

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ÇATI TİPLERİNDE LAMİNER DOĞAL  
KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL  
OLARAK İNCELENMESİ**

Ahmet KOCA

DOKTORA TEZİ  
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2005

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ÇATI TİPLERİNDE LAMİNER DOĞAL  
KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL  
OLARAK İNCELENMESİ**

Ahmet KOCA

Doktora Tezi  
Makina Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, 22.08.2005 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç.Dr. Yasin VAROL

Üye: Prof.Dr. Beşir ŞAHİN

Üye: Yrd.Doç.Dr. Mehmet ESEN

Üye:Yrd.Doç.Dr. Celal SARSILMAZ

Üye: Yrd.Doç.Dr. İhsan DAĞTEKİN

Bu tezin kabûlü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ....../...../.....tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

## **TEŐEKKÖR**

Doktora çalıřmam boyunca bilgi ve tecrűbesinden sűrekli yararlandıėım sayın hocam Doç.Dr. Yasin VAROL'a, anlayıřlarından dolayı tűm asistan arkadařlarıma ve tezimin son halini almasında emeėi geçen eřime teőekkűrlerimi sunarım.

**Ahmet KOCA**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                    | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>İÇİNDEKİLER .....</b>                                           | <b>I</b>     |
| <b>ŞEKİLLER LİSTESİ.....</b>                                       | <b>II</b>    |
| <b>TABLolar LİSTESİ.....</b>                                       | <b>V</b>     |
| <b>EKLER LİSTESİ .....</b>                                         | <b>VI</b>    |
| <b>SEMBOLLER .....</b>                                             | <b>VII</b>   |
| <b>ÖZET .....</b>                                                  | <b>IX</b>    |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                               | <b>X</b>     |
| <br>                                                               |              |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                              | <b>1</b>     |
| <b>2. LİTERATÜR TARAMASI .....</b>                                 | <b>4</b>     |
| 2.1. Kapalı Olmayan Hacimlerde Doğal Konveksiyon Çalışmaları ..... | 4            |
| 2.2. Kapalı Hacimlerde Doğal Konveksiyon Çalışmaları .....         | 7            |
| <b>3. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON .....</b>                           | <b>19</b>    |
| 3.1. Temel Denklemler.....                                         | 20           |
| 3.2. Sınır Şartları .....                                          | 21           |
| 3.3. Akım-Girdap Formülasyonu .....                                | 24           |
| 3.4. Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması .....                       | 26           |
| <b>4. SAYISAL ÇÖZÜM .....</b>                                      | <b>29</b>    |
| 4.1. Grid Sistemi .....                                            | 29           |
| 4.2. Temel Denklemlerin Cebirsel Denklemlere Dönüştürülmesi .....  | 31           |
| 4.3. Cebirsel Denklemlerin Çözümü .....                            | 36           |
| 4.4. Nusselt Sayısının Hesaplanması .....                          | 36           |
| 4.5. Fortran Programında İşlem Sırası .....                        | 38           |
| <b>5. SONUÇLARIN ANALİZİ.....</b>                                  | <b>40</b>    |
| 5.1. Optimum Grid Sayısı .....                                     | 40           |
| 5.2. Akış Alanının İncelenmesi .....                               | 43           |
| 5.3. Sıcaklık Alanının İncelenmesi .....                           | 54           |
| 5.4. Isı Transferinin İncelenmesi.....                             | 62           |
| 5.5. Sonuçların Literatür İle Karşılaştırılması .....              | 69           |
| <b>6. BULGULAR VE ÖNERİLER .....</b>                               | <b>74</b>    |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                             | <b>77</b>    |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                    |              |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

### Şekil 3.1. Çatı tipleri

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| a) Beşik çatı .....                     | 19 |
| b) Mansart çatı .....                   | 19 |
| c) Sundurma çatı .....                  | 20 |
| d) Farklı yüzey alanlı beşik çatı ..... | 20 |

### Şekil 3.2. Sınır şartları

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| a) Beşik çatı .....                     | 22 |
| b) Mansart çatı .....                   | 22 |
| c) Sundurma çatı .....                  | 23 |
| d) Farklı yüzey alanlı beşik çatı ..... | 23 |

### Şekil 4.1. Beşik çatı için grid sistemi.....30

### Şekil 4.2. Sundurma çatı için grid sistemi .....30

### Şekil 4.3. Mansart çatı için grid sistemi.....31

### Şekil 4.4. Farklı yüzey alanlı beşik çatı için grid sistemi .....31

### Şekil 4.5. Grid sistemi için düğüm noktaları .....32

### Şekil 4.6. Yerel Nusselt sayılarının bulunmasında kullanılan düğüm

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| noktaları; (a) Tavan için, (b) Çatı için..... | 38 |
|-----------------------------------------------|----|

### Şekil 4.7. Fortran programlarının akış şeması .....39

### Şekil 5.1. Ortalama Nusselt sayısının grid sayısı ile değişimi

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| a) Beşik çatı .....                     | 41 |
| b) Mansart çatı .....                   | 41 |
| c) Sundurma çatı .....                  | 42 |
| d) Farklı yüzey alanlı beşik çatı ..... | 42 |

### Şekil 5.2. Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Yaz sezonu) ...44

### Şekil 5.3. Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Kış sezonu) ....45

### Şekil 5.4. Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım

|                              |    |
|------------------------------|----|
| çizgileri (Yaz sezonu) ..... | 46 |
|------------------------------|----|

### Şekil 5.5. Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım

|                              |    |
|------------------------------|----|
| çizgileri (Kış sezonu) ..... | 48 |
|------------------------------|----|

### Şekil 5.6. Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım

|                              |    |
|------------------------------|----|
| çizgileri (Yaz sezonu) ..... | 49 |
|------------------------------|----|

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.7.</b> Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Kış sezonu) .....                 | 50 |
| <b>Şekil 5.8.</b> F.Y.A.B. çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Yaz sezonu) .....                 | 52 |
| <b>Şekil 5.9.</b> F.Y.A.B. çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Kış sezonu) .....                 | 53 |
| <b>Şekil 5.10.</b> Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Yaz sezonu) .....                | 55 |
| <b>Şekil 5.11.</b> Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Kış sezonu) .....                | 56 |
| <b>Şekil 5.12.</b> Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Yaz sezonu) .....              | 57 |
| <b>Şekil 5.13.</b> Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Kış sezonu) .....              | 59 |
| <b>Şekil 5.14.</b> Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Yaz sezonu) .....             | 60 |
| <b>Şekil 5.15.</b> Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Kış sezonu) .....             | 61 |
| <b>Şekil 5.16.</b> F.Y.A.B. çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Yaz sezonu) .....             | 63 |
| <b>Şekil 5.17.</b> F.Y.A.B. çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Kış sezonu) .....             | 64 |
| <b>Şekil 5.18.</b> Beşik çatıda ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi .....                            | 65 |
| <b>Şekil 5.19.</b> Mansart çatıda ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi .....                          | 66 |
| <b>Şekil 5.20.</b> Sundurma çatıda ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi .....                         | 67 |
| <b>Şekil 5.21.</b> F.Y.A.B. çatıda ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi .....                         | 67 |
| <b>Şekil 5.22.</b> $Ra=10^3$ için yaz sezonunda yerel Nusselt sayılarının tavan yüzeyindeki x mesafesiyle değişimi ..... | 68 |
| <b>Şekil 5.23.</b> $Ra=10^6$ için yaz sezonunda yerel Nusselt sayılarının tavan yüzeyindeki x mesafesiyle değişimi ..... | 68 |
| <b>Şekil 5.24.</b> $Ra=10^3$ için kış sezonunda yerel Nusselt sayılarının çatı yüzeyindeki y mesafesiyle değişimi .....  | 68 |
| <b>Şekil 5.25.</b> $Ra=10^6$ için kış sezonunda yerel Nusselt sayılarının çatı yüzeyindeki y mesafesiyle değişimi .....  | 69 |

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.26.</b> Beşik çatı için yaz sezonunda farklı geometrik oranlarda ortalama Nusselt sayısı ile Rayleigh sayısının değişimi .....         | 70 |
| <b>Şekil 5.27.</b> Beşik çatı için kış sezonunda farklı geometrik oranlarda ortalama Nusselt sayısı ile Rayleigh sayısının değişimi .....         | 72 |
| <b>Şekil 5.28.</b> Beşik çatının yaz sezonunda $Ra=2772$ ve $bo-en=0.25$ için alt yüzeydeki yerel Nusselt sayısının $x$ mesafesiyle değişimi..... | 73 |

## TABLÖLER LİSTESİ

|                                                                                    | <u>Sayfa</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Tablo 5.1.</b> Optimum grid sayısının tespitinde kullanılan grid sayıları ..... | 41           |
| <b>Tablo 5.2.</b> Çatılar için seçilen optimum grid sayıları .....                 | 42           |

## **EKLER LİSTESİ**

### **EK1. Farklı çatı tipleri için hazırlanan Fortran programları**

- a)** Beşik çatı için hazırlanan Fortran programı
- b)** Mansart çatı için hazırlanan Fortran programı
- c)** Sundurma çatı için hazırlanan Fortran programı
- d)** Farklı yüzey alanlı beşik çatı için hazırlanan Fortran programı

### **EK2. Farklı çatı tipleri için yaz ve kış sezonlarında hız grafikleri**

- a)** Beşik çatı için hız grafikleri
- b)** Mansart çatı için hız grafikleri
- c)** Sundurma çatı için hız grafikleri
- d)** Farklı yüzey alanlı beşik çatı için hız grafikleri

## SEMBOLLER LİSTESİ

|                  |                                      |
|------------------|--------------------------------------|
| $c_p$            | : Sabit basınçta özgül ısı (J/kgK)   |
| $g$              | : Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ )       |
| $Gr$             | : Grashof sayısı                     |
| $h$              | : Isı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ ) |
| $H$              | : Çatı yüksekliği (m)                |
| $i$              | : “x” yönündeki grid numarası        |
| $j$              | : “y” yönündeki grid numarası        |
| $k$              | : Isı iletim katsayısı ( $W/mK$ )    |
| $L$              | : Çatı uzunluğu (m)                  |
| $M$              | : “x” yönündeki düğüm sayısı         |
| $N$              | : “y” yönündeki düğüm sayısı         |
| $Nu$             | : Nusselt sayısı                     |
| $Nu_{ort}$       | : Ortalama Nusselt sayısı            |
| $Nu_x$           | : “x” yönündeki yerel Nusselt sayısı |
| $Nu_y$           | : “y” yönündeki yerel Nusselt sayısı |
| $q$              | : Isı akısı ( $W/m^2$ )              |
| $p$              | : Basınç ( $N/m^2$ )                 |
| $Pr$             | : Prandtl sayısı                     |
| $r$              | : Relaksasyon faktörü                |
| $Ra$             | : Rayleigh sayısı                    |
| $T$              | : Sıcaklık (K)                       |
| $T_l$            | : Başlangıç sıcaklığı (K)            |
| $T_c$            | : Çatının soğuk yüzey sıcaklığı      |
| $T_h$            | : Çatının sıcak yüzey sıcaklığı      |
| $T_ç$            | : Çatı yüzey sıcaklığı (K)           |
| $T_t$            | : Tavan yüzey sıcaklığı (K)          |
| $T^1$            | : Sıcaklığın yeni değeri (K)         |
| $T^0$            | : Sıcaklığın eski değeri (K)         |
| $T^{hesaplanan}$ | : Sıcaklığın hesaplanmış değeri (K)  |
| $u$              | : “x” yönündeki hız bileşeni (m/s)   |

|            |                                        |
|------------|----------------------------------------|
| $v$        | : “y” yönündeki hız bileşeni (m/s)     |
| $x$        | : Yatay Kartezyen koordinat            |
| $y$        | : Dikey Kartezyen koordinat            |
| $\Delta x$ | : “x” yönündeki boyutsuz grid aralığı  |
| $\Delta y$ | : “y” yönündeki boyutsuz grid aralığı  |
| $\beta$    | : Isıl genleşme katsayısı ( $K^{-1}$ ) |
| $\rho$     | : Yoğunluk ( $kg/m^3$ )                |
| $\psi$     | : Akım fonksiyonu                      |
| $\omega$   | : Girdap fonksiyonu                    |
| $\Psi$     | : Boyutsuz akım fonksiyonu             |
| $\Omega$   | : Boyutsuz girdap fonksiyonu           |
| $\theta$   | : Boyutsuz sıcaklık fonksiyonu         |
| $\nu$      | : Kinematik viskozite ( $m^2/s$ )      |

## ÖZET

Doktora Tezi

### FARKLI ÇATI TIPLERİNDE LAMİNER DOĞAL KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

**Ahmet KOCA**

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Bölümü Anabilim Dalı

2005, Sayfa: 84

Bu çalışmada, farklı çatı tiplerinde (beşik, mansart, sundurma ve farklı yüzey alanlı beşik çatı) ısı transferi ve akışkan hareketi sayısal olarak incelenmiştir. Tezin temel amacı, Elazığ ve benzer iklimli bölgeler için ısı transferi açısından en uygun çatı tipinin belirlenmesidir. Çatılar kapalı hacim gibi düşünülerek laminar doğal konveksiyon ile ısı transferi sürekli rejimde incelenmiştir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri Boussinesq Yaklaşımı ve akım-girdap formülasyonu kullanılarak düzenlenmiştir. İki boyutlu sayısal çözüm için sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Fortran dilinde hazırlanan bilgisayar programı ile diferansiyel denklemler çözümlenmiştir. Her çatı tipi için optimum grid sayıları tespit edilmiştir. Yaz ve kış sezonlarında farklı Rayleigh sayıları için akış ve sıcaklık alanları kullanılarak Nusselt sayısının değişimi bulunmuştur.

Tüm çatı tiplerinde akış ve sıcaklık alanlarının yaz sezonuna oranla kış sezonunda Rayleigh sayısından daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir. En yüksek ısı transferi, yaz sezonunda “Mansar Çatı”da kış sezonunda da “Farklı Yüzey Alanlı Beşik Çatı”da görülmüştür. Elazığ ve benzer iklimli bölgeler için yalıtımı iyi olan binalarda “Mansart Çatı”nın, yalıtımı iyi olmayan binalarda da “Sundurma Çatı”nın ısı transferi açısından uygun olduğu grafiklerle sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Isı Transferi, Doğal Konveksiyon, Çatı

## **ABSTRACT**

PhD Thesis

### **NUMERICAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER WITH LAMINAR NATURAL CONVECTION IN DIFFERENT ROOF TYPES**

**Ahmet KOCA**

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

2005, Page: 84

In this study, heat transfer and fluid flow is investigated numerically for different roof types (gable, gambrel, shed, salt box roof). Main purpose of the thesis is to determine the most suitable roof types in terms of heat transfer for Elazig and similar climate regions. Roof is considered as an enclosure and steady-state heat transfer with laminar natural convection is investigated. Equations of continuity, momentum and energy are solved by using Boussinesq approximation and vorticity-stream function formulation. Finite difference method is used for two-dimensional numerical solution. The differential equations are solved by computer program written in Fortran programming language. Optimum grid numbers are determined for each roof types. Variation of Nusselt number is obtained by using flow and temperature fields for different Rayleigh numbers in summer and winter periods.

It is determined that, flow and temperature fields are more influenced by Rayleigh numbers for all types of roof in winter comparing to summer periods. It is seen that gambrel roof and salt box roof have the most heat transfer rate in summer and winter periods, respectively. For Elazig and similar climate regions, it is illustrated by figures that "Gambrel Roof" is suitable for well-insulated buildings and "Shed Roof" is suitable for not-well-insulated buildings as far as the heat transfer is concerned.

**Key Words:** Heat Transfer, Natural Convection, Roof

## 1. GİRİŞ

Enerji, hayat kalitemizi iyileştiren en temel faktörlerden biridir. Günümüzde üretimin ana unsuru olan enerjinin tüketimi sürekli artmaktadır. 1970’li yıllarda yaşanan petrol krizi ve dünyada yaygın şekilde kullanılan bu kaynağın rezervlerinin 2050 yılından itibaren tükeneceği gerçeği yeni ve alternatif enerji kaynaklarına yönelik arayışları hızlandırmıştır. Ayrıca mevcut enerjinin verimli kullanımına daha da fazla önem verilmeye başlanmış ve enerji tasarrufu konusu gündeme gelmiştir.

Tarihsel süreçte enerjinin kullanımı insanın var oluşu ile başlar. İlk çağlarda insanlar, güçlerinin yetmediği işleri yapmak için hayvan enerjisinden ve ateşin keşfiyle ateşin gücünden yararlanmaya başlamışlardır. Kömür, günümüzden 3000 yıl önce Çinliler tarafından bulunmuş ve ısıtma amaçlı kullanılmıştır. Buharlı makinelerin geliştirilmesiyle birlikte kullanım alanı da oldukça genişlemiştir. Amerika’nın Pensilvanya Eyaletinde petrolün bulunmasıyla doğalgaz, fuel-oil ve benzin gibi petrol türevlerinin de kullanımına başlanmış ve günümüze kadar gelmiştir [1].

Dünya enerji tüketiminin %82’si ısıtma amacıyla kullanılmaktadır [2]. Bir bina içerisinde sıcak veya soğuk hava yeterince içeride tutularak enerji tasarrufu yapılabilir. Binalarda gerekli ısı yalıtımlarının yapılmasıyla %25-50 arasında yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. Bir yapıdaki ısı kayıplarının %10’u döşemelerden, %10-25’i pencerelerden, %30-60’ı duvarlardan ve %25’i de tavan ve çatılardan olur. Isınan havanın yükselmesiyle bina içerisindeki ısı da çatıdan dışarıya çıkmaya çalışır. Bu nedenle çatı, binanın ısı yalıtımında dikkat edilmesi gereken yerlerden biridir.

Çatı, bir binanın en üst kısmında bulunan, binayı dış etkilere karşı korurken bazı estetik değerler de katan yapı elemanıdır [3]. Bir binanın çatısı, öncelikle yağmur ve kar sularının rahatlıkla akmasını sağlayacak uygun aç ve şekilde tasarlanır.

Çatılar yapıldıkları malzemenin cinsine ve eğimli yüzeylerinin meydana getirdiği şekillere göre sınıflandırılırlar.

Yapıldıkları malzemenin cinsine göre çatılar;

- a) Ahşap çatılar
- b) Çelik çatılar ve
- c) Betonarme çatılar

olmak üzere 3 temel gruba ayrılabilirler. Bazı çatılarda yukarıda belirtilen malzemelerin 2 veya daha fazlası birlikte kullanılarak çatıya daha fazla estetik ve sağlamlık verilebilmektedir. Bu

durumda çatı, ana yükünü taşıyan kısımda kullanılan yapım malzemesinin ismine göre adlandırılır [4].

Çatılar kendisini oluşturan eğimli yüzeyin şekline göre de sınıflandırılabilir. Binanın yapısına ve yerine göre çatı şekilleri farklılık göstermektedir. En fazla rastlanan çatı tipleri şöyle sıralanabilir:

- a) Sundurma çatı
- b) Beşik çatı
- c) Mansart çatı
- d) Kelebek kanatlı çatı
- e) Kıрма çatı

Yukarıda bahsedilen çatı sınıflandırılmalarının dışında, bir binada çatı arasında hava menfezlerinin olması veya olmaması durumuna göre de çatılar sınıflandırılabilirler. Çatı arası boşluğu hava menfezleri yardımıyla havalandırılan çatılara “soğuk çatılar”, hava menfezi bulunmayan çatılara da “sıcak çatılar” denilmektedir. Her iki çatı türünün de avantajları vardır.

Soğuk çatıların en önemli avantajları

- yaz aylarında oluşabilecek nemin dışarı çıkmasını sağlayarak ısı yalıtımını daha ekonomik bir hale getirir,
- kış aylarında buz oluşumunu engeller,
- kış aylarında çatı üstünde karların birikmesini önleyerek sızıntı oluşumunu engeller.

Sıcak çatıların en önemli avantajları ise

- çatı arası mekân olarak kullanılabilir,
- ısı kaynaklı hareketlerden dolayı binada oluşabilecek gerilmeler azaltılır,
- ekstra maliyet gerektirmez.

Çatı eğimleri bölgenin kar ve yağmur alma oranına göre belirlenir. Türkiye’deki iller bu orana göre farklı iklim bölgelerine ayrılmıştır. Her iklim bölgesi için belirlenmiş çatı eğim değerleri vardır. Çatı eğimleri; oran, yüzde ve açı cinsinden olmak üzere üç şekilde ifade edilir [5]. Elazığ ili için çatı eğimi yüzde cinsinden 33 olarak kabul edilmektedir. Bu değer anlamı; çatı yüksekliğinin, çatı genişliğinin yarısına oranının %33 olmasıdır.

Çatılarda ısı transferi göz önüne alındığında en önemli faktör çatı örtü malzemesinin cinsidir. Günümüzde çatı örtü malzemelerinin seçimi bölgesel şartlara göre yapılmaktadır. Ülkemizde ısıtma ve enerji tasarrufu ile ilgili birçok standart olduğu gibi çatıların yalıtılmasıyla

ilgili de Türk Standartlarının “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” isimli TSE 825 nolu standardı mevcuttur [6].

Binaların çatı ile tavan arasında kalan bölgesinde konveksiyonla ısı transferi geçerlidir. Hava menfezi olmayan bir çatıda (sıcak çatıda) akışkan hareketi tamamen yoğunluk farkından dolayı olduğundan bu tür çatılarda doğal konveksiyondan söz edilebilir. Genel olarak çatı gibi kapalı hacimlerde konveksiyonla ısı transferinin ve özellikle de akışkan hareketinin deneysel olarak tespiti oldukça güçtür. Bu durumda sayısal olarak çözüm yapılması gereklidir.

