection in cylindrical liquid bridges. *Journal of Crystal Growth*, 204, 395-404.
- Zhiyong L., Gang Y., Xiuli H., Shaoxia L., Zhuang S., 2022. Surface Tension-Driven Flow and Its Correlation with Mass Transfer during L-DED of Co-Based Powders. *Metals*, 12(5), 842.