Bu çalışmada, beşik çatı, mansart çatı, sundurma çatı ve farklı yüzey alanlı beşik çatı için konveksiyonla ısı transferi ve akışkan hareketi sayısal olarak incelenmiştir. Çatıların boyutları, Elazığ ilinin de içinde bulunduğu üçüncü iklim bölgesindeki iklim şartlarına göre hesaplanmıştır. Akış laminer kabul edilerek hem yaz hem de kış sezonu için hesaplamalar yapılmıştır. Diferansiyel denklemlerin çözümünde sonlu farklar yöntemi kullanılarak 4 farklı çatı tipi için ayrı ayrı Fortran programları hazırlanmıştır. Sayısal çözümler Rayleigh sayısının  $10^3$ - $10^7$  aralığı için tekrarlanmıştır. Ayrıca farklı düğüm sayılarının sonuç üzerindeki etkisi incelenerek optimum düğüm sayısı bulunmuştur. Elazığ ve benzer iklimli bölgeler için ısı transferi açısından en uygun çatı tipinin tespiti yapılmıştır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Doğal konveksiyonla ısı transferi, özellikle son yıllarda üzerinde sıkça çalışılan konulardan biridir. Binaların havalandırması, çift camlı pencereler, ısıtma ve soğutma tankları, elektronik elemanların soğutulması gibi birçok güncel alanda doğal konveksiyonla ısı transferine rastlanmaktadır. Diğer yandan enerji tüketiminin hızla arttığı dünyada, enerjinin verimli kullanılması ile insanların yaşayabileceği daha rahat ve konforlu ortamların oluşturulması gerekir. Özellikle kapalı hacimlerde doğal konveksiyonla ısı transferi ve akışkan hareketinin incelenmesi bu sebeplerden dolayı daha da önem kazanmıştır.

Geçmiş yıllarda doğal konveksiyonla ısı transferi genellikle deneysel çalışmalarda incelenmiştir. Özellikle son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle sayısal çalışmalara olan ilgi de artmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalar ışığında, doğal konveksiyonla ısı transferinin sayısal çözümüyle ilgili konu başlıklarını genel olarak iki gruba ayırmak uygun olacaktır:

- 1-) Kapalı olmayan hacimlerde doğal konveksiyon çalışmaları
- 2-) Kapalı hacimlerde doğal konveksiyon çalışmaları

### 2.1. Kapalı Olmayan Hacimlerde Doğal Konveksiyon Çalışmaları

Genel olarak plaka üzerinde, plaka etrafında, plakalar arasında ve muhtelif cisimler arasındaki akışları bu gruba alabiliriz.

Radziemska ve Lewandowski [7], “U” şeklindeki bir plakanın sabit sıcaklıkta olduğunu kabul ederek bu plakanın etrafındaki sıcaklık karakteristiğini ve akışkan hareketini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu ve Nusselt ile Rayleigh sayıları arasında  $Nu = 0.68Ra^{1/5}$  bağıntısının olduğu bulunmuştur.

Dayan ve diğ. [8] ise ters “U” şeklindeki plakayı yalıtımlı kabul ederek laminar doğal konveksiyon sayısal ve analitik olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışma sonucunda, sınır tabaka kalınlığının minimum olduğu plaka kenarlarında ısı transferinin de çok güçlü olduğu görülmüştür. Ayrıca analitik çözümün oldukça yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği ve daha karmaşık geometrilere de analitik çözümün uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

Kwak ve Song [9], alt yüzeyinde dikdörtgen dişler olan ve üst yüzeyi yalıtımlı bir plaka etrafındaki doğal konveksiyon akışını deneysel ve sayısal olarak çözerek sabit sıcaklıkta kabul ettiği bu dişlerin ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Dişlerin plakayla temas ettiği bölgedeki

ısı transferinin, dışların aşağıya bakan alt yüzeylerindeki ısı transferine oranla çok daha düşük olduğu görülmüştür.

Düz bir plaka üzerinde ısı ve kütle transferi Sripada ve Angirasa [10] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Bu tür problemlerde  $Gr > 10^5$  olduğunda akışların çoğunun geçici rejimde olduğu tespit edilmiştir.

Bir başka çalışmada yine düz bir plaka üzerinde yarı sonsuz bir cisim üzerinden akış deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir [11]. Plakanın orta kısmının sabit ısı akısı ile ısıtıldığı kabul edilerek kontrol hacim yöntemiyle sayısal çözüm yapılmıştır. Yerel Nusselt sayısının plaka merkezinden kenarlara doğru gidildikçe arttığı görülmüştür.

Lin [12] ise eğik duran bir plaka üzerinden doğal konveksiyon akışını sayısal olarak çözmüştür. Çalışma sonucunda, plaka eğiminin Nusselt sayısına olan etkisinin, eğimin artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir.

Alami ve diğ. [13], “T” şeklindeki bir kanal akışının iki boyutlu sayısal çözümünü yapmışlardır. Kanalin geniş olan yan yüzeyleri ve alt yüzeyi yalıtılmış diğer yüzeyleri ise sabit sıcaklıkta kabul edilerek ısı ve kütle transferi birlikte çözülmüştür. Isı ve kütle transferi için kanal blok genişliğinin fonksiyonu olan denklemler elde edilmiştir.

Üzerinde dikey silindirik kanatçıklar bulunan yatay düz bir plaka üzerindeki doğal konveksiyonla ısı transferi, deneysel ve sayısal olarak incelenerek kanatçıkların üzerindeki yerel Nusselt sayılarının değişimi araştırılmıştır [14]. Düşük Rayleigh sayılarında kanatçıklardan transfer edilen ısı miktarının, düz plakadan transfer edilen ısı miktarına oranla daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Özek [15], üzerinde dikdörtgen kesitli kanatçıklar bulunan düz bir plaka üzerindeki sürekli rejimde laminar doğal konveksiyon akışını sayısal olarak modellemiştir. Bu çalışmada kanatçık boyutları ve aralarındaki mesafelerin ısı transferine etkisi araştırılmıştır. Küçük kanatçık yüksekliği-boyu oranı için kanatçıklar arasındaki mesafenin daha büyük olmasının ısı transferini artırdığı sonucu elde edilmiştir.

Kanlı [16] yatay duran iki paralel levha arasındaki doğal konveksiyonla ısı transferini sayısal olarak çözerken alt levhayı izotermal ısıtılmış, üst levhayı ise yalıtılmış olarak kabul etmiştir. Levhalar arasındaki uzaklığın artmasıyla ısı transferinin de arttığı bulunmuştur.

Başka bir çalışmada ise paralel plakalar arasındaki doğal konveksiyon hem deneysel hem de sayısal olarak çözülmüştür [17]. Araştırmacılar plakaları sabit sıcaklıkta kabul ederek çözüm yapmışlardır. Ortalama Nusselt sayısı için, Grashof sayısı ve plakaların geometrik oranlarına bağlı bir eşitlik elde edilmiştir ( $Nu_{avg} = 0.38Gr^{0.26}(L/S)^{-0.16}$ ).

Morrone ve Campo [18], iki dikey levhanın doğal konveksiyonlu hava akışıyla soğutulmasını incelemişlerdir. Bu tür geometriler için plakalar arasındaki mesafeye ve plaka

uzunluğuna bağlı olarak Grashof sayısı için bir bağıntı geliştirilmiştir ( $(b/L)_{opt} = 4.57(Gr)^{-0.192}$ ).

Üzerinde kanatçıklar bulunan dikey levhalar arasındaki doğal konveksiyon Desrayaud ve Fichera [19] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada kanatçığın üç farklı bölgedeki (levhanın alt, orta ve üst kısmında) pozisyonuna göre hesaplamalar tekrarlanmıştır. Sonuçta kanatçığın levhanın üst kısmına doğru hareketiyle birlikte ortalama Nusselt sayısının da arttığı görölmüştür.

Giri ve diğ. [20], dik duran kanatçıklı bir plakadan ısı ve kütle transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Kanatçıkların boyları ve aralarındaki mesafe değiştirilerek yerel ve ortalama Nusselt sayısının değişimi araştırılmıştır. Kanatçık boyuyla birlikte Nusselt sayısının da aynı oranda düştüğü ancak kütle transferinin kanatçık boyunun değişiminden çok daha az etkilendiği bulunmuştur.

akmanus [21] ise alt yüzeyinde ısıtıcı bloklar bulunan ve üst duvarı yalıtılmış iki paralel levha arasındaki kanal akışını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir. Rayleigh sayısının artışıyla, Nusselt sayısının da arttığı, bloklardaki sıcaklıkların ise düştüğü bulunmuştur.

İçerisindeki silindirik tüp ile akışın engellendiği dikey kanal akışı çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Bu çalışmaların birinde dikey duvarlar arasındaki izotermal yatay silindir, problem geometrisi olarak seçilmiş ve düşük Rayleigh sayılarında laminar doğal konveksiyon deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir [22]. Çalışma sonucunda  $Nu = Ra_D^{0.188}$  bağıntısı bulunmuştur. Bir başka benzer çalışmada ise dikey duvarların sıcaklıkları farklı kabul edilerek ısı transferi incelenmiştir. [23]. Yatay silindirin kanal duvarına olan uzaklığının silindir çapına oranı 3 ile 5 arasında olması durumunda maksimum ısı transferinin elde edildiği saptanmıştır.

Yüzeyle açı yapan bir kanaldaki laminar doğal konveksiyon akışı geçici rejimde sayısal olarak incelenmiştir [24]. Kanalın açısı 45° ve 60° olarak seçilip akışkanın su olduğu kabul edilmiştir. Prandtl sayısının 5'e eşit ve kanal duvarları arasındaki sıcaklık farkının sabit olduğu durumda Rayleigh sayısı, kanal geometrik oranı ve kanal açısına bağlı olarak Nusselt sayısının elde edilebileceği bir denklem bulunmuştur ( $Nu = 0.644[Ra(H/L).sin\beta]^{0.25}$ ).

Gao ve diğ. [25], alt duvarı yalıtımlı, üst duvarı sinüs dalgası şeklinde olan açılı bir kanal içindeki doğal konveksiyon akışını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kanal içerisindeki ısı kaybını minimuma indirmek için kanalın optimum boyutları bulunmuştur.

Üzerinde ısıtıcı bloklar bulunan dikey kanallardaki ısı ve kütle transferi Lee [26] tarafından incelenmiştir. Akışın laminar doğal konveksiyon olarak kabul edildiği sayısal çalışmada Sherwood ve Nusselt sayıları için çeşitli bağıntılar geliştirilmiştir.

Demiralay [27], iki yüzeyi yalıtılmış, alt yüzeyinde ısıtıcı elemanlar olan ve yatay yüzeyle açığı yapan bir kanal akışının, kontrol hacim yöntemini kullanarak iki boyutlu sayısal çözümünü yapmıştır. Çalışma sonucunda düşük Rayleigh sayılarında ortalama Nusselt sayısının kanalın eğim açısıyla doğru orantılı olarak arttığı bulunmuştur.

Sahoo ve Sastri [28], yukarıya doğru genişleyen kanallardaki ısı transferi ve akışkan akışını sayısal olarak incelemiştir. Farklı Prandtl sayılarında kanal açılarının akışkan hareketine büyük etkisi olmasına rağmen ısı transferine çok fazla etki etmediği görülmüştür.

Kaiser ve diğ. [29], yukarıya doğru daralan kanaldaki iki boyutlu laminar doğal konveksiyon akışını sayısal olarak incelemiştir. Kanal duvarlarının simetrik ve asimetrik ısıtılması durumunda ortalama Nusselt sayısı için bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntılar Rayleigh sayısının geniş bir aralığı için ( $1-10^6$ ) geçerlidir.

Bir başka çalışmada dikey duran sabit sıcaklıktaki bir silindirden çevresine doğal konveksiyonla ısı transferi sonucunda oluşacak entropi üretimi sayısal olarak hesaplanmıştır [30]. Farklı Rayleigh sayıları ve silindir çapları için entropi üretiminin değişimi bulunmuştur. Silindir çapının artırılmasıyla toplam entropi üretiminin azaldığı görülmüştür.

Chouikh ve diğ. [31], yatay bir silindir etrafındaki doğal konveksiyonu Kartezyen koordinatlarda incelerken sabit sıcaklık ve sabit ısı akısı sınır şartlarını kullanmışlardır. Elde edilen sonuçların literatüre uygun olduğu ve bu çalışmanın benzerinin sıralı dikey silindirler için de yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Bir önceki çalışmalarının devamı olarak Chouikh ve diğ. [32], bu sefer iki yatay izotermal silindir arasındaki laminar doğal konveksiyon akışını Kartezyen koordinatlarda sayısal olarak çözmüşlerdir. Silindirler arasındaki mesafe dar olduğunda Nusselt sayısının azaldığı, mesafe genişlediğinde de Nusselt sayısının arttığı gözlemlenmiştir.

## 2.2. Kapalı Hacimlerde Doğal Konveksiyon Çalışmaları

Küre, silindir, küp, dikdörtgen gibi kapalı hacme sahip geometrilere ait doğal konveksiyon problemlerinin sayısal çözümü birçok araştırmacıya konu olmuştur.

Wen Wu ve diğ. [33], eş eksenli olmayan iç içe geçmiş iki küre arasındaki akışkan hareketini geçici rejimde sayısal olarak incelemiştir. Düşük Rayleigh sayılarında Prandtl

sayısının akışkan hareketine etkisinin olmadığı fark edilmiştir. Ayrıca içteki kürenin eksen merkezinden daha aşağıda olması durumunda ısı transferinin daha yüksek olduğu bulunmuştur.

He ve diğ. [34], kapalı dikey bir silindir içindeki ısı transferini sürekli rejimde sayısal olarak çözmüşlerdir. Silindirin alt ve üst yüzeylerini sabit ve farklı sıcaklıklarda, silindirin yan yüzeyini ise yalıtılmış kabul ederek farklı boy-çap oranları için çözüm tekrarlanmıştır. Boy-çap oranının artmasıyla ısı transferinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Lin ve Armfield [35], hem dikey silindir şeklindeki hem de dikdörtgen şeklindeki kapalı hacimlerde geçici rejimde ısı transferini ve akışkan hareketini sayısal olarak incelemişlerdir. Aynı akış özellikleri dikkate alındığında dikdörtgen şeklindeki kapalı hacim için ısı sınır tabaka kalınlığının değişmediği ancak silindirik hacimde bu tabakanın silindirin üst tarafına gidildikçe kalınlaştığı gözlemlenmiştir.

Yan yüzeylerinden birinde yüksek ısıl iletkenlikli dikdörtgen bir kanatçık bulunan küpün laminar doğal konveksiyonla ısı transferi sayısal olarak çözülmüştür [36]. Kanatçık hacminin çok büyük ve çok küçük olması durumlarında kanatçığın geometrik oranlarının ısı transferine etkisi incelenmiştir. Kanatçık hacminin çok büyük olması durumunda geometrik oranın ısı transferini etkilemediği, kanatçık hacminin çok küçük olması durumunda geometrik oranın artmasıyla ısı transferinin de arttığı görülmüştür.

Takahashi ve diğ. [37], iç içe geçmiş iki silindirik boru arasındaki doğal konveksiyonla ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışma, iç borunun, dış borunun ve her ikisinin de aynı anda ısıtılmış olduğu durumlar için tekrarlanmıştır. Çalışma sonucunda yerel ve ortalama Nusselt sayıları için bağıntılar elde edilmiştir.

Bir başka çalışmada su dolu silindirik bir kaptaki eritilmek istenen silindirik buz kalıbının ısı analizi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir [38]. Bu türden bir buz eritme işleminde akışkan hareketinin geçici rejimde değişimi bulunmuştur.

Çift camlı kubbelerde, cam katmanları arasındaki laminar doğal konveksiyonla ısı transferi ve akışkan hareketi Laouadi ve Atif [39] tarafından incelenmiştir. Sayısal çalışma sürekli rejimde kontrol hacim yöntemiyle yapılmıştır. Yarım daire profilli ve çeyrek daire profilli iki farklı kubbe ile farklı cam aralıkları için çalışma tekrarlanmıştır. Yarım daire profilli kubbede diğer profile göre, düşük cam aralığında %13, yüksek cam aralığında ise %100 oranında daha fazla ısı transferinin olduğu görülmüştür.

Shu ve Zhu [40], iç içe geçmiş iki silindirin dıştakini soğuk ve kare şeklinde kabul ederek ısı transferi ve akışkan hareketini akım-girdap formülasyonu ile sayısal olarak incelemişlerdir. Rayleigh sayısının ve çap oranlarının akışkan hareketine oldukça etki ettiği ve kanal oranının ( $L/D$ ) düşmesiyle ısı transferinin arttığı bulunmuştur.

Hirose ve diğ. [41], eş eksenli iki cisimden dıştakini elips şeklinde içtekini dairesel kabul ederek ısı transferi ve akışkan hareketini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Elips açısının ve cisim merkezleri arasındaki farkın ısı transferini etkilediği bulunmuştur. Elips açısının ( $\phi = 1$ ) olduğu durumda ısı transferinin minimum olduğu tespit edilmiştir.

Kumar [42], iki silindir arasına yerleştirilmiş kanatçıklardan doğal konveksiyonla ısı transferini sayısal olarak çözmüştür. Çalışmada ısı transferini artıracak optimum kanatçık boyutları bulunmuştur. Başka bir çalışmada ise farklı kanatçık geometrileri (sivri, yuvarlak, düz uçlu) ve konfigürasyonları incelenmiştir [43]. Kanatçık etkinliği açısından yuvarlak uçlu kanatçığın daha uygun olduğu bulunmuştur. Isı transferi açısından ise dört kanatçıklı konfigürasyon, altı kanatçıklı konfigürasyona göre %10 daha verimli çıkmıştır.

Doğal konveksiyon problemlerinin sayısal çözümü için literatürde en fazla dikdörtgen şeklindeki kapalı hacimlerle ilgili araştırmaların yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmaların birçoğunda dikdörtgen şeklindeki kapalı hacmin iki duvarı yalıtımlı, diğer iki duvarı da farklı sabit sıcaklıklarda kabul edilerek çözüm yapılmıştır. Aydın ve diğ. [44], dikdörtgen kesitli alt ve sağ duvarı yalıtılmış ve diğer iki duvarı farklı sıcaklıktaki hacmin içinde havanın hareketini sürekli rejimde iki boyutlu çözmüştür. En-boy oranının 1'den küçük olduğu durumda Rayleigh sayısının ısı transferine daha fazla etki ettiği bulunmuştur.

Aktas ve Farouk [45], dikdörtgen kesitli kapalı bir hacimde termo-akustik dalga hareketinin etkisiyle gelişen doğal konveksiyonu sayısal olarak incelemişlerdir. Termo-akustik dalgaları elde etmek için yan duvarlardan biri hızlı bir şekilde soğutulup ısıtılmış diğeri ise sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Alt ve üst duvarlar ise yalıtımlı olarak kabul edilmiştir. Farklı akışkan özelliklerinin (Nitrojen ve hidrojen) termo-akustik dalgalanmaya etkisi incelenmiştir. Termo-akustik dalga gücünün, akışkanın ısı yayılımından kuvvetlice etkilendiği görülmüştür.

Bir başka çalışmada ise alt ve üst duvarları yalıtılmış dikdörtgen kapalı hacimde sol duvar soğuk kabul edilirken sağ duvar sinüsoidal değişimli sıcaklığa sahip olarak kabul edilmiş ve doğal konveksiyonla ısı transferi sayısal olarak çözülmüştür [46]. Maksimum dalgalanmanın olduğu Nusselt sayısında, ortalama Nusselt sayının da en fazla oranda arttığı görülmüştür.

Frederic [47] de benzer geometride en-boy oranını değiştirerek maksimum ısı transferini elde etmeye çalışmıştır. Çalışma sonucunda düşük Rayleigh sayılarındaki yüksek en-boy oranlarında ısı transferinin arttığı bulunmuştur.

Piazza ve Ciofab [48], hacimsel olarak ısıtılan ve en-boy oranı 4 olan dikdörtgen kapalı hacimde doğal konveksiyonu sayısal olarak incelemişlerdir. Kapalı hacmin alt ve üst duvarları yalıtılmış, yan duvarları ise sabit sıcaklıkta kabul edilmiştir. Düşük Prandtl sayısında ( $Pr=0.0321$ ) ve Grashof sayısının geniş bir aralığı ( $10^4 \leq Gr \leq 10^9$ ) için gerçekleştirilen iki boyutlu sayısal çözüm sonucunda yüksek Grashof sayılarında ( $Gr=1.26 \times 10^9$ ) bile çok yüksek olmayan

Nusselt değerlerine ( $Nu \sim 2.7$ ) ulaşılmıştır. Bir başka çalışmalarında ise sadece problem geometrisini kare kabul ederek sayısal çözümü tekrarlamışlardır[49]. Benzer Nusselt değerlerine bu çalışmada da ulaşılnca düşük Prandtl sayılarında kapalı hacmin yüksekliğinin Nusselt sayısına etkisinin çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Arcidiacona ve Ciofalo [50], hacimsel ısıtılan ve dikdörtgen kapalı hacmi problem geometrisi olarak kabul ederek düşük Prandtl sayısındaki doğal konveksiyonu incelemişlerdir. Çalışmada Grashof sayısının ve kapalı hacmin geometrik oranının (yükseklik/genişlik) Nusselt sayısına etkisi incelenmiştir. Geometrik oranının ısı transferini çok fazla etkilemediği ayrıca  $Gr > 10^7$  olduğunda Nusselt sayısının yaklaşık  $Gr^{1/5}$  değerine eşit olduğu bulunmuştur.

Lee ve Ha [51], iç içe geçmiş iki kare cisim arasındaki ısı transferinin geçici rejimde iki boyutlu sayısal çözümünü yapmışlardır. Dıştaki kare cismin alt ve üst duvarlarını farklı sıcaklıklarda yan duvarlarını ise yalıtımlı kabul etmişlerdir. İçteki cismin ısıl iletkenliğinin ve Rayleigh sayısının ısı transferine etkisi incelenmiştir. İçteki cismin ısıl iletkenliğinin konveksiyonla ısı transferine etkisinin çok az olduğu, Rayleigh sayısının  $10^4$ 'ün altındaki değerlerinin konveksiyonla ısı transferini etkilemediği görülmüştür.

Sundaravadivelu ve Kandaswamy [52], dikdörtgen kesitli kapalı hacimde doğal konveksiyonu incelemişlerdir. Hacim içerisinde soğuk su olduğunu kabul ederek “Successive Over Relaxation (SOR)” metoduyla denklemlerin çözümü yapılmıştır. Isı ve kütle transferi hesaplamaları sonucunda yüksek sıcaklıklarda, çok hücreli akış hareketinin de artması sonucunda ısı ve kütle transferi miktarının lineer olmayan bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Moshkin [53], içerisinde iki farklı akışkanın olduğu dikdörtgen kesitli kapalı hacimdeki doğal konveksiyonu sonlu farklar yaklaşımıyla sayısal olarak çözmüştür. Elde edilen iki boyutlu sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyum içinde oldukları görülmüştür. Bu iki akışkanın hareketleri arasında sıkı bir bağın olduğu tespit edilmiştir. Bu bağın konveksiyon akışının geometrisi ve fiziksel özelliklerine bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca daha düşük viskoz özelliğe sahip üst kısımdaki akışkanın alt kısımdaki akışkana oranla konveksiyon akışında daha önemli rol oynadığı görülmüştür.

Costa [54], düşey duvarlarını ısıl geçirgen kabul ettiği dikdörtgen kesitli kapalı hacimde laminar doğal konveksiyonu incelemiştir. Çalışmada bir boyutlu ve iki boyutlu sayısal çözümler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda bir ve iki boyutlu sayısal çözümler arasında Nusselt sayısında en fazla %17 ve sıcaklık farkında en fazla %10'luk bir sapmanın olduğu görülmüştür.

Manz [55], farklı boy-en oranlarındaki (20, 40, 80) dikdörtgen kesitli kapalı hacimde doğal konveksiyon problemini sayısal olarak incelemiştir. Rayleigh sayısının fonksiyonu olarak

Nusselt sayısı bağıntısı çıkarılmış ve literatürdeki örnekleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaların biri haricinde %20 oranında benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Yılbas ve diğ. [56], alt ve üst duvarları farklı sıcaklıktaki dikdörtgen kapalı hacimdeki doğal konveksiyonla ısı transferinin iki boyutlu çözümünü yaparak entropi üretimini hesaplamışlardır. Sıcaklığın bölgesel artışı sonucunda sağ alt kısımda dikey sirkülasyon oluşumunun görüldüğü ayrıca “x” doğrultusu boyunca sirkülasyonun artmasıyla entropi üretiminin de arttığı sonucuna varılmıştır.

Seu ve diğ. [57], kimyasal bir depolama tankını model almışlardır. Bu tankın içindeki reaktif akışkanın termal patlamaları sonucunda oluşacak ısı üretimini sayısal olarak incelemişlerdir. Tank duvarları sabit sıcaklıkta kabul edilerek akışkanın geçici rejimdeki doğal konveksiyon problemi çözülmüştür. Çalışma sonucunda oldukça yüksek doğrulukta sonuçlar alınmış ve reaktif depolama tanklarındaki termal patlamaların ön değerlendirilmesinin sayısal olarak yapılabileceği bulunmuştur.

Sarris ve diğ. [58], alt tarafından ısıtılan dikdörtgen şeklindeki cam eritme tankının içindeki akışkan hareketini ve ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada ısıtıcının yeri ve geometrisi ile Rayleigh sayısının ısı transferine etkisi araştırılmıştır. Tank boyutu ve ısıtıcı kalınlığının artırılmasıyla, akış sıcaklığının ve sirkülasyon yoğunluğunun da arttığı görülmüştür.

Dubovsky ve diğ. [59], dikdörtgen şeklindeki bir havalandırma sisteminin sıcaklık karakteristiğini sürekli ve geçici rejimde sayısal ve deneysel olarak çıkarmışlardır. Sisteme hava giriş yerini (haznenin alt, üst ve orta kısımlarından) değiştirerek karşılaştırma yapılmıştır. Hava girişinin üstten olması durumunda en yüksek ısı transferi, alttan olması durumunda ise en düşük ısı transferi değerleri elde edilmiştir.

Bir başka çalışmada akışkan olarak silikon yağının kullanıldığı dikdörtgen şeklindeki bir hazne üç bölgeye ayrılarak üst bölgede ısıtma, alt bölgede soğutma yapılırken orta bölge de yalıtımlı kabul edilerek akışkan hareketi incelenmiştir [60]. Çalışmada ısıtıcı ve soğutucu bölgeler arasındaki mesafe (D) ve sıcaklık farkı değişken ( $\Delta T$ ) olarak alınmıştır. Çalışma sonucunda, düşük D ve  $\Delta T$  değerlerinde sürekli rejimde ve iki boyutlu akış, yüksek D ve  $\Delta T$  değerlerinde ise yine sürekli rejimde ve üç boyutlu akış olduğu görülmüştür.

Soong ve diğ. [61], boy-en oranı 4 olan ve sinüsoidal olarak zamanla değişen sıcaklık kaynağı ile alt duvarından ısıtılan eğimli dikdörtgen kapalı hacimde ısı transferini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek genişlikli ve düşük frekanslı sıcaklık dalgaları akışkan hareketini ve ısı transferini oldukça etkilemektedir.

Raos, iki farklı çalışmada kapalı hacmin açısını değiştirerek farklı açıların Nusselt sayısına etkisini araştırmıştır. İlk çalışmada yatay duvarları yalıtılmış ve dikey duvarları

farklı sıcaklıklarda olan bir dikdörtgen kapalı hacimde ısı transferini incelemiştir [62]. Bu çalışmada dikdörtgen hacmin yatay yüzeyle yaptığı açı değiştirilerek çözüm yapılmıştır.  $90^\circ$  ile  $180^\circ$  arasındaki açılarda konveksiyonla ısı transferinin kötü etkilendiği,  $17^\circ$ 'nin altında kararsız akışla karşılaşıldığı,  $65^\circ$ - $75^\circ$  arasındaki açılarda Nusselt sayısının maksimum değerine ulaştığı görülmüştür. Diğer çalışmasında ise yatay yüzeyle farklı açılarda kabul edilen sıcak duvara ait yerel ve ortalama Nusselt sayısının değişimini incelemiştir. Bu çalışmada da Rayleigh sayısının  $10^6$  olduğu, açının  $20^\circ$ - $180^\circ$  arasında olduğu ve hacmin kare olduğu kabul edilmiştir. Maksimum Nusselt sayısı  $80^\circ$ 'de elde edilirken,  $90^\circ$ 'nin altındaki açılarda ısı transferi oranının çok fazla düşmediği gözlemlenmiştir [63].

Eroğlu [64], dikdörtgen şeklindeki kapalı hacmi düzlem yüzeyle açı yapacak şekilde kabul ederek, kapalı hacmin yükseklik-genişlik oranının, yatayla yaptığı açının ve Rayleigh sayısının ısı transferine etkisini incelemiştir. Çalışmada yatayla açı yapan alt ve üst duvarlar yalıtılmış, diğer iki duvar farklı sıcaklıklarda kabul edilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda yükseklik-genişlik oranı arttıkça Nusselt sayısının azaldığı, ayrıca kare kesitli hacim için açının  $80^\circ$  olduğu ve dikdörtgen kesitli hacim için ise açının  $90^\circ$  olduğu durumda Nusselt sayısının maksimum çıktığı görülmüştür.

Deng ve diğ. [65], sol yan duvarının ve alt duvarının bir kısmında ısıtıcılar bulunan dikdörtgen şeklindeki kapalı hacimde ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Kapalı hacmin sağ duvarı sabit sıcaklıkta kabul edilirken ısıtıcıların olmadığı diğer bölgelerin ise yalıtımlı olduğu kabul edilmiştir. Çalışma sonucunda alt duvardaki ısı kaynağının, yan duvardaki ısı kaynağına göre ısı transferinde daha aktif olduğu görülmüştür.

El-Refae ve diğ. [66], iki paralel duvarından birinde soğutma diğerinde ısıtmanın yapıldığı açılı duran dikdörtgen kapalı hacimdeki laminar doğal konveksiyon problemini sayısal olarak incelemişlerdir. Kapalı hacim açısının, yükseklik-genişlik oranının ve açılım oranının (eğim açısının yüksekliğe oranı) ısı transferine etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda düşük açılım oranlarında, yükseklik-genişlik oranının ısı transferine daha az etkisinin olduğu görülmüştür. Genişlik-yükseklik oranıyla açılım oranının en yüksek değerlerinde Nusselt sayısı da maksimum elde edilmiştir.

Küçük [67], alt ve üst duvarları yalıtılmış, sağ ve sol duvarları birbirinden farklı sıcaklıkta ayrıca sol duvarında kanatçıklar bulunan dikdörtgen şeklindeki kapalı hacimde ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Kontrol hacim metoduyla yapılan sayısal çözümde kanatçık boyutları ve sayısının farklı Rayleigh sayılarında akışkan hareketine etkisi bulunmuştur. Çalışma sonucunda düşük Rayleigh sayılarında kanatçık sayısının ve uzunluğunun artırılmasıyla Nusselt sayısının da artırılabilceği, özellikle yüksek Rayleigh sayılarında kanatçık kalınlıklarının artırılmasıyla Nusselt sayısının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

U. Onbaşıoğlu ve H. Onbaşıoğlu [68], yaptıkları çalışmada dikdörtgen şeklindeki bir kapta bulunan sıvı kristallerinin bir yüzeyine yalıtımlı çıkıntılar yerleştirmek suretiyle ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çıkıntıların geometrik değişkenleri ile ısı transferi arasında bir bağıntı geliştirmeye çalışılmış ancak bu başarılamamıştır. Araştırmacılar Grashof sayısının laminar değerleri için çalışma yaptıkları için bağıntı elde edemedikleri görüşünü savunmuşlardır.

Shi ve Khodadadi [69], farklı sıcaklıklardaki duvarlara sahip dikdörtgen bir kapalı hacmin sıcak duvarına yerleştirilmiş ince bir kanatçığın ısı transferine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Kanatçığın yüksek ısı iletkenliğine sahip olduğu kabul edilerek farklı uzunluklarda ve duvarın farklı yerlerinde olma durumuna göre çalışma tekrarlanmıştır. Ortalama Nusselt sayısı, Rayleigh sayısı, kanatçık uzunluğu ve pozisyonu arasında bağıntılar geliştirilmiştir.

Bilgen [70] ise yatay duran yalıtımlı duvarlarına birer kanatçık yerleştirdiği dikdörtgen kapalı hacmin farklı geometrik oranları için ısı transferi bağıntıları elde etmiştir. Çalışma hem laminar hem de türbülanslı akış için tekrarlanmıştır.

Costa ve diğ. [71], dikdörtgen kapalı hacmin köşelerine üçgen takozlar yerleştirerek takozların sayısı, yeri, boyutları ve ısı iletkenliklerinin ısı transferi ve akışkan hareketine etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Daha uzun takozların ısı transferi açısından iyi performans verirken, kısa takozların ısı direnç gösterdikleri tespit edilmiştir.

İç içe geçmiş iki dikdörtgen arasındaki ısı transferi de birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Asan [72], kare şeklinde olan ve iç içe geçmiş iki kapalı hacim arasındaki ısı transferinin, laminar akış şartlarında iki boyutlu sayısal çözümünü yapmıştır. Kontrol hacim yöntemi ve akım-girdap formülasyonunun kullanıldığı çözümde boyutsal oranların ve Rayleigh sayısının ısı transferine etkisi araştırılmıştır. Düşük Rayleigh sayılarında Nusselt sayısının boyutsal oranlardan çok az etkilenmesine rağmen, yüksek Rayleigh sayılarında boyutsal oranların Nusselt sayısı üzerinde oldukça etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca iç ve dış karelerdeki Nusselt sayısının farklı şekillerde etkilendiği tespit edilmiştir. İç karedeki ortalama Nusselt sayısı, boyutsal oranın artmasıyla azalırken, dış karede her iki değişkenin de birlikte artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bir başka çalışmada ise kare yerine dikdörtgenler kullanılarak doğal konveksiyonla ısı transferi incelenmiştir [73]. Düşük Rayleigh sayılarında ( $Ra \leq 3500$ ) ve farklı boyutsal oranlarda üç boyutlu sayısal çalışma yapılmıştır. Yüksek Rayleigh sayılarında üst kısımdaki akışkan hareketinin dairesel veya dikdörtgensel şekilli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu duvardaki sabit akım eğrilerinin sayısının boyutsal orana bağlı olduğu da gözlemlenmiştir.

Deng ve Tang [74] ise alt ve üst duvarı yalıtılmış diğer iki duvarı farklı sıcaklıklarda olan kapalı bir hacmin merkezine kare şeklinde katı bir cisim yerleştirmiş ve arada kalan bölgedeki ısı transferini incelemişlerdir. Kapalı hacmin sağ ve sol duvarlarından biri sıcak diğeri soğuk, alt ve üst duvarları da yalıtılmış kabul edilerek çalışma yapılmıştır. Çalışma, hacmin içinde katı cismin olması (konveksiyon ve kondüksiyon) ve olmaması (sadece konveksiyon) durumları için tekrarlanmıştır. Bu tür problemlerde sadece sabit akım ve sıcaklık eğrilerinin akışkan hareketini ve ısı transferini oldukça iyi ifade ettiği ve bunun da problemin doğasının anlaşılması için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Liu ve Tao [75], dikdörtgen hacmin içine yerleştirdikleri iki düşey levhayı paralel ve farklı sıcaklıklarda kabul ederek ısı transferi ve akışkan hareketini incelemişlerdir. Kapalı hacmin farklı boyutsal oranları düşünülerek farklı Rayleigh sayılarında çalışma tekrarlanmıştır. Özellikle düşük Rayleigh sayılarında iki paralel levha arasındaki mesafenin Nusselt sayısını daha fazla etkilediği bulunmuştur.

Barozzi ve Corticelli [76] ise dikdörtgen kapalı hacmin içerisinde iki farklı cismin (dikdörtgen ısı kaynağı veya iki dikey plaka) bulunması durumunda ısı transferi ve akışkan hareketini sayısal olarak incelemişlerdir. Kapalı hacmin dikey duvarları sabit sıcaklıkta, yatay duvarları yalıtımlı kabul edilirken akışkan olarak havanın olduğu varsayılmıştır. Kapalı hacmin içinde dikey levhaların olması durumunda ortalama Nusselt sayısının Grashof sayısının artmasıyla düşük oranda arttığı, dikdörtgen ısı kaynağı olması durumunda ise ısı transferi açısından en aktif cisim yüzeyinin alt duvar olduğu görülmüştür.

Cesini ve diğ. [77], dikdörtgen kesitli kapalı hacmin merkezine bir silindir koyarak doğal konveksiyonla ısı transferi için deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada dikdörtgen hacim boyutları, silindir çap oranı ve Rayleigh sayısının ısı transferine etkisi incelenmiştir. Rayleigh sayısının artmasıyla ortalama ısı transferi katsayısının da arttığı görülmüştür. Ayrıca dikdörtgen hacim boyutları ile silindir çapı oranının azalmasıyla ısı transferinin maksimuma yaklaştığı bulunmuştur.

Shu ve diğ. [78] ise dikdörtgen şeklindeki kapalı hacmin merkezinden daha uzak bir yere yerleştirdikleri silindirin etrafındaki akışkan hareketini ve ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çözüm için akım-girdap formülasyonun kullanıldığı çalışmada explicit bir yaklaşıma göre hesaplamalar yapılmıştır. Silindirin kapalı hacim içerisindeki yerinin akışı ve ısı transferini oldukça etkilediği görülmüştür.

Dong ve Li [79], dikdörtgen şeklindeki kapalı hacmin merkezine bir silindir koyarken hacmin yalıtımlı üst kısmında da katı bir bölge oluşturarak ısı transferinin değişimini incelemişlerdir. Katı bölgenin ısı iletkenliğinin, geometrik oranların ve Rayleigh sayısının ısı transferine etkisi iki boyutlu sürekli rejimde yapılan sayısal çözüm ile araştırılmıştır. Katı

bölgenin ısı iletkenliğinin artmasıyla kapalı hacim içerisindeki konveksiyonla ısı transferinin de arttığı bulunmuştur. Ayrıca geometrik oranların ısı transferini oldukça etkilediği görülmüştür.

Elsayed ve diğ. [80], eğimli dikdörtgen çıkıntının bir kenarını atmosfere açık tutarken geriye kalan üç duvardan birini sabit sıcaklıkta diğer ikisini de ısıtılmış kabul ederek ısı transferini incelemişlerdir. Çıkıntının yatay düzlemle yaptığı açı değiştirilerek (60-90°) farklı Grashof sayılarında ( $10^2$ - $10^5$ ) çalışma tekrarlanmıştır. Yüksek Grashof sayılarında çıkıntının açısının azaltılmasıyla Nusselt sayısının da arttığı ancak düşük Grashof sayılarında, çıkıntı açısının Nusselt sayısına çok az etkisinin olduğu görülmüştür.

Küp veya dikdörtgen prizma şeklindeki kapalı hacimlerdeki doğal konveksiyonla ısı transferi problemleri çeşitli araştırmacılar tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Sezai ve Mohamad [81], üç boyutlu kapalı bir hacimde alt duvardaki küçük bir bölgeyi ısıtarak doğal konveksiyonla ısı transferini hesaplamışlardır. Dikey duvarlardaki sınır şartlarının (yalıtım ve sabit sıcaklık) etkisi incelenmiş ve sınır şartının değişmesinin ısı transferini etkilemediği bulunmuştur.

Tric ve diğ. [82], küp şeklinde ve duvarları farklı sıcaklıklarda olan kapalı hacimde doğal konveksiyondan dolayı oluşan akışkan hareketini sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çözüm için Chebyshev algoritması kullanılarak Rayleigh sayısının  $10^3$ - $10^7$  aralığındaki değerleri için tam çözüm yapılmış ve yüksek Rayleigh sayılarında %0.02 oranında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Colomer ve diğ. [83], ise duvarları farklı sıcaklıklarda olan dikdörtgen şeklindeki kapalı hacim için radyasyon ve doğal konveksiyon problemini birlikte incelemişlerdir. Simple algoritmasının kullandığı sayısal çözümde farklı optik kalınlıklara sahip iki ortam (saydam ve siyah) için Rayleigh ve Planck sayılarının etkisi incelenmiştir. Böylece saydam ve siyah yüzeyli kapalı hacimlerde ısı transferinin değişimi karşılaştırılmıştır. Saydam ortamda radyasyon etkisinin ısı transferini önemli derecede artırdığı, siyah ortamda ise Rayleigh sayısının artmasıyla ısı transferinin de arttığı sonucuna varılmıştır.

Wakitani [84], yatay duvarları farklı sıcaklıklara sahip dikdörtgen kapalı hacimde düşük Prandtl sayılarındaki doğal konveksiyon akışını üç boyutlu olarak incelemiştir. Kapalı hacmin uzunluk-yükseklik ve genişlik-yükseklik oranları değiştirilerek akış yapısındaki değişimler incelenmiştir. Genişlik-yükseklik oranı arttığında Grashof sayısının azaldığı görülmüştür.

Tou ve diğ. [85] ise yan duvarlarından birinde birden çok ısı kaynağı bulunan dikdörtgen prizma şeklindeki kapalı hacimde farklı akışkanların olduğunu kabul ederek doğal konveksiyonla soğutma işlemini sayısal olarak çözmüşlerdir. Kapalı hacmin boyutsal oranlarının, Rayleigh sayısının ve Prandtl sayısının ısı transferine etkisi incelenmiştir. Düşük Rayleigh sayılarında ( $Ra < 10^5$ ) akışın durgun olduğu, maksimum ısı transferinin kenardaki

ısıtıcılarda olduğu ve Prandtl sayısının 5-130 aralığındaki farklı değerlerinin ısı transferine etkisinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görülmüştür.

Yu ve Joshi [86], küp şeklindeki bir kapalı hacimde yan duvarlarından birine ısı kaynağı yerleştirirken bir duvarına da havalandırma penceresi yerleştirerek laminar doğal konveksiyon problemini incelemişlerdir. Havalandırma penceresinin farklı yerde ve farklı boyutlardaki durumları ile farklı Rayleigh sayıları için sayısal çözüm tekrarlanmıştır. Havalandırma penceresinin altta olması durumunda konveksiyonla ısı transferine etkisinin en üst seviyede olduğu bulunmuştur. Ayrıca Rayleigh sayısının artmasıyla havalandırma penceresinin boyutlarının ısı transferine etkisinin de arttığı sonucuna varılmıştır.

Sigey ve diğ. [87] ise üç boyutlu bir oda modellemesi yaparak yan duvarlarından birinin üst kısmına bir pencere hemen altına da ısıtıcı bir kaynak yerleştirerek türbülanslı doğal konveksiyon problemini üç boyutlu olarak çözmüşlerdir. Çalışmada oda içerisi soğuk üst bölge, sıcak olan orta bölge ve ılık olan alt bölge olmak üzere 3 bölgeye ayrılmıştır. Sayısal çözümde sonlu farklar formülasyonu kullanılarak ısıtıcı ile pencere arasındaki mesafenin ısı transferine etkisi incelenmiştir. Isıtıcının pencere ile alt duvar arasına eşit uzaklıkta yerleştirilmesi durumunda sıcaklık dağılımının çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde levha, küre, silindir ve dikdörtgen gibi basit geometrilerin dışında daha karmaşık geometrilerde de sayısal doğal konveksiyon çalışmalarına rastlanmaktadır. Adjlout ve diğ. [88], dikdörtgene benzeyen ancak sağ yüzeyi dalga şeklinde olan kapalı hacim için laminar doğal konveksiyonu sayısal olarak incelemişlerdir. Kapalı hacmin alt ve üst yüzeyleri yalıtılmış, düz olan sol yüzeyi soğuk ve dalgalı olan sağ yüzeyi de sıcak kabul edilmiştir. Akım-girdap formülasyonunun kullanıldığı çalışmada kapalı hacmin farklı açıları ve farklı dalga sayıları için çalışma tekrarlanmıştır. Sonuçta dalgalı sıcak yüzeyin akış ve ısı transferine etkisinin olduğu, dikdörtgen bir hacimle karşılaştırıldığında ise ortalama Nusselt sayısının daha düşük olduğu görülmüştür.

Benzer bir başka çalışmada Mahmud ve diğ. [89], alt ve üst yüzeyleri düz, diğer iki yan yüzeyi dalga şeklinde olan kapalı hacim için ısı transferi ve akışkan hareketini incelemişlerdir. Farklı Grashof sayılarında kapalı hacmin yaptığı açının ve yüzeylerin dalgalanmasının ısı transferine etkisi incelenmiştir. Düşük açılarda ve düşük yüzey dalgalanmalarında yüksek ısı transferi oranları elde edilmiştir.

Kim [90], dalga şeklindeki dikey bir levha etrafındaki Newtonsal olmayan akışkanlı ortamda doğal konveksiyonu sayısal olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda boyutsuz dalga genliğinin artmasıyla, yüzey genliğinin arttığı ancak yerel Nusselt sayısının azaldığı görülmüştür. Ayrıca bu tür düzensiz şekillere yakın olan bölgelerdeki fiziksel mekanizmaların daha da iyi anlaşılması için deneysel çalışmalara ihtiyaç olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Biezen ve Bruining [91], yalıtılmış kısa kenarı üst tarafta olan trapez şeklindeki bir kapalı hacmin içini iki farklı gazla doldurarak türbülanslı doğal konveksiyon problemini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sistem yeraltı kömür gazlarının modellenmesi amacıyla yapılmıştır. Gaz enjeksiyon oranının artmasıyla ısı transferini de arttığı görülmüştür.

Farinas ve diğ. [92], dikey duran ve iç içe geçmiş eş eksenli iki baklava dilimi şeklindeki cisimlerin arasındaki akışkan hareketini ve ısı transferini araştırmışlardır. Bu iki cisim farklı sıcaklıklarda kabul edilerek, farklı boyutsal oranlarda ve farklı Rayleigh sayılarında çalışma tekrarlanmıştır. Isı transferinin maksimum olduğu boyutsal değerler bulunmuş ve tüm geometriler için ısı iletim katsayısı ifadesini Rayleigh sayısına bağlı olarak veren bir eşitlik geliştirilmiştir.

Bir başka çalışmada kare şeklindeki bir kapalı hacmin bir çeyreğinin olmadığı kabul edilerek farklı bir geometrik şekil elde edilmiş ve bu geometrik yapının bir yüzeyinden soğutma yapılması durumunda doğal konveksiyon problemi sayısal olarak incelenmiştir [93]. Çalışmada Rayleigh sayısının, Prandtl sayısının, geometrik boyutların ve soğutma yüzeyi konumunun akışın yapısına ve ısı transferine etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda soğutma yüzeyinin altta veya üstte olmasının ısı transferi açısından fazla etkili olmadığı görülmüştür.

Chen ve Cheng [94], alt tarafı yay şeklinde üst tarafı düz olan kapalı bir hacimde ısı transferini ve akışkan hareketini incelemişlerdir. Duvarların sabit sıcaklıkta olduğunu kabul ederek sonlu hacim yöntemi ile iki boyutlu çözüm yapılmıştır. Farklı Grashof sayılarında ( $10^4 \leq Gr \leq 10^7$ ) ve farklı eğim açıları ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ) tekrarlanan çalışma sonucunda Grashof sayısının  $10^5$  den büyük olduğu değerlerde ısı transferinin fark edilebilir oranda arttığı, eğim açısının  $\pi$ 'ye eşit olduğu değerlerde ise Nusselt sayısının minimum olduğu bulunmuştur.

Nourgaliev ve diğ. [95], hacimsel olarak ısıtılan farklı geometrideki havuzlarda Prandtl sayısının, doğal konveksiyonla ısı transferine etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmada iki boyutlu kare, yarım daire ve eliptik geometriler ile üç boyutlu yarım daire ve yarım küre geometrileri incelenmiştir. Tüm geometrilerde de Prandtl sayısının ortalama Nusselt sayısına etkisinin çok az olduğu görülmüştür.

Al-Shariah [96], yaptığı çalışmada üçgen şeklindeki bir kapalı hacimde laminar doğal konveksiyonu deneysel olarak incelemiştir. Boyutsal oranın, eğim açısının ve Rayleigh sayısının akışkan hareketine ve ısı transferine etkisi araştırılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak Rayleigh sayısının, boyutsal oranların ve eğim açısının fonksiyonu olan bir Nusselt sayısı eşitliği ( $Nu = 0.040(Ra)^{0.348} (H/W)^{0.257} (\sin \phi)^{1.65}$ ) bulunmuştur.

Literatürde farklı çatı geometrilerinde ısı transferinin ve akışkan hareketinin sayısal olarak incelendiği çalışmalara çok az rastlanmıştır. Bu çalışmalardan birinde farklı geometrilerdeki kubbelerin (düz, eğimli, eliptik, yarım daire) akışkan hareketine ve ısı

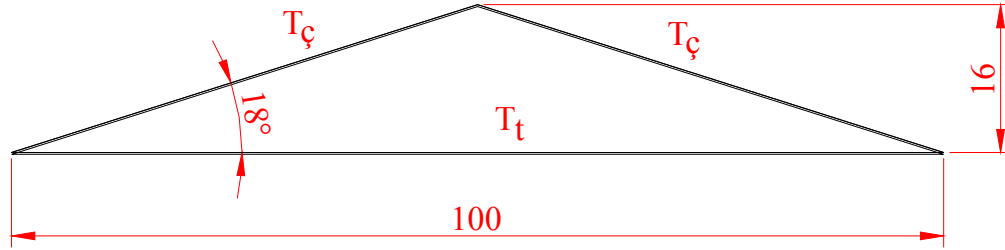
transferine etkisi incelenmiştir [97]. Çalışma sonucunda dairesel ve eliptik kubbede daha yüksek ısı transferi elde edilmiştir.

Asan ve Namli [98,99], üçgen kesitli (beşik) çatılardaki ısı transferi ve akışkan hareketini kış ve yaz sezonları için iki farklı çalışmada sayısal olarak incelemişlerdir. Her iki çalışmada da akım-girdap formülasyonu ile kontrol hacim yöntemi kullanılmış ve sayısal çözüm sürekli rejimde yapılmıştır. Çatı boyutlarının ve Rayleigh sayısının ısı transferine etkilerinin incelendiği çalışmalar sonucunda, yaz sezonunda Nusselt sayısının sadece boy-en oranına bağlı olarak artarken, kış sezonunda hem boy-en hem de Rayleigh sayısına bağlı olarak arttığı bulunmuştur.

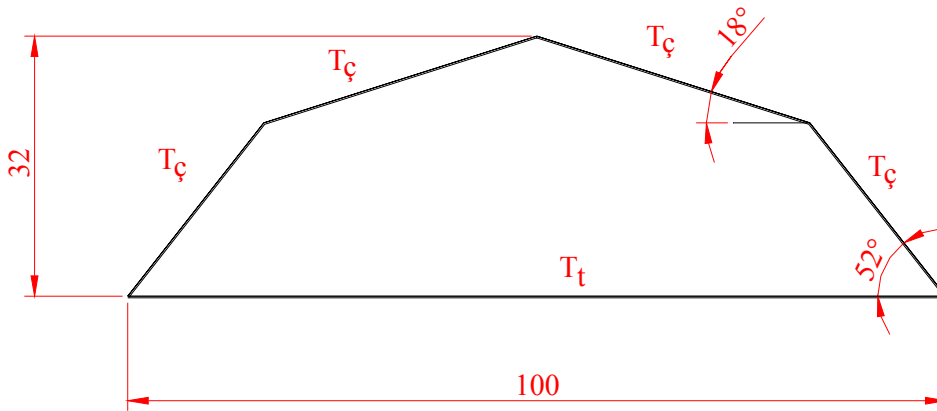
Moukalled ve Acharya [100], üçgen kesitli kapalı bir hacim içindeki alt ve üst duvarlara çıkıntılar ilave ederek, doğal konveksiyonla ısı transferini sayısal olarak çözmüşlerdir. Bu sistem, bir evin çatısı gibi düşünülerek iki farklı sezon için (kış ve yaz) çözüm yapılmıştır. Sayısal işlemler farklı Rayleigh sayılarında tekrarlanmıştır. Sonuçta kış sezonunda konveksiyonun daha düşük Rayleigh sayılarında artarken, yaz sezonunda biraz daha yüksek Rayleigh sayılarında artmaya başladığı tespit edilmiştir.

### 3. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

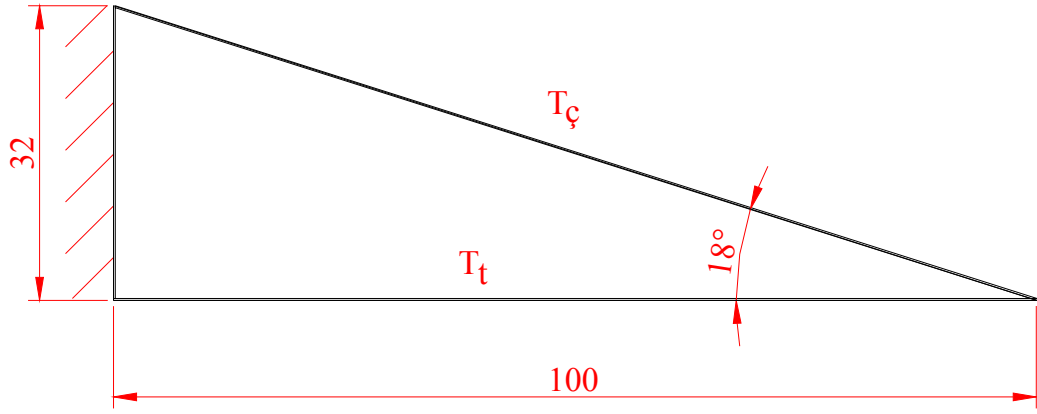
Bu çalışmada farklı geometrilere sahip çatı tipleri içerisindeki akışkanın hareketi ve ısı transferi incelenmiştir. Çatı tipleri ve boyutları Şekil 3.1.a-d’ de gösterilmiştir. Çatıların eğimleri ve diğer boyutları Elazığ ilinin iklim şartlarına göre seçilmiştir. Tüm çatılarda akışkan, farklı sıcaklıklardaki çatı ( $T_{\text{ç}}$ ) ile tavan ( $T_t$ ) arasındaki kapalı hacimde hareket etmektedir. Akışkanın viskoz ve sıkıştırılmaz Newtonian akışkan olduğu kabul edilmiştir. Çatıların şekil düzlemine dik doğrultudaki boyutları büyük olduğundan matematiksel ifadeler iki boyuta göre düzenlenmiştir. Çatı ile tavanın farklı sabit sıcaklıklarından dolayı oluşan yoğunluk değişimi, çatı içerisindeki akışkanın hareket etmesine sebep olur. Dolayısıyla sürekli rejimde doğal konveksiyondan söz edilebilir. Akışkanın hareketinde konveksiyonun radyasyona göre çok daha fazla etkili olmasından dolayı radyasyonla ısı transferi ihmal edilmiştir. Bu çalışmada laminar akış göz önüne alınarak matematiksel formülasyon düzenlenmiştir.



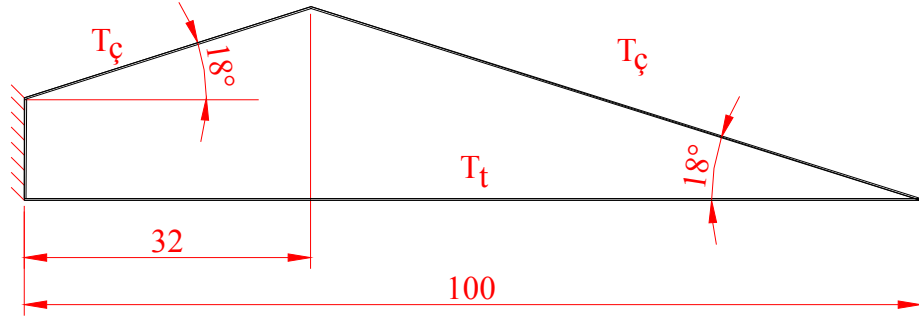
a) Beşik çatı



b) Mansart çatı



c) Sundurma çatı



d) Farklı yüzey alanlı beşik çatı

Şekil 3.1. Çatı tipleri

Laminer doğal konveksiyonda, akışkan hareketi ve ısı transferini çözebilmek için basınç, hız vektörü ve sıcaklık gibi üç değişkenin belirlenmesi gerekir. Bu değişkenlerin belirlenebilmesi için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri çözülmelidir. Laminer akışta bu üç diferansiyel denklemin çözümü ile akışkan hareketi ve ısı transferi hesaplanır.

### 3.1. Temel Denklemler

Aşağıda iki boyutlu kartezyen koordinatlar için sırasıyla süreklilik, momentum (x ve y) ve enerji denklemleri çıkarılmıştır.

Sürekli rejimdeki iki boyutlu bir akış için süreklilik denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir.

Doğal konveksiyon için momentum denklemleri yazılırken iki farklı yöntem kullanılır. Bunlardan birincisi sıcaklık farkının çok olduğu durumlarda kullanılır ki; bu türden problemlerde yoğunluk tüm terimlerde değişken olarak alınır. İkincisi ise sıcaklık farkı düşük olduğunda uygulanır. Diğer akışkan özellikleri gibi yoğunluğun da sıcaklığa bağlı olduğu kabul edilerek, sadece doğal konveksiyon akışını sağlayan kaldırma kuvveti teriminde değişken olarak alınır. Bu türden bir yaklaşıma genel olarak “Boussinesq Yaklaşımı” adı verilir. Bu çalışmada da momentum denklemleri bu yaklaşıma göre çıkarılmıştır.

Boussinesq Yaklaşımının kullanıldığı “x” ve “y” yönündeki momentum denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \beta g(T - T_1) \quad (3.3)$$

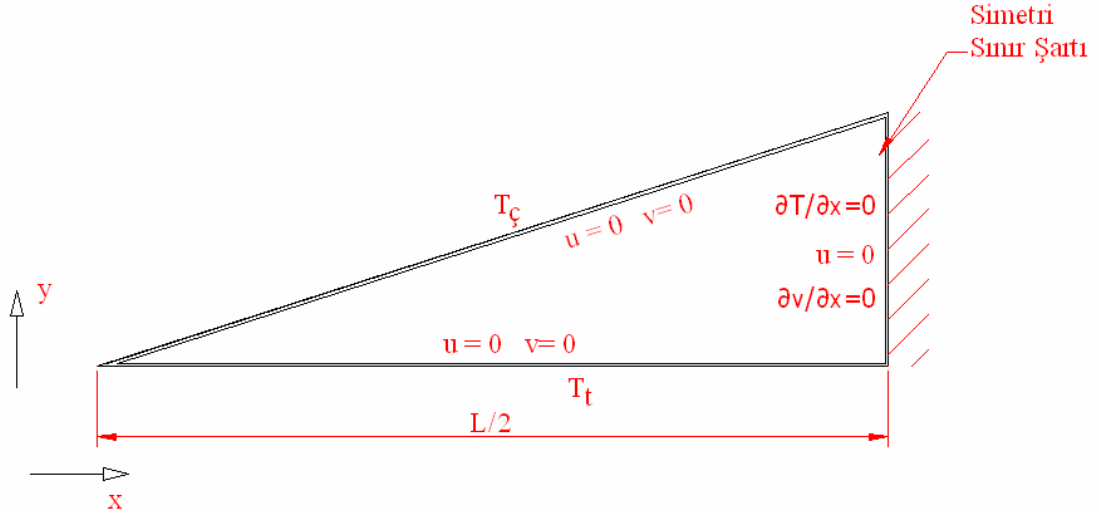
İki boyutlu laminar akış için sürekli rejimde enerji denklemi;

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left( \frac{k}{\rho c_p} \right) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

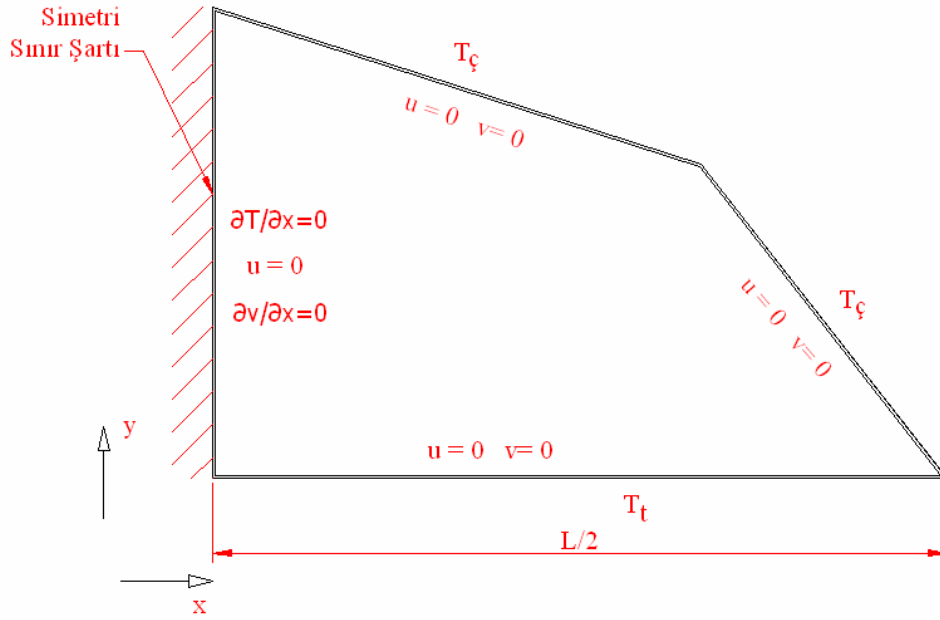
şeklinde yazılabilir.

### 3.2. Sınır Şartları

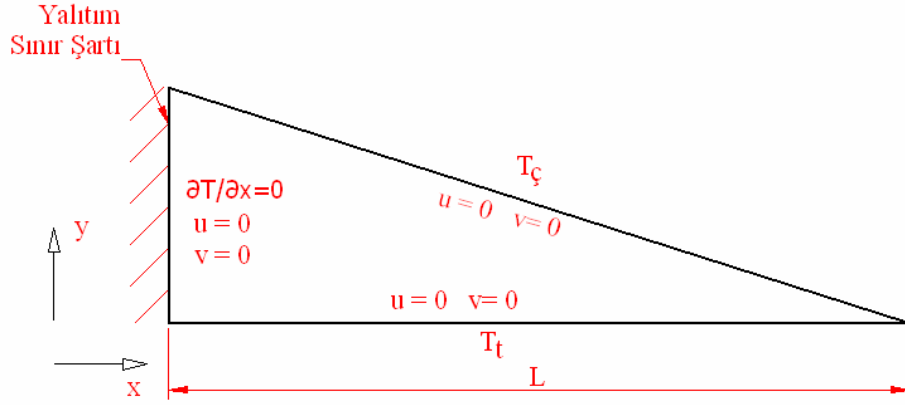
Problem çözümünün yapılabilmesi için akışkana ait tüm değişkenlerin (u, v, T) problem geometrisi içindeki değerlerinin bilinmesi gerekir. Çatı geometrilerine (Şekil 3.2) bakıldığında akışkanın, çatı ile tavana temas ettiği noktalarda hareketsiz olduğu görülür. Ayrıca çatının ve tavanın farklı sabit sıcaklıkta olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda sınır şartları;



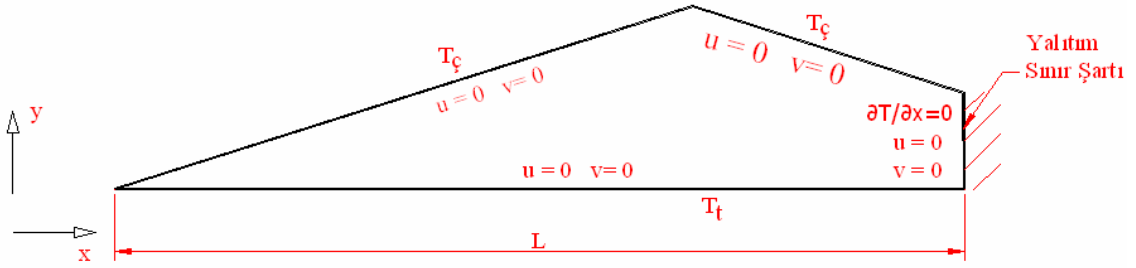
a) Beşik çatı



b) Mansart çatı



c) Sundurma çatı



d) Farklı yüzey alanlı beşik çatı

Şekil 3.2. Sınır şartları

Çatıda ( $T=T_c$ );

$u=0$  ,  $v=0$

Tavanda ( $T=T_t$ );

$u=0$  ,  $v=0$

olarak ifade edilebilir.

Yukarıda bahsedilen sınır şartları tüm çatı tipleri için geçerlidir. Ancak, çatılardaki tüm sınır şartları aynı değildir. Çatı geometrisine göre bazı sınır şartları değişmektedir. Simetri sınır şartının olduğu çatılarda karşıdan karşıya akış olmadığından, hız vektörünün normal bileşeninin değeri sıfır olur ( $\partial v / \partial x = 0$ ). Aynı zamanda simetri düzlemindeki sıcaklığın, simetri düzleminin normaline göre türevi de sıfırdır ( $\partial T / \partial x = 0$ ). Yalıtım sınır şartında ise

yalıtım duvarı üzerinde hızlar sıfırdır ( $u = 0, v = 0$ ). Yalıtım düzlemindeki sıcaklığın, yalıtım düzleminin normaline göre türevi de sıfırdır ( $\partial T / \partial x = 0$ ). Bu durumda çatılar için diğer sınır şartlarını yazacak olursak;

Beşik çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.a);

$$x = \frac{L}{2} \text{ de } \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad u = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

Mansart çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.b);

$$x = 0 \text{ da } \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad u = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

Sundurma çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.c);

$$x = 0 \text{ da } \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad u = 0, \quad v = 0$$

Farklı yüzey alanlı beşik çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.d);

$$x = L \text{ de } \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad u = 0, \quad v = 0$$

şeklinde yazılabilir.

### 3.3. Akım-Girdap Formülasyonu

Kapalı hacimlerde laminar doğal konveksiyon için yazılan temel denklemlerin çözümü çeşitli yöntemler ile yapılabilir. Bu çalışmada temel denklemlerin tamamı sayısal olarak çözülmüştür. Bu denklemlerdeki  $u$ ,  $v$ ,  $p$  değişkenleri yerine akım ( $\psi$ ) ve girdap ( $\omega$ ) değişkenleri kullanılacaktır. Genel olarak bu kullanıma “akım-girdap formülasyonu” denilmektedir.

İki boyutlu bir akış için sırasıyla akım ve girdap formülasyonu;

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3.5)$$

$$\omega = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir.

Görüldüğü gibi akım fonksiyonu süreklilik denklemini doğrulamaktadır. Girdap fonksiyonu denkleminde (denk. 3.6) akım fonksiyonu ifadeleri (denk. 3.5) yerlerine yazılırsa;

$$-\omega = \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) \quad (3.7)$$

elde edilir.

Kapalı hacimlerde laminar doğal konveksiyonda basınç farkı çok düşük olduğundan momentum denklemlerindeki basınç terimi yok edilebilir. Daha önce yazılan momentum denklemlerindeki basınç terimini yok etmek için denklem (3.2)'nin "y"ye göre, denklem (3.3)'ün de "x"e göre türevi alındıktan sonra bu iki denklem birbirinden çıkarılırsa aşağıdaki denklem elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned} u \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) + v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial v}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial u}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ = v \left[ \left( \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y} \right) + \left( \frac{\partial^3 v}{\partial y^2 \partial x} - \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} \right) \right] - \beta g \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Bu denklemde akım ve girdap fonksiyonları yerlerine yazılırsa;

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} = v \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \beta g \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.9)$$

elde edilir.

Denklem (3.9), x ve y momentum denklemlerinin akım-girdap formülasyonu ile yazılmış halidir [101].

Son olarak enerji denklemi (denk. 3.4) akım fonksiyonu göz önüne alınarak tekrar yazılacak olursa;

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} = \left( \frac{k}{\rho c_p} \right) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.10)$$

elde edilir.

Denklem (3.7), (3.9) ve (3.10),  $\psi$ ,  $\omega$  ve  $T$  gibi üç değişkeni içermektedir. Sayısal çözüm bu değişkenleri içeren üç denkleme göre yapılacaktır.

Yeni değişkenlere göre sınır şartları tekrar yazılırsa;

Tüm çatı geometrileri için sınır şartları;

Çatıda ( $T=T_c$ );

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \text{ ve } \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$$

Tavanda ( $T=T_t$ );

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \text{ ve } \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$$

dır. Beşik çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.a);

$$x = \frac{L}{2} \text{ de } \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \omega = 0$$

Mansart çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.b);

$$x = 0 \text{ da } \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \omega = 0$$

Sundurma çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.c);

$$x = 0 \text{ da } \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$$

Farklı yüzey alanlı beşik çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.d);

$$x = L \text{ de } \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$$

şeklinde yazılabilir.

### 3.4. Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması

Denklemlerin boyutsuzlaştırılmasıyla, hesaplamalar sonucunda elde edilecek sonuçlar daha geniş bir uygulama alanında kullanılabilir. Sayısal işlemlerde boyutsuzlaştırma, gerekli bir adımdır. Zira sonuçlar daha kullanışlı bir hale dönüştürülmüş olur.

Denklemleri boyutsuzlaştırmak amacıyla, her bir değer için referans değer belirlenerek, buna göre değişkenler tekrar yazılırsa;

$$\Psi = \frac{\psi \text{ Pr}}{\nu}, \quad \Omega = \frac{\omega(L)^2 \text{ Pr}}{\nu}, \quad X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$$

elde edilir. Burada  $T_c$ , soğuk olan çatı yüzeyi,  $T_h$  ise sıcak olan çatı yüzeyidir. Kış ve yaz sezonlarında  $T_c$  ve  $T_h$  farklılık göstermektedir.

Kış sezonunda;

$$T_c = T_{\text{ç}}, \quad T_h = T_t$$

Yaz sezonunda ise;

$$T_c = T_t, \quad T_h = T_{\text{ç}}$$

olur. Akım ve girdap fonksiyonuyla yeniden düzenlenen süreklilik denklemi (denk. 3.7) boyutsuz formda tekrar yazılırsa;

$$-\Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} \quad (3.11)$$

elde edilir.

Rayleigh Sayısının;

$$\text{Ra} = \frac{\beta g (T_h - T_c) L^3 \text{ Pr}}{\nu^2} = \text{Gr Pr}$$

şeklinde olduğu hatırlanırsa, daha önce akım-girdap formülasyonu ile düzenlenen momentum denklemi (denk. 3.9) boyutsuz formda;

$$\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} = \frac{1}{\text{Pr}} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} \right) + \text{Ra} \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \quad (3.12)$$

olarak ifade edilir.

Benzer şekilde enerji denklemi de (denk. 3.10) boyutsuz olarak yazılırsa;

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (3.13)$$

elde edilir.

Aynı şekilde sınır şartları da boyutsuz olarak yeniden düzenlenebilir.

Tüm çatı geometrileri için sınır şartları;

Çatıda ( $T=T_c$ );

$$\frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0 \text{ ve } \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0$$

Tavanda ( $T=T_t$ );

$$\frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0 \text{ ve } \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0$$

Beşik çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.a);

$$x = L / 2 \text{ de } \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \quad \Omega = 0$$

Mansart çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.b);

$$x = 0 \text{ da } \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \quad \Omega = 0$$

Sundurma çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.c);

$$x = 0 \text{ da } \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0$$

Farklı yüzey alanlı beşik çatı için sınır şartları (Şekil 3.2.d);

$$x = L \text{ de } \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0$$

şeklinde ifade edilir.

#### 4. SAYISAL ÇÖZÜM

Kapalı hacimlerde doğal konveksiyonla akışkan hareketi ve ısı transferi probleminin çözümü için boyutsuz hale dönüştürülen süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin eş zamanlı olarak çözülmesi gerekmektedir. Bu üç denklemin lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemler olduğu görülmektedir. Bu denklemlerin analitik olarak çözülmesi mümkün değildir. Bu türden diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan çeşitli metotlar vardır. Kontrol hacim ve sonlu farklar en sık kullanılan çözüm metotlarıdır. Bu çalışmada da iteratif (tekrarlamalı) bir sonlu farklar çözüm metodu kullanılmıştır.

Genel olarak kısmi diferansiyel denklemler üç kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar, eliptik, parabolik ve hiperbolik denklemlerdir. Sürekli rejimde konveksiyon denklemleri eliptik tip denklemlerdir. Öncelikle denklemler Taylor Serisi ile cebirsel denklemlere dönüştürülmüştür. 1. ve 2. derece denklemlerin Taylor Serisi ile açılımında ileri, geri ve merkezi farklar kullanılmıştır. Elde edilen cebirsel denklemlerin çözümü için de iteratif yöntemlerden “Succesive Under Relaxation (SUR)” metodu kullanılmıştır.

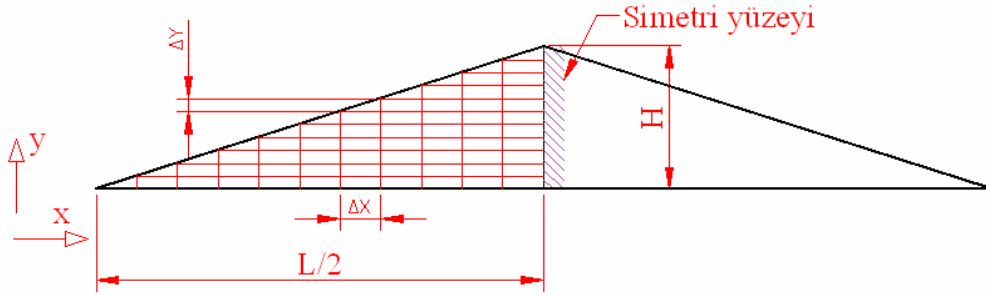
Problemin sayısal çözümünü yapabilmek için öncelikle akış alanının ağlara bölünmesi gerekir.

##### 4.1. Grid Sistemi

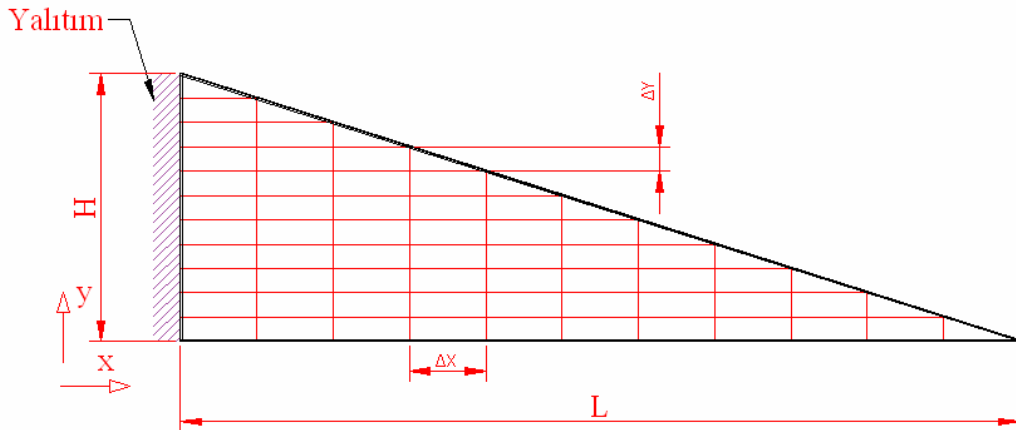
Sayısal çözüme başlamak için ilk adım, akış alanını küçük parçalara bölerek her noktaya ayrı ayrı cebirsel denklemlerin uygulanmasıdır. Teorik olarak akış alanının tamamı için elde edilen cebirsel denklemlerin uygulanması gerekmektedir. Ancak bu sonsuz sayıda nokta ve de sonsuz sayıda denklem ile ifade edileceğinden, pratikte bu imkânsızdır. Bu nedenle akış alanı belirli sayıda kafeslere bölünerek, bu kafeslerin kesişme noktalarına cebirsel denklemler uygulanır. Cebirsel denklemlerin uygulandığı her bir noktaya “grid noktası” veya “düğüm noktası” adı verilir. Bu noktaların oluşturduğu sisteme de “grid sistemi” denilmektedir.

Çözümün hassasiyetini etkileyen faktörlerin başında düğüm noktalarının sayısı gelir. Pratikte düğüm sayısı arttıkça sonuçların hassaslaştığı kabul edilse de gerçekte çok fazla düğüm sayısı işlem zamanını artırır. Ayrıca belirli bir düğüm sayısının üzerinde hassasiyet de çok fazla değişmez. Bu nedenle optimal düğüm (grid) sayısının belirlenmesi önemlidir. Düğümlerin aralıkları ve sayıları, problemin geometrisine göre değişebilmektedir. Bu çalışmada birbirinden farklı dört geometri olduğundan her biri için ayrı ayrı grid sistemi kullanılmıştır.

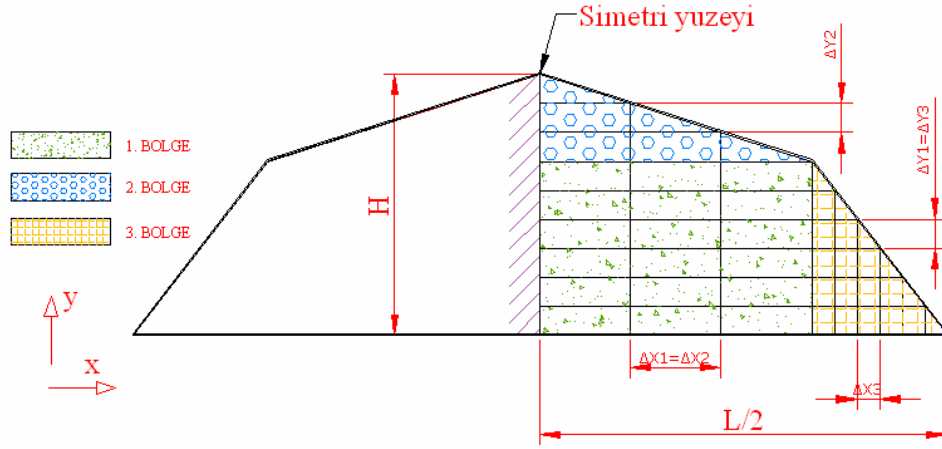
Beşik çatının sayısal çözümü simetri sınır şartı kullanılarak Şekil 4.1’de görüldüğü gibi sabit  $x$  ve  $y$  aralıklı grid sistemi ile yapılmıştır. Aynı şekilde sundurma çatı için de sabit aralıklı grid sistemi kullanılmıştır (Şekil 4.2). Mansart çatı ve farklı yüzey alanlı beşik çatı ise 3 bölgeye ayrılarak her bölgeye farklı grid sistemi uygulanmıştır. Bu çatılarda çok farklı grid sistemlerine göre çözümler yapılarak en uygun grid sistemi bulunmuştur. Şekil 4.3 ve 4.4’de bu iki çatı için seçilen grid sistemi görülmektedir. Tüm çatılar için seçilen grid sisteminde, geometrinin eğimli yüzeyinde düğümlerin kesişmesine dikkat edilmiştir.



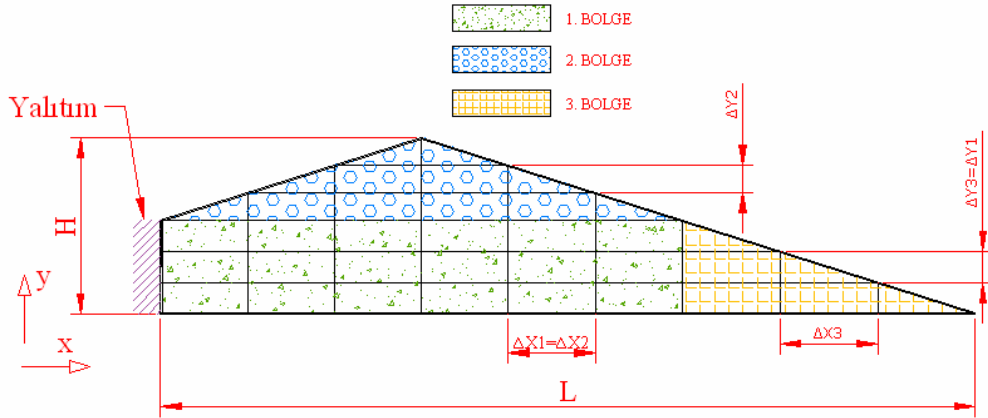
**Şekil 4.1.** Beşik çatı için grid sistemi



**Şekil 4.2.** Sundurma çatı için grid sistemi



Şekil 4.3. Mansart çatı için grid sistemi

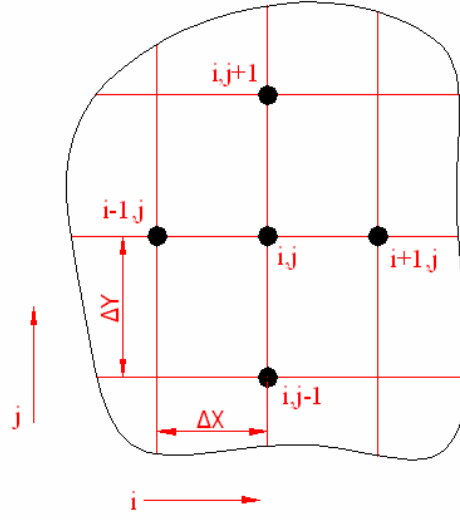


Şekil 4.4. Farklı yüzey alanlı beşik çatı için grid sistemi

#### 4.2. Temel Denklemlerin Cebirsel Denklemlere Dönüştürülmesi

Daha önceden de belirtildiği gibi problemin sayısal çözümü için üç kısmi diferansiyel denklemin (süreklilik, momentum, enerji) cebirsel denklemlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için de sonlu farklar çözüm metodu kullanılmıştır.

Şekil 4.5'deki grid sistemine göre denklem 3.11, Taylor serisi kullanılarak cebirsel denkleme dönüştürülürse;



Şekil 4.5. Grid sistemi için düğüm noktaları

$$-\Omega_{i,j} = \frac{\Psi_{i+1,j} + \Psi_{i-1,j} - 2\Psi_{i,j}}{\Delta X^2} + \frac{\Psi_{i,j+1} + \Psi_{i,j-1} - 2\Psi_{i,j}}{\Delta Y^2}$$

elde edilir. Burada  $\Delta X$  ve  $\Delta Y$  sırasıyla x ve y yönündeki grid aralıklarıdır. Bu denklem düzenlenirse;

$$\Psi_{i,j} = \frac{\left[ \left( \frac{\Psi_{i+1,j} + \Psi_{i-1,j}}{\Delta X^2} \right) + \left( \frac{\Psi_{i,j+1} + \Psi_{i,j-1}}{\Delta Y^2} \right) \right] + \Omega_{i,j}}{\left( \frac{2}{\Delta X^2} + \frac{2}{\Delta Y^2} \right)} \quad (4.1)$$

eşitliği elde edilir.

Daha önce boyutsuz forma dönüştürülen denklem (3.12) merkezi fark kullanarak cebirsel denkleme dönüştürülebilir.

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\Omega_{i+1,j} + \Omega_{i-1,j} - 2\Omega_{i,j}}{\Delta X^2} \right) + \left( \frac{\Omega_{i,j+1} + \Omega_{i,j-1} - 2\Omega_{i,j}}{\Delta Y^2} \right) \\ &= \frac{1}{Pr} \left[ \left( \frac{\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1}}{2\Delta Y} \right) \left( \frac{\Omega_{i+1,j} - \Omega_{i-1,j}}{2\Delta X} \right) - \left( \frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}}{2\Delta X} \right) \left( \frac{\Omega_{i,j+1} - \Omega_{i,j-1}}{2\Delta Y} \right) \right] + Ra \left( \frac{\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}}{2\Delta X} \right) \end{aligned}$$

Bu denklem düzenlenirse;

$$\Omega_{i,j} = \left\{ \left( \frac{-1}{4\Delta X \Delta Y \text{Pr}} \right) \left[ (\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1})(\Omega_{i+1,j} - \Omega_{i-1,j}) - (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j})(\Omega_{i,j+1} - \Omega_{i,j-1}) \right] \right. \\ \left. + \left( \frac{\Omega_{i+1,j} + \Omega_{i-1,j}}{\Delta X^2} \right) + \left( \frac{\Omega_{i,j+1} + \Omega_{i,j-1}}{\Delta Y^2} \right) - \text{Ra} \left( \frac{\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}}{2\Delta X} \right) \right\} / \left( \frac{2}{\Delta X^2} + \frac{2}{\Delta Y^2} \right) \quad (4.2)$$

eşitliği elde edilir.

Son olarak boyutsuz hale getirilen enerji denklemi (denk. 3.13) cebirsel denkleme dönüştürülürse;

$$\left( \frac{\theta_{i+1,j} + \theta_{i-1,j} - 2\theta_{i,j}}{\Delta X^2} \right) + \left( \frac{\theta_{i,j+1} + \theta_{i,j-1} - 2\theta_{i,j}}{\Delta Y^2} \right) \\ = \left( \frac{\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1}}{2\Delta Y} \right) \left( \frac{\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}}{2\Delta X} \right) - \left( \frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}}{2\Delta X} \right) \left( \frac{\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j-1}}{2\Delta Y} \right)$$

şeklini alır. Bu denklem de düzenlenirse;

$$\theta_{i,j} = \left\{ \left( \frac{-1}{4\Delta X \Delta Y} \right) \left[ (\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1})(\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j}) - (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j})(\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j-1}) \right] \right. \\ \left. + \left( \frac{\theta_{i+1,j} + \theta_{i-1,j}}{\Delta X^2} \right) + \left( \frac{\theta_{i,j+1} + \theta_{i,j-1}}{\Delta Y^2} \right) \right\} / \left( \frac{2}{\Delta X^2} + \frac{2}{\Delta Y^2} \right) \quad (4.3)$$

elde edilir.

Yukarıda elde edilen üç denklem (denk. 4.1-4.3) grid sistemindeki tüm iç düğüm noktaları için geçerlidir. Sınırlardaki üç değişkene ait  $(\theta, \Psi, \Omega)$  değerler ise sınır şartlarından bulunur. Bu durumda;

Tüm sınırlar için

$$\Psi_{i,j} = 0 \quad (4.4)$$

Çatı için ( $T=T_{\text{ç}}$ )

$$\text{Eğer } T_{\text{ç}} > T_t \text{ ise } \theta = 1 \quad (\text{Yaz periyodu için})$$

$$\text{Eğer } T_{\text{ç}} < T_t \text{ ise } \theta = 0 \quad (\text{Kış periyodu için})$$

Tavan için ( $T=T_t$ )

$$\text{Eğer } T_t < T_{\text{ç}} \text{ ise } \theta = 0 \quad (\text{Yaz periyodu için})$$

$$\text{Eğer } T_t > T_{\text{ç}} \text{ ise } \theta = 1 \quad (\text{Kış periyodu için})$$

yazılabilir. Simetri ve yalıtım sınır şartında, sınıra normal yönde ısı transferi olmadığından buralardaki sıcaklık gradyanı da sıfır olur. Bu durumda;

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad (4.5)$$

yazılabilir. Bu denklem, sınırın x yönündeki pozisyonuna göre açılarak düzenlenirse;

Sınır  $x=0$  da ise

$$\theta_{1,j} = \frac{4}{3} \left( \theta_{2,j} - \frac{\theta_{3,j}}{4} \right) \quad (4.6)$$

Sınır  $x=L$ ’de ise

$$\theta_{M,j} = \frac{4}{3} \left( \theta_{M-1,j} - \frac{\theta_{M-2,j}}{4} \right) \quad (4.7)$$

ifadeleri elde edilir. Bu denklemlerde M, “x” yönündeki düğüm sayısını ifade etmektedir. Taylor serisi ile açılırken oluşacak kesme hatası oranını, diğer denklemlerle aynı tutmak için üç elemanlı ileri ve geri fark uygulanmıştır.

Daha önce elde edilen boyutsuz sınır şartından, tüm sınırlarda boyutsuz akımın sıfır olduğu bilinmektedir (denk. 4.4). “x” doğrultusundaki bir sınırda  $\Psi = 0$  olduğundan  $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = 0$  olur. Bu durumda denklem 3.11 aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\Omega_{x=0} = - \left. \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} \right|_{x=0} \quad (4.8)$$

Denklemin sağ tarafı Taylor serisi ile açılırsa;

$$\Psi_{2,j} = \Psi_{1,j} + \left( \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right)_{1,j} \Delta X + \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} \right)_{1,j} \frac{\Delta X^2}{2} \quad (4.9)$$

elde edilir.

Sınır şartlarından  $\Psi_{i,j} = 0$  ve  $\left( \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right)_{x=0} = 0$  olduğu bilinmektedir. Bu durumda tekrar düzenlenen denklem 4.9, denklem 4.8'den çıkarılırsa;

$x=0$  için;

$$\Omega_{1,j} = -2 \frac{\Psi_{2,j}}{\Delta X^2} \quad (4.10)$$

eşitliği bulunur. Elde edilen bu son denklem diğer sınırlar için de aşağıdaki gibi yazılabilir.

$x=L$  için;

$$\Omega_{M,j} = -2 \frac{\Psi_{M-1,j}}{\Delta X^2} \quad (4.11)$$

$y=0$  için;

$$\Omega_{i,1} = -2 \frac{\Psi_{i,2}}{\Delta Y^2} \quad (4.12)$$

$y=H$  için;

$$\Omega_{i,N} = -2 \frac{\Psi_{i,N-1}}{\Delta Y^2} \quad (4.13)$$

Burada H, çatının yüksekliği, N ise “y” yönündeki düğüm sayısıdır.

### 4.3. Cebirsel Denklemlerin Çözümü

Cebirsel denklemlerin çözümü için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunları direkt metotlar ve iteratif (tekrarlamalı) metotlar olarak iki gruba ayrılabilir [102]. Bu çalışmada cebirsel denklem takımlarının çözümü için iteratif metotlardan “Successive Under Relaxation (SUR)” kullanılmıştır. Bu metot diğer iteratif metotlara göre daha hızlı yakınsadığı için seçilmiştir. Bu metotta hesaplanan değişkenin yeni değerinden çıkarılan eski değeri belirli bir relaksasyon faktörü ile çarpılıp eski değerine eklenir. Denklem olarak bu metodun ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$T^1 = T^0 + r.(T^{\text{hesaplanan}} - T^0) \quad (4.14)$$

Burada  $T^0$ , değişkenin eski değeri;  $T^{\text{hesaplanan}}$ , hesaplamalar sonucunda bulunmuş değeri;  $T^1$  bir sonraki adımda kullanılacak yeni değeri;  $r$  ise relaksasyon faktörüdür ( $r < 1$ ). Her çatı tipi için hazırlanan Fortran programlarında  $\theta, \Omega, \Psi$  değişkenlerinin yeni değerlerinin bulunması için farklı relaksasyon faktörleri denenerek en uygun “ $r$ ” değerleri tespit edilmiştir.

Tüm cebirsel denklemlerin çözümü için yukarıda açıklanan yöntem kullanılmıştır. Her düğüm noktasında yeni hesaplanan değerler ile bir önceki değerleri karşılaştırılarak, aralarındaki fark belirli bir toleransın (yakınsama toleransı) altına düşünceye kadar işlemler tekrarlanmıştır. Bu çalışmada yakınsama toleransı olarak  $10^{-4}$  kullanılmıştır.

### 4.4. Nusselt Sayısının Hesaplanması

Yakınsamış sonuç elde edildikten sonra sıcak ve soğuk sınırlara ait (çatı ve tavana ait) ısı transferi miktarlarını bulmak için bu sınırdaki düğüm noktalarına Fourier Kanunu uygulanmıştır.

Bu durumda kullanılan denklemler;

$$q = h.(T_h - T_c) = -k. \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (4.15)$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \Rightarrow T = T_c + (T_h - T_c).\theta \quad (4.16)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem 4.16 denklem 4.15’de yerine konulup düzenlenirse;

$$h.(T_h - T_c) = -k. \frac{\partial(T_c + (T_h - T_c)\theta)}{\partial Y.L} \Big|_{y=0}$$

$$\frac{h.L}{k} = - \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{y=0} \quad (4.17)$$

elde edilir. Dikkat edilirse eşitliğin sağ tarafı Nusselt sayısına eşittir. Bu durumda;

$$Nu = - \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{y=0} \quad (4.18)$$

yazılabilir [64].

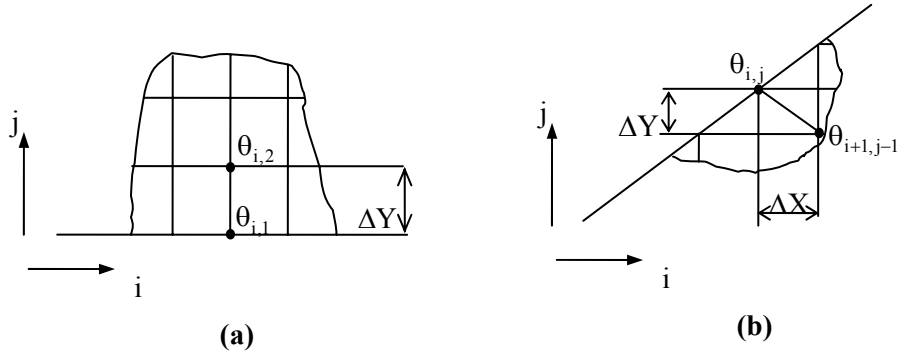
Yukarıdaki diferansiyel denklem, sonlu farklar ile cebirsel denkleme dönüştürülerek hem çatı hem de tavandaki her düğüm noktasına ayrı ayrı uygulanmak suretiyle bu noktalardaki yerel Nusselt sayıları bulunmuş olur. Tavandaki herhangi bir düğüm noktasına denklem 4.18 uygulanırsa (Şekil 4.6.a);

$$Nu_{i,1} = \left| \frac{\theta_{i,2} - \theta_{i,1}}{\Delta Y} \right| \quad (4.19)$$

elde edilir. Aynı şekilde çatıdaki herhangi bir düğüm noktasına denklem 4.18 uygulanırsa (Şekil 4.6.b);

$$Nu_{i,j} = \left| \frac{\theta_{i+1,j-1} - \theta_{i,j}}{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}} \right| \quad (4.20)$$

elde edilir. Bu iki denklem (denk. 4.19 ve 4.20) tavandaki ve çatıdaki yerel Nusselt sayıları bulunur.



**Şekil 4.6.** Yerel Nusselt sayılarının bulunmasında kullanılan düğüm noktaları; (a) Tavan için, (b) Çatı için

Ortalama Nusselt sayısını bulmak için de sayısal integrasyon yöntemlerinden “Simpson Kuralı” kullanılmıştır. Eşit adımlı Simpson integralinin formülasyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [103].

$$da = \frac{\Delta n}{3} [f(x_{k+1}) + 4.f(x_k) + f(x_{k-1})] \quad (4.21)$$

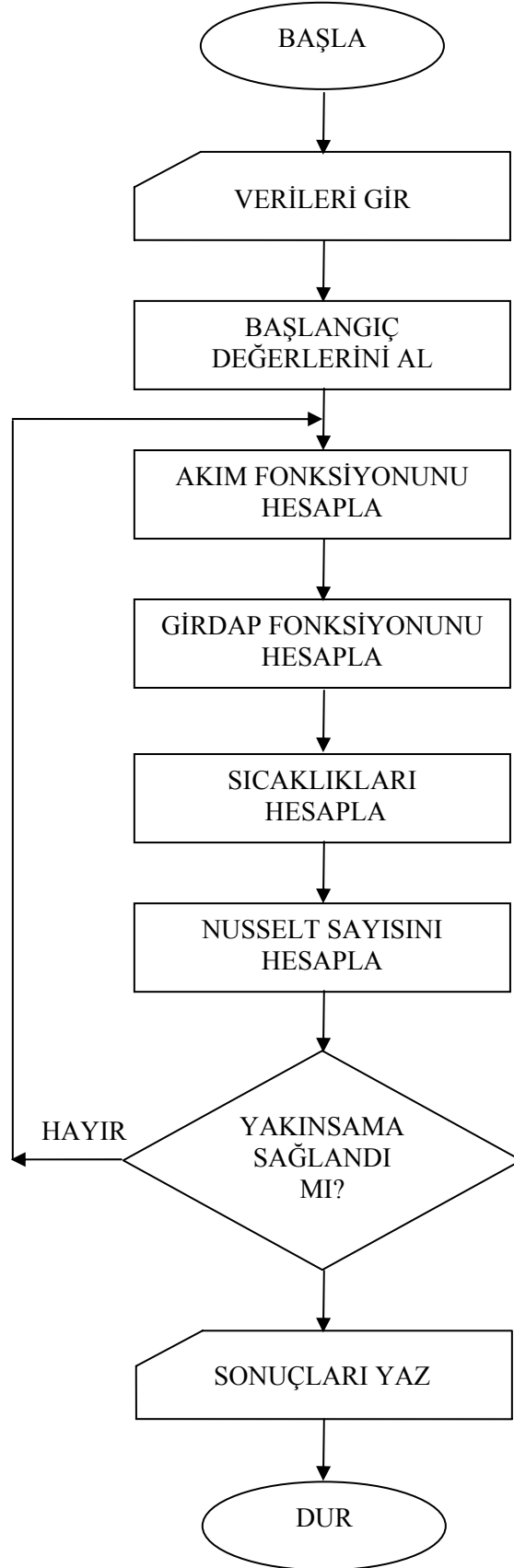
Bu denklemi ortalama Nusselt sayısını bulmak için dönüştürdüğümüzde;

$$Nu_{ort} = \frac{\Delta x}{3} (Nu_{1,l} + 4Nu_{2,l} + 2Nu_{3,l} + 4Nu_{4,l} + 2Nu_{5,l} \dots) \quad (4.22)$$

elde edilir. Yukarıda ifade edildiği gibi hem çatı hem de tavan için ayrı ayrı ortalama Nusselt sayılarının aritmetik ortalaması, sistemin ortalama Nusselt sayısı olarak alınmıştır.

#### 4.5. Fortran Programında İşlem Sırası

Her bir çatı tipi için farklı Fortran programları hazırlanmıştır. Bu dört programda da yukarıda ifade edilen işlemler gerçekleştirilirken izlenen sıra ortaktır. Şekil 4.6’da tüm Fortran programlarında kullanılan işlem sırasına ait akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Fortran programlarının akış şeması

## 5. SONUÇLARIN ANALİZİ

Bu çalışmada iteratif yöntemlerden “Successive Under Relaxation (SUR)” metodu kullanılarak farklı geometrideki dört çatı tipi için akışkan hareketi ve ısı transferi incelenmiştir. Çatı gibi kapalı hacimlerde ısı transferini, sıcaklık dağılımını ve akışkan hareketini etkileyen en önemli faktörler, akışkanın termofiziksel özellikleri, Rayleigh sayısı ve hacmin geometrik yapısıdır. Bu çalışmada çatı içerisinde akışkan olarak havanın dolaştığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla farklı Rayleigh sayıları ile farklı çatı tiplerinin, akışa ve ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada, Rayleigh sayısının altı farklı değeri ( $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \times 10^6$ ,  $10^7$ ) ve geometrik olarak birbirinden farklı dört çatı tipi (beşik, mansart, sundurma ve farklı yüzey alanlı beşik çatı) için diferansiyel denklemler çözülmüştür. Bu parametrelerin akışkan hareketi, sıcaklık dağılımı ve ısı transferine etkilerini bulmak için, temel denklemlerin çözümü ile elde edilen hız dağılımından “sabit akım çizgileri” elde edilmiştir. Tüm çatı tipleri için yaz ve kış sezonlarında elde edilen hız grafikleri EK2’de verilmiştir. Hesaplanan sıcaklık dağılımından ise “sabit sıcaklık eğrileri” çizilmiştir. Ayrıca çatıların tabanı ve tavanı için ayrı ayrı Nusselt sayıları hesaplanarak “ortalama Nusselt sayısı” bulunmuştur. Böylece çatı tipi ve Rayleigh sayısının ısı transferine etkisi tespit edilmiştir. Çalışma yaz ve kış sezonları için tekrarlanarak çatıların bu sezonlardaki ısı değişimleri araştırılmıştır.

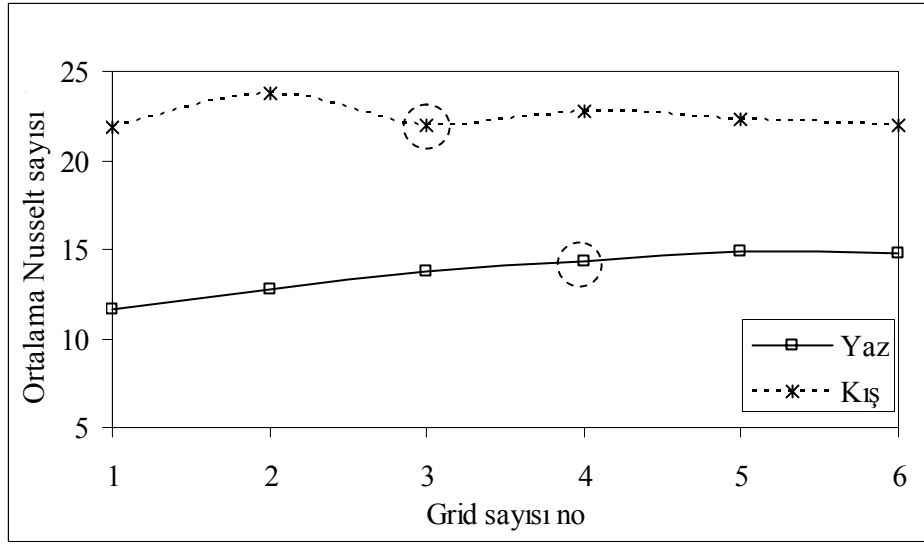
### 5.1. Optimum Grid Sayısı

Grid sayısı, sayısal çözümlerde sonucu etkileyen faktörlerden biridir. Ancak sonuçların grid sayısından bağımsız olması gerekir. Bunun için sayısal sonuçları etkilemeyecek optimum grid sayısı belirlenmelidir. Optimum grid sayısını tespit etmek için farklı grid sayılarıyla elde edilmiş sonuçların karşılaştırılması gerekir. Tablo 5.1’de optimum grid sayısının tespitinde kullanılan grid sayıları verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi farklı yüzey alanlı beşik çatı (FYAB çatı) haricindeki diğer çatılarda “x” ve “y” yönünde eşit grid sayıları kullanılmıştır.

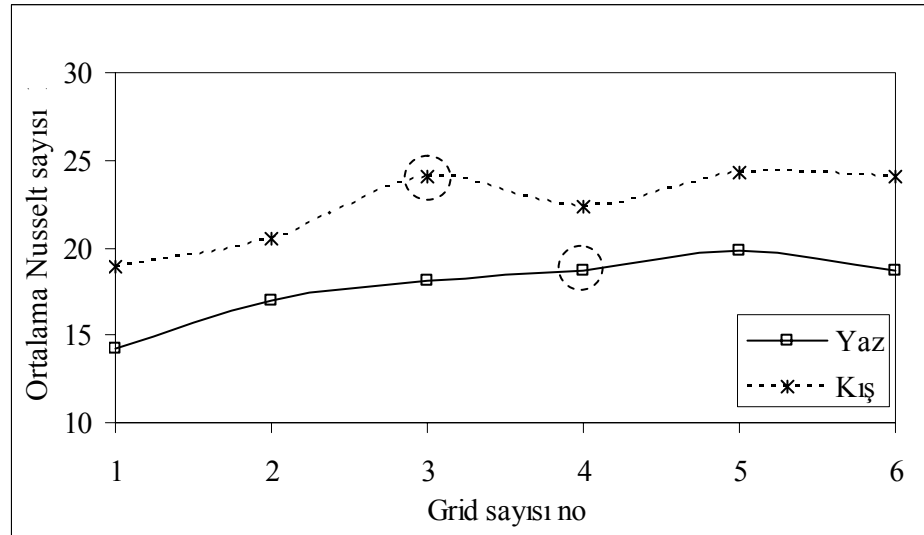
Bu çalışmada farklı grid sayılarına göre ortalama Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Bu değerlere göre de optimum grid sayısı seçilmiştir. Ortalama Nusselt sayısının en geniş salınım aralığı Rayleigh sayısının  $10^7$  değerinde olmaktadır. Bu değer için tüm çatıların yaz ve kış sezonlarında farklı grid sayılarına göre ortalama Nusselt değerleri hesaplanmıştır. Şekil 5.1’de tüm çatı tipleri için farklı grid sayılarında elde edilen ortalama Nusselt sayılarına ait grafikler gösterilmiştir. Tablo 5.2’de ise çatılar için seçilen optimum grid sayıları verilmiştir. Ortalama Nusselt sayısında değişimin yaşanmadığı minimum grid sayısı optimum olarak seçilmiştir.

**Tablo 5.1.** Optimum grid sayısının tespitinde kullanılan grid sayıları

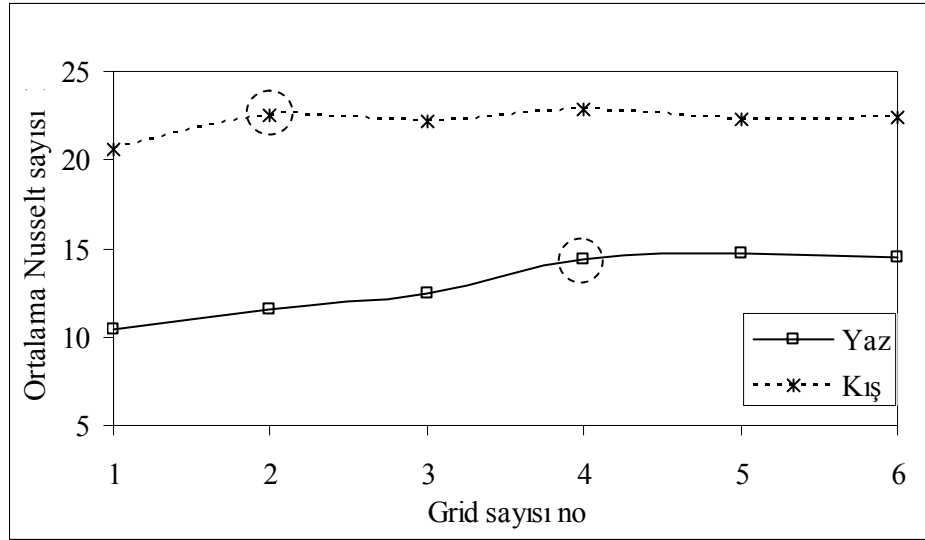
| Grid sayısı no | Grid sayısı                          |                                     |
|----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
|                | Beşik, mansart ve sundurma çatı için | Farklı yüzey alanlı beşik çatı için |
| 1              | 34x34                                | 34x23                               |
| 2              | 52x52                                | 52x35                               |
| 3              | 76x76                                | 76x51                               |
| 4              | 97x97                                | 97x65                               |
| 5              | 121x121                              | 121x81                              |
| 6              | 145x145                              | 145x97                              |



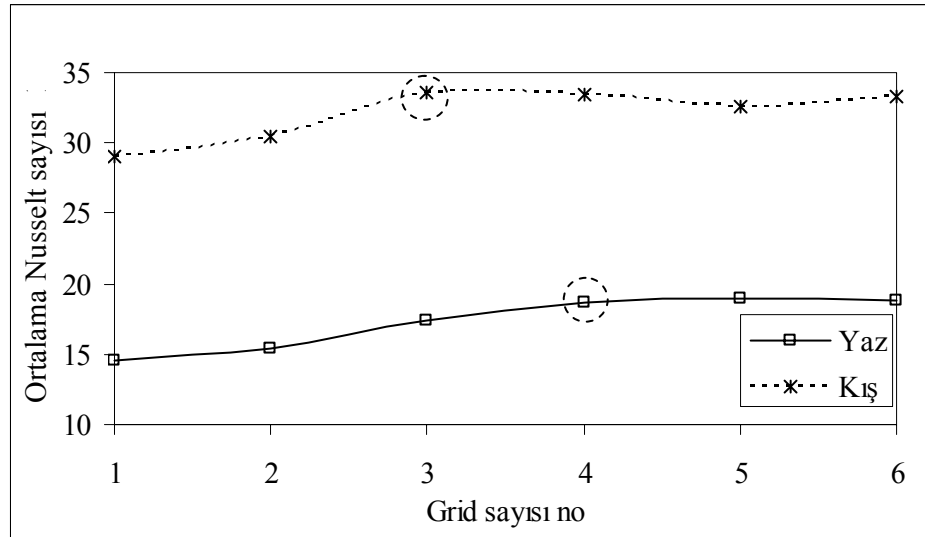
a) Beşik çatı



b) Mansart çatı



c) Sundurma çatı



d) Farklı yüzey alanlı beşik çatı

Şekil 5.1. Ortalama Nusselt sayısının grid sayısı ile değişimi

Tablo 5.2. Çatılar için seçilen optimum grid sayıları

| Çatı tipi                      | Sezon | Grid sayısı no | Optimum grid sayısı |
|--------------------------------|-------|----------------|---------------------|
| Beşik çatı                     | Yaz   | 4              | 97x97               |
|                                | Kış   | 3              | 76x76               |
| Mansart çatı                   | Yaz   | 4              | 97x97               |
|                                | Kış   | 3              | 76x76               |
| Sundurma çatı                  | Yaz   | 4              | 97x97               |
|                                | Kış   | 2              | 52x52               |
| Farklı yüzey alanlı beşik çatı | Yaz   | 4              | 97x65               |
|                                | Kış   | 3              | 76x51               |

## 5.2. Akış Alanının İncelenmesi

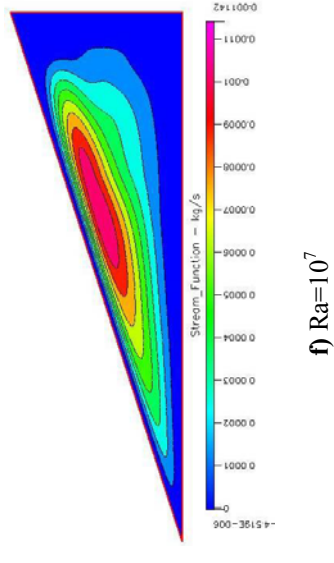
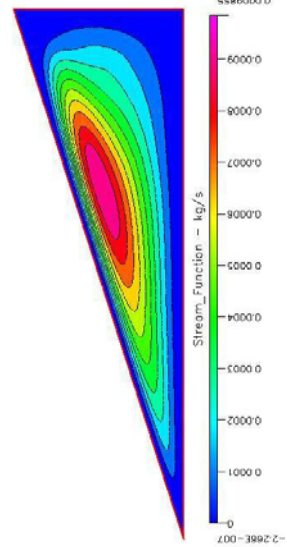
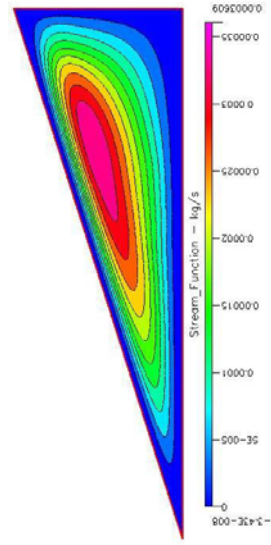
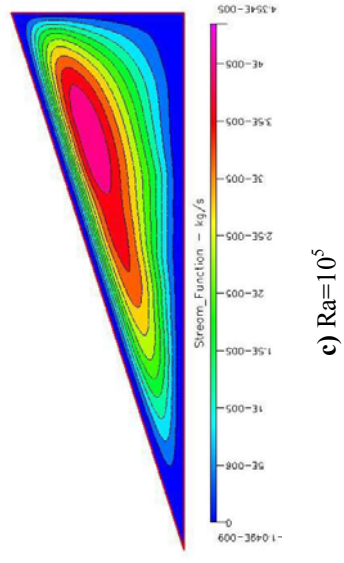
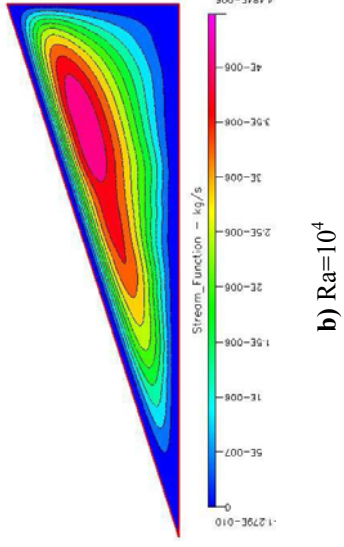
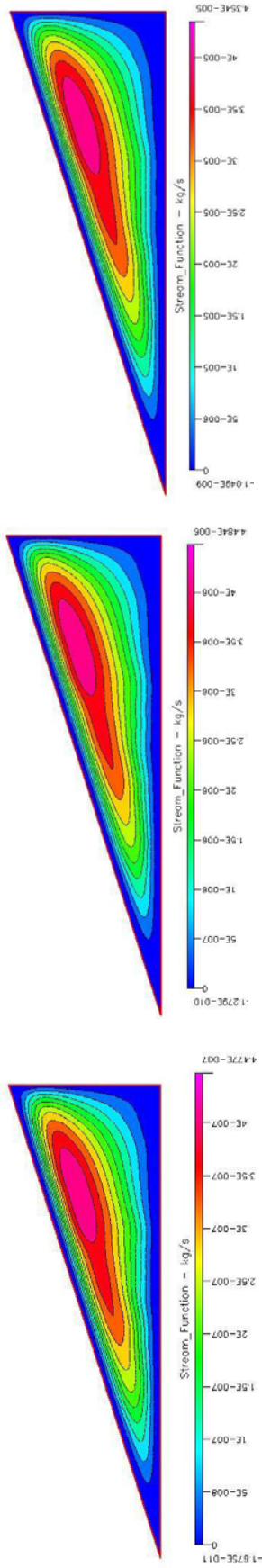
### Beşik çatı için akış alanının incelenmesi

Beşik çatının yaz sezonunda tüm Rayleigh sayılarındaki akışkan hareketi tek akış hücresinden oluşmaktadır. Düşük Rayleigh sayılarında akış hücresinin merkezi simetri yüzeyine daha yakın iken (Şekil 5.2.a-c) Rayleigh sayısının artmasıyla bu merkez eğimli sıcak yüzey boyunca çatının alt ucuna doğru kaymaktadır (Şekil 5.2.d-f). Bu kayma hareketiyle birlikte en dıştaki sabit akım çizgisi dolayısıyla da akışkan hareketi simetri yüzeyinden uzaklaşmaktadır. Böylece simetri yüzeyinin alt kısmındaki durgun bölge genişlemektedir. Bunun sebebi sıcaklık farkının artmasıyla alan olarak soğuk yüzeyden daha büyük olan eğimli sıcak yüzeyin, akışkan hareketi üzerindeki etkisinin artmasıdır (Şekil 5.2.f). Bu etki beraberinde akışkanın soğuk olan alt yüzeydeki hareketinin, sıcak olan üst yüzeylere doğru kaymasına neden olmaktadır.

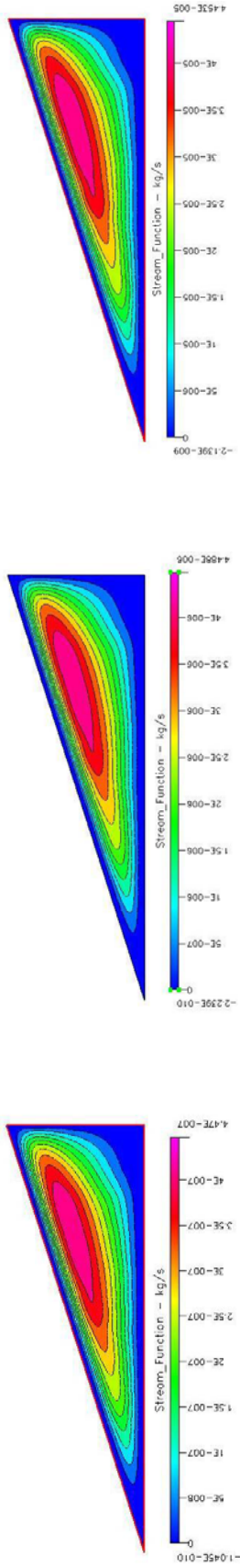
Kış sezonunda ise yaz sezonunda olduğu gibi düşük Rayleigh sayılarında ( $10^3 \leq Ra \leq 10^5$ ) çatı içerisinde tek bir akış hücre döngüsü bulunmaktadır (Şekil 5.3.a-c). Rayleigh sayısı  $10^6$  olduğunda yaz sezonundan daha yüksek akış hızları eğimli soğuk yüzey boyunca ikincil akış hücrelerinin oluşmasına neden olur (Şekil 5.3.d). Rayleigh sayısının artmasıyla simetri yüzeyine yakın olan ve “y” yönünde yüksekliğin maksimum olduğu bölgelerde iki ayrı akış hücresi daha oluşur (Şekil 5.3.e-f). Bu iki hücreden biri sıcak olan alt yüzeye diğeri de soğuk olan eğimli yüzeye daha yakındır. Ayrıca bu iki akış hücresini dıştan saran ve sıcak ile soğuk yüzeyler arasında hareket eden sabit akım çizgisi döngü yapmaktadır. Sıcak alt yüzey ile soğuk eğimli yüzeyin kesiştiği noktada ve eğimli yüzeyin sağ tarafında en üst kısmında iki küçük akış hücresi daha oluşmuştur (Şekil 5.3.f). Bunlar ilk baştaki ana akış hücresinden kopan hücreler olup bu bölgelerde küçük girdapların oluştuğunu göstermektedir. Kış sezonunda daha yüksek akış hızıyla birlikte kapalı hacmin tamamında etkili olan konveksiyon akışı görülmektedir.

### Mansart çatı için akış alanının incelenmesi

Mansart çatının yaz sezonuna ait akışkan hareketi de tek akış hücrelidir. Düşük Rayleigh sayılarında hücre merkezi, soğuk alt yüzeye temas eden eğimli yüzeye yakındır (Şekil 5.4.a-c). Rayleigh sayısının artmasıyla hücre merkezi de mansart çatının sıcak olan iki eğimli yüzeyinin kesişme noktasına doğru kayar (Şekil 5.4.d-e). Bu hareket akış hücre merkezinin beşik çatının yaz sezonunda görülen aynı eğime sahip sıcak yüzeye doğru kaymasına benzemektedir (Şekil 5.2.d-f). Rayleigh sayısının artmasıyla hücre merkezinin etrafındaki eğriler daha da sıklaşarak bu bölgede daha güçlü bir konveksiyon oluşur (Şekil 5.4.d-f). Tüm Rayleigh sayılarında çatının sol alt kısmında akışkanın durgun olduğu bölgeler oluşmuştur. Akış hızları beşik çatıdakine benzerdir.



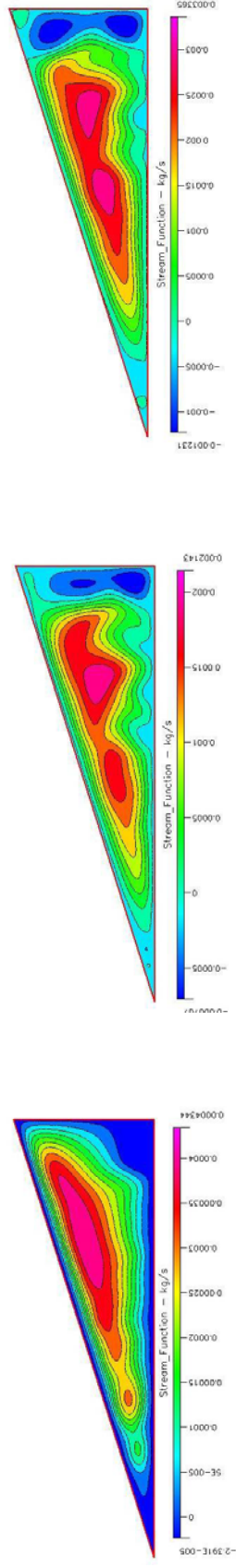
Şekil 5.2. Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Yaz sezonu)



**a)  $Ra=10^3$**

**b)  $Ra=10^4$**

**c)  $Ra=10^5$**

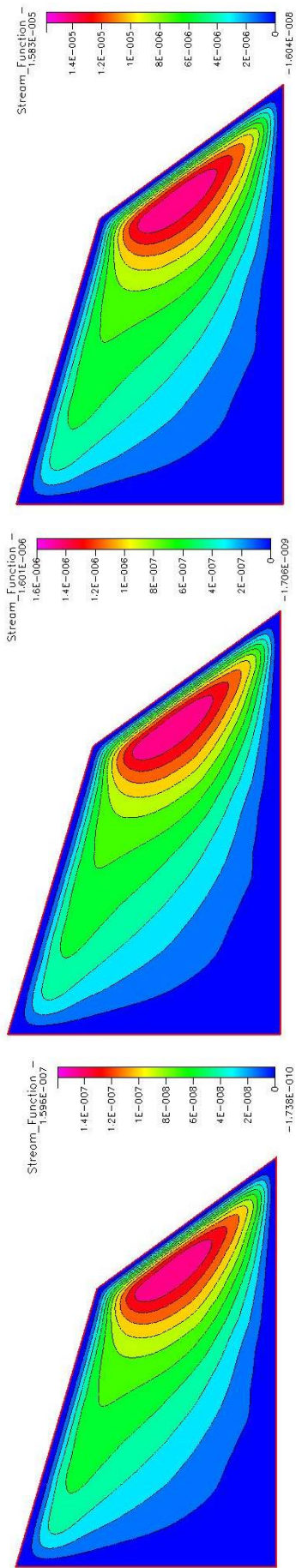


**d)  $Ra=10^6$**

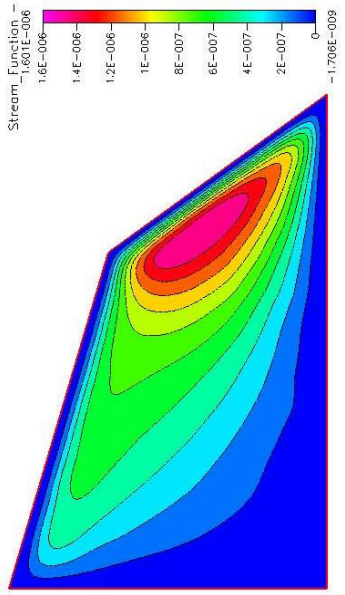
**e)  $Ra=5 \times 10^6$**

**f)  $Ra=10^7$**

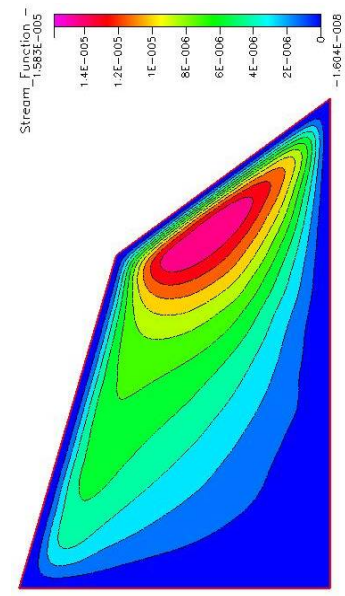
**Şekil 5.3.** Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Kış sezonu)



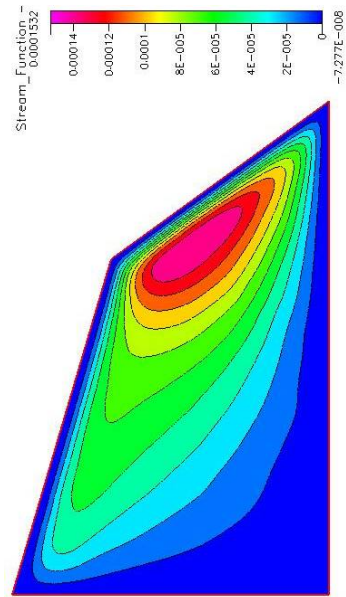
a)  $Ra=10^3$



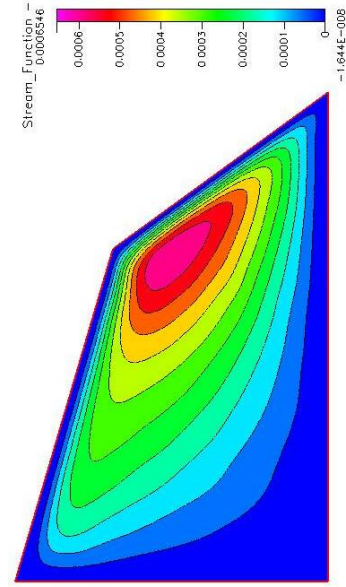
b)  $Ra=10^4$



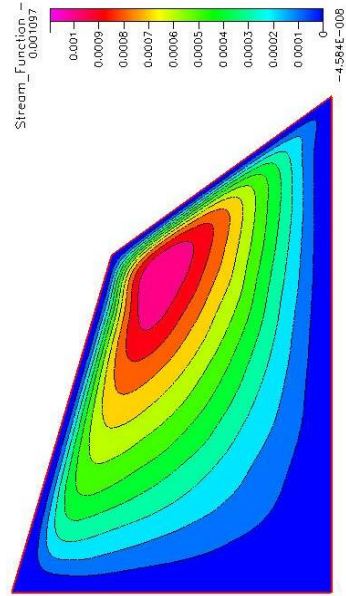
c)  $Ra=10^5$



d)  $Ra=10^6$



e)  $Ra=5 \times 10^6$



f)  $Ra=10^7$

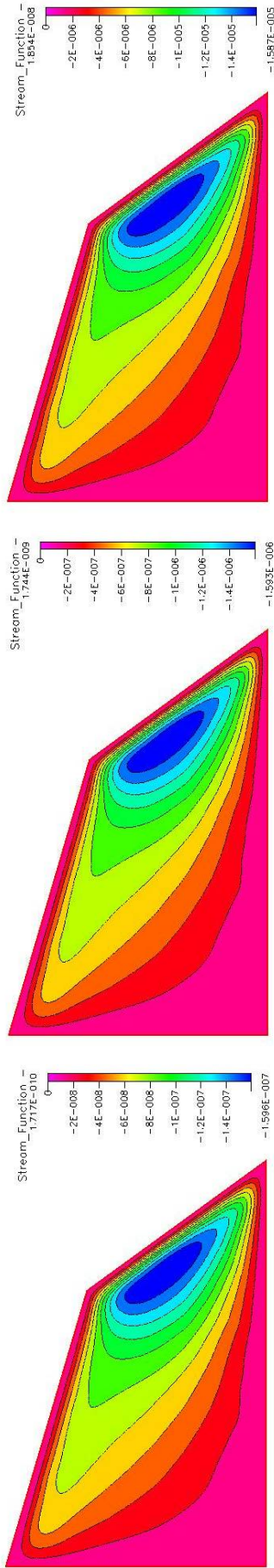
Şekil 5.4. Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Yaz sezonu)

Yaz sezonunun aksine kış sezonunda Rayleigh sayısının  $5 \times 10^6$  değerine kadar akışkan hareketinde büyük değişiklikler yoktur (Şekil 5.5.a-d). Ancak Rayleigh sayısının bu değerinde akış hücre merkezi sıcak alt yüzey ile soğuk eğimli yüzeyin kesişme noktasına doğru kayar (Şekil 5.5.e). Bu arada en dıştaki akım çizgisinin yapısında değişiklikler olmaya başlamıştır. Rayleigh sayısının en yüksek değerine ( $Ra=10^7$ ) çıkmasıyla birlikte en dıştaki akım çizgisi sıcak olan alt yüzeylere dalgali hareketlerle daha yakın geçer (Şekil 5.5.f). Bu hareket bir iç bölgede hareket eden akışkan grubunu da etkiler. En yüksek Rayleigh sayısına kadar çatının sol alt kısmında durgun bölge bulunmaktadır. Ayrıca tüm Rayleigh sayılarında çatının büyük bir kısmında sabit akım eğrileri seyrek aralıklarla döngü yapmaktadır. Bu nedenle bu çatıda konveksiyonun etkisinin genel olarak düşük olduğu söylenebilir. Bunun sebebi mansart çatıda sıcak alt yüzey alanının soğuk eğimli yüzeylerinin alanına oranının incelenen tüm çatılar içerisinde en düşük olmasıdır. Bu yüzden yüksek Rayleigh sayılarında bile beşik çatıya göre daha düşük akış hızları görülür.

#### Sundurma çatı için akış alanının incelenmesi

Sundurma çatının yaz sezonundaki akışkan hareketine Rayleigh sayısının etkisi çok az olmaktadır. Eğimli sıcak yüzeye paralel olan tek hücreli akışa ait merkez, Rayleigh sayısının artmasıyla biraz genişleyerek daha düzgün bir şekil alır (Şekil 5.6.e-f). Düşük Rayleigh sayılarında ise bu akış merkezi biraz daha dalgali bir şekle sahiptir (Şekil 5.6.a-d). Beşik çatıda olduğu gibi bu çatıda da dik duvarın alt kısmında durgun bölge vardır. Ancak bu bölgenin alanı Rayleigh sayısı ile değişmemektedir. Akışkan hızları beşik çatıya oranla daha yüksektir.

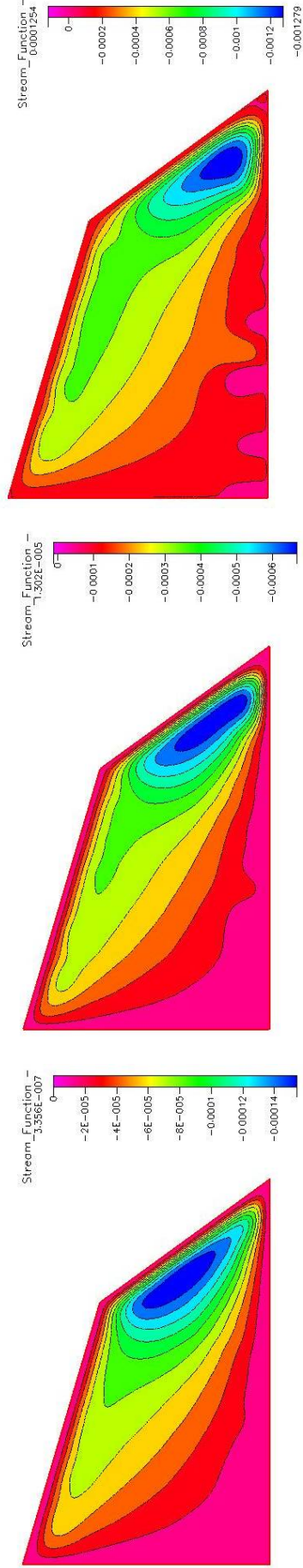
Beşik çatıdaki yaz sezonuna ait akışkan hareketinin benzerine sundurma çatının  $Ra \leq 10^6$  değerine kadar rastlanmaktadır (Şekil 5.7.a-d). Ancak sundurma çatıda akışın, hücre merkezinin eğimli soğuk yüzey boyunca daha yaygın ve bu yüzeye daha yakın olduğu görülmektedir. Akışkan hareketinde görülen farklılıklar, geometrik oranları aynı olan bu iki çatının dik duvarındaki sınır şartından kaynaklanmaktadır. Beşik çatıda sağda olan bu dik duvar simetri yüzeyi olarak, sundurma çatıda ise yalıtılmış yüzey olarak kabul edilmiştir. Rayleigh sayısının artmasıyla akışkan hareketindeki karışıklık da artmaktadır. Eğimli soğuk yüzey paralelinde bulunan tek akış hücresine ait merkez boyunca yeni tek döngülü akışlar oluşmuştur (Şekil 5.7.e). Akış hücre merkezinden kopmalar sonucunda oluşan bu hücrelerin sadece bu yüzey boyunca görülmesi yalıtımlı dik yüzeyden kaynaklanmaktadır. Sıcak olan alt yüzeye yakın bölgelerde akış çizgilerinin dalgalanmaya başladığı  $Ra=5 \times 10^6$  değerinde, sıcaklık farkının akışkan hareketi üzerindeki etkisi de gözle görülebilir bir noktaya ulaşmıştır. Rayleigh sayısının en büyük değerinde ( $Ra=10^7$ ) sıcak alt yüzeyin akışkan hareketine etkisi daha da artmıştır. Bu, akım çizgilerinde dalgalanmalara ve küçük akış döngülerine neden olmuştur (Şekil 5.7.f).



**a)  $Ra=10^3$**

**b)  $Ra=10^4$**

**c)  $Ra=10^5$**

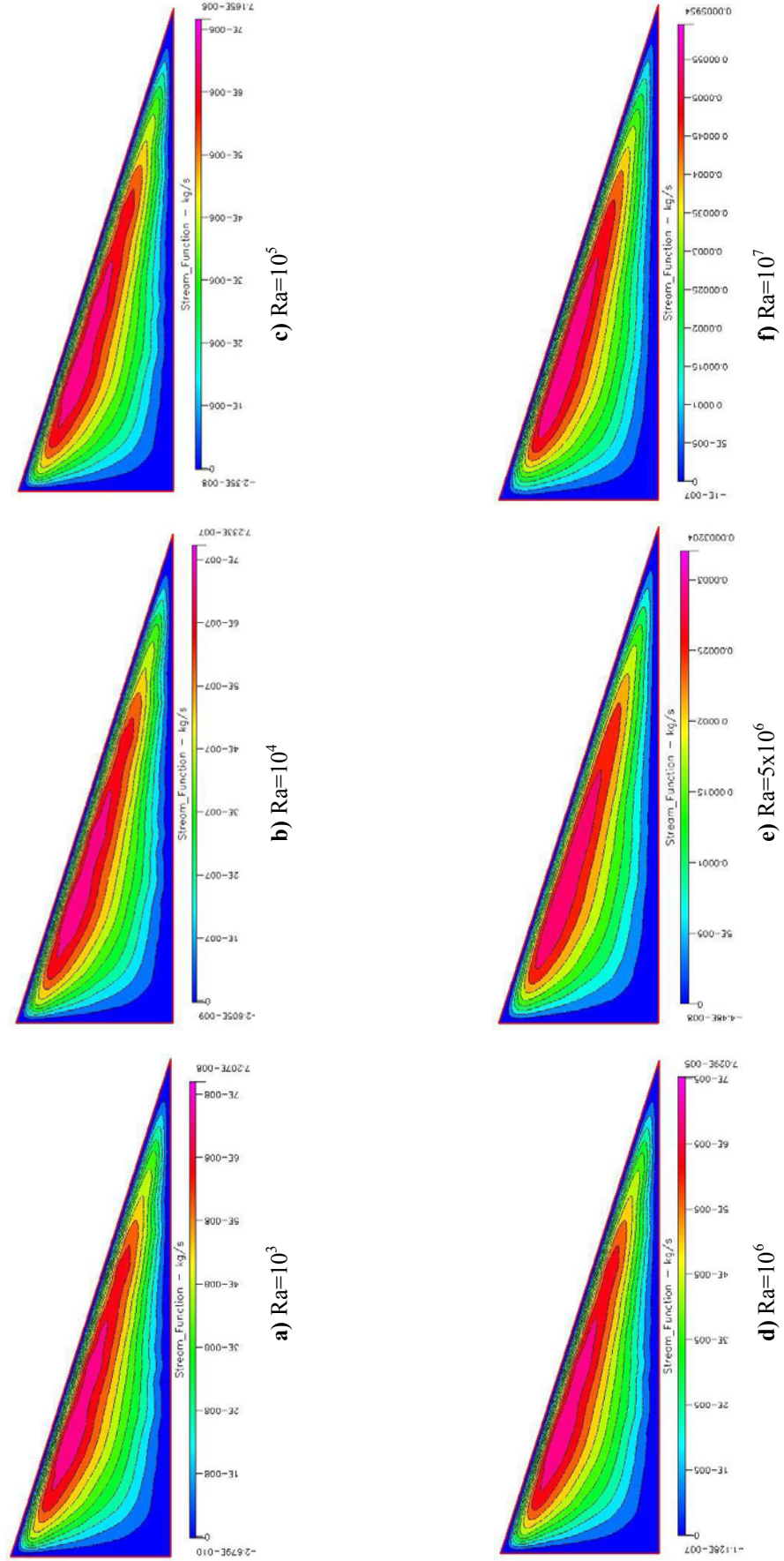


**d)  $Ra=10^6$**

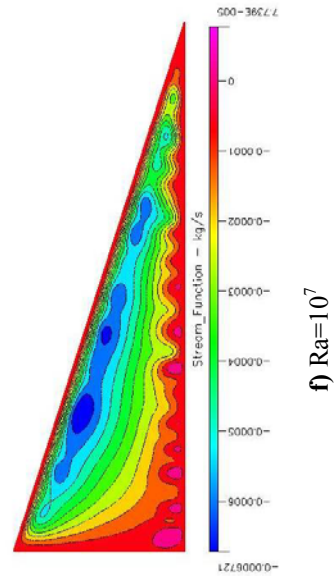
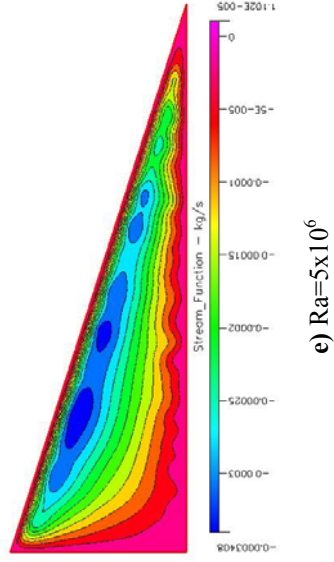
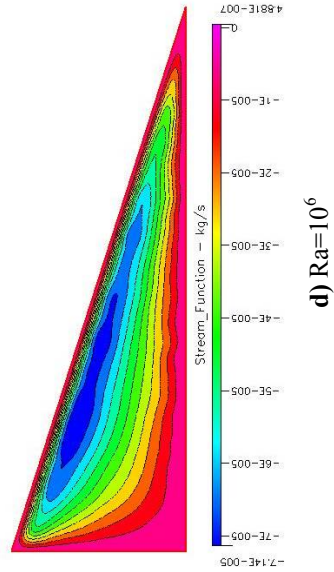
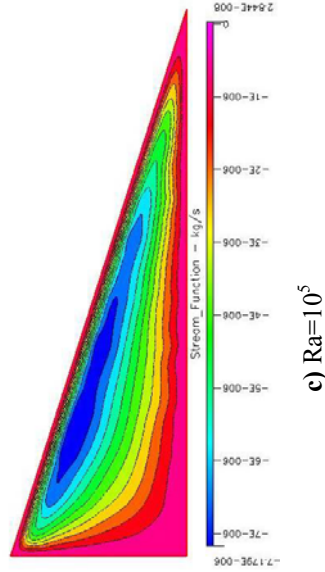
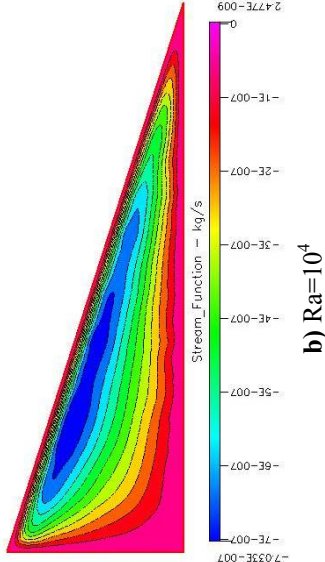
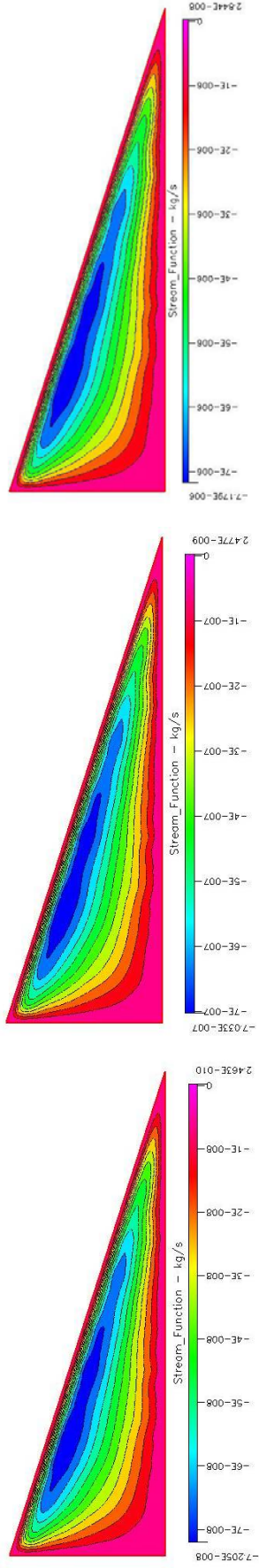
**e)  $Ra=5 \times 10^6$**

**f)  $Ra=10^7$**

**Şekil 5.5.** Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Kış sezonu)



**Şekil 5.6.** Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Yaz sezonu)

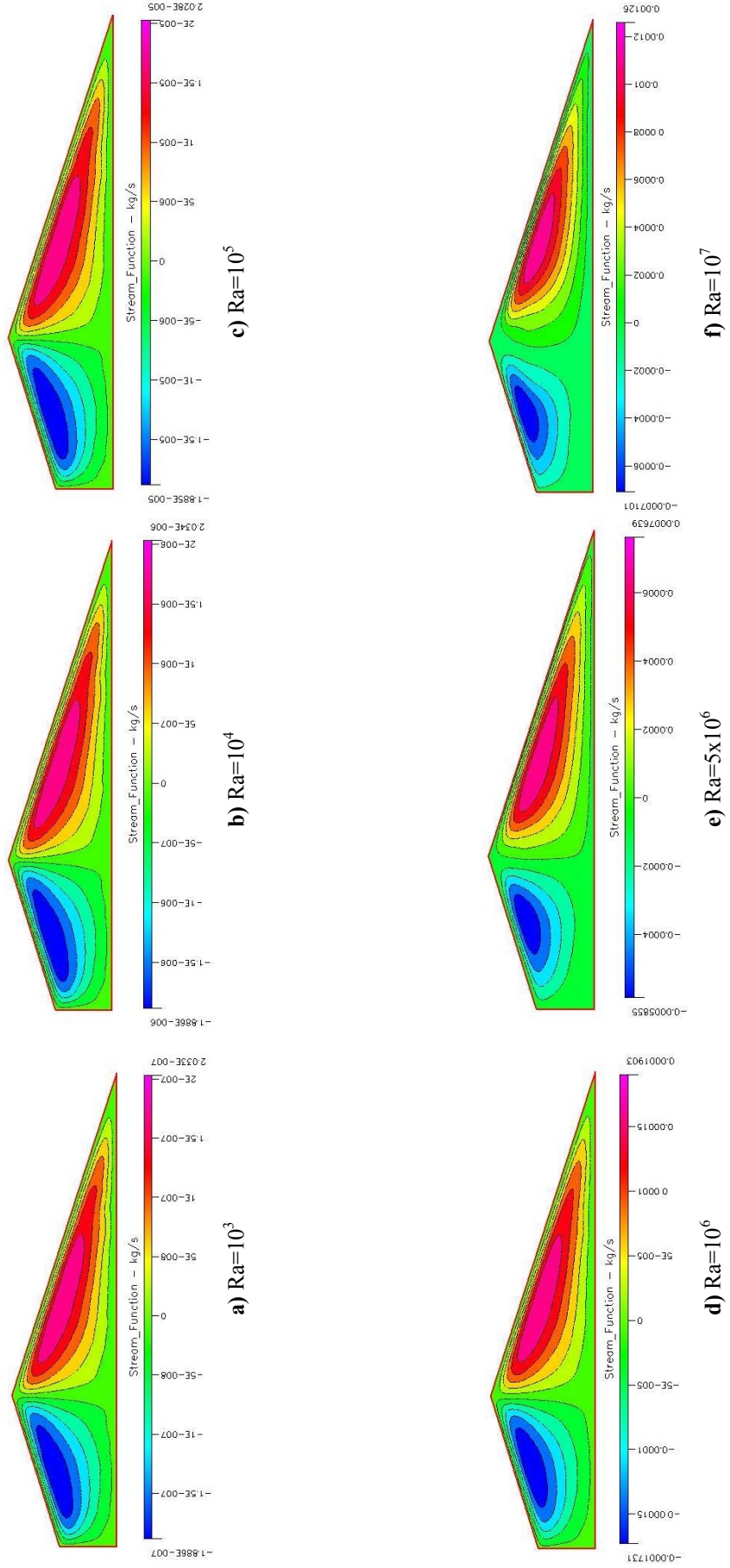


Şekil 5.7. Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Kış sezonu)

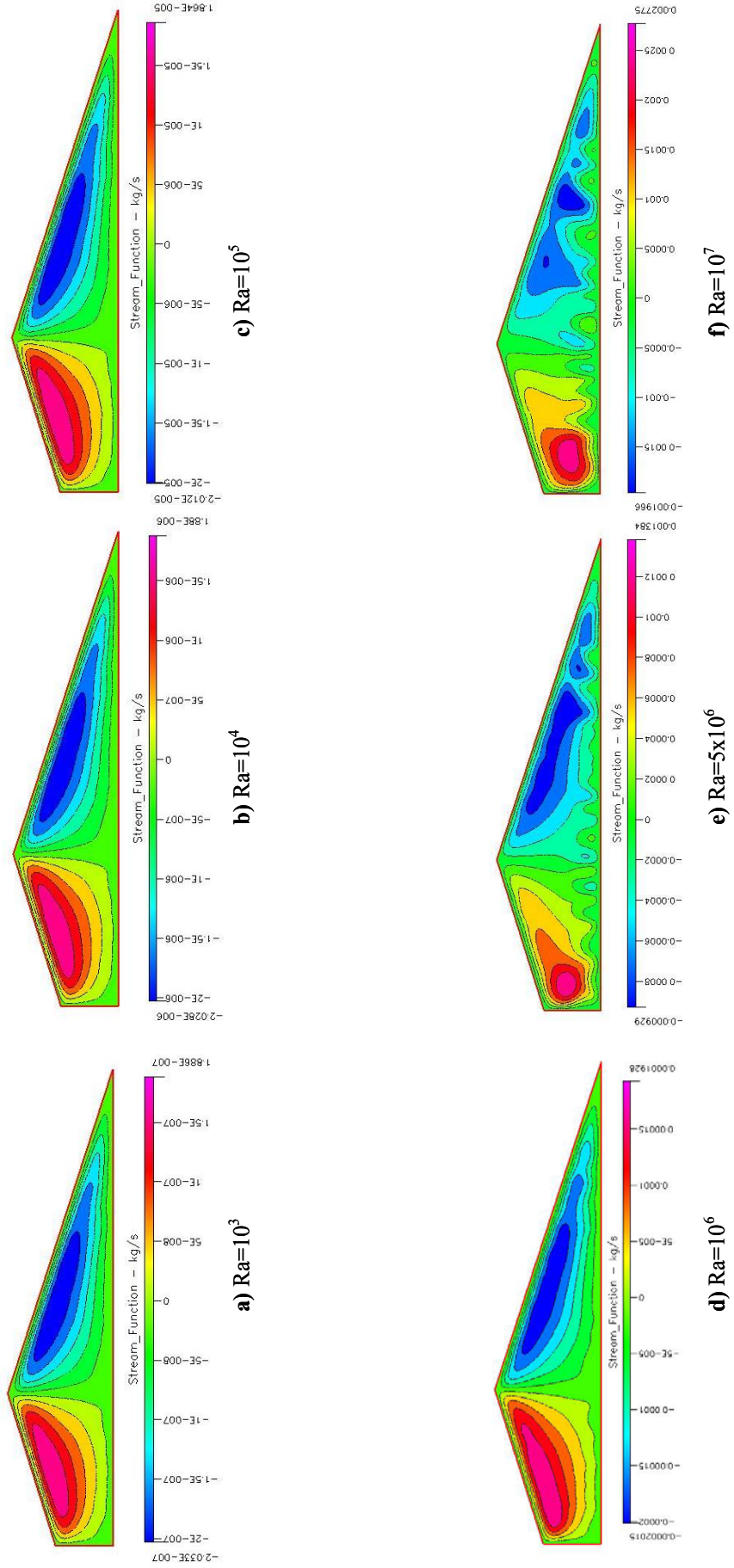
#### Farklı Yüzey Alanlı Beşik çatı (FYAB çatı) için akış alanının incelenmesi

Yaz sezonunda FYAB çatı, iki bölgeli akışa sahiptir. Sol taraftaki eğimli yüzey altında bir akış hücresi ve sağ taraftaki daha uzun olan eğimli yüzey altında da başka bir akış hücresi bulunmaktadır (Şekil 5.8). Yaz sezonunda, bu akış hücrelerinden sağdakinin hızı daha yüksektir. Düşük Rayleigh sayılarında bu akış hücrelerinin yapısında bir değişiklik olmamakla birlikte akışkan hızları Rayleigh sayısı ile orantılı olarak artmaktadır (Şekil 5.8.a-d). Ancak yüksek Rayleigh sayılarında sağdaki akış hücresinin soldakine baskınlığı daha fazladır (Şekil 5.8.e-f). Bu iki bölgede akış hızları arasındaki fark da Rayleigh sayısı ile orantılı olarak artmaktadır. Böylece soldaki akış hücresinin en dıştaki akım çizgisi kendi hücre merkezine doğru (soldaki yalıtımlı dik yüzeye doğru) kaymaktadır (Şekil 5.8.f). Bunun sebebi daha uzun bir sıcak yüzeye ait sağ bölgedeki akışkan hareketinin sıcaklık farkının artmasıyla daha da baskın hale gelmesidir. FYAB çatıda diğer çatıların aksine Rayleigh sayısı arttıkça akışkanın durgun olduğu bölgeler de artmaktadır.

Düşük Rayleigh sayılarında, yaz sezonunda olduğu gibi kış sezonunda da iki farklı akış bölgesi mevcuttur (Şekil 5.9.a-d). Rayleigh sayısı  $5 \times 10^6$  olduğunda sol taraftaki yalıtılmış yüzeye kayan akış hücre merkezine ait çizgilerden en dışta ve akış hücresine en uzak olanından kopmalar meydana gelmektedir. Bu bölgede tek akım eğrili döngülerin olduğu Şekil 5.9.e’de görülebilir. Daha geniş bir alana sahip sağ taraftaki eğimli yüzeye paralel olan akış hücresinde ise sundurma çatıdakine benzer (Şekil 5.7.e) kopmalara rastlanmaktadır (Şekil 5.9.e). Ancak sundurma çatıdan farklı olarak bu bölgede oluşan yeni akış hücrelerine ait hücre merkezleri sıcak olan alt yüzeyden daha fazla etkilenmektedir. Bunun sebebi FYAB çatının iki bölgesini ayıran herhangi bir duvarın olmamasından dolayı Rayleigh sayısının artmasıyla bu iki bölgede dıştaki akım eğrilerinin birbirlerine daha da yaklaşmalarıdır. Hatta bu iki hücre merkezine (sağ ve soldaki akış merkezlerine) ait en dıştaki akım eğrilerinin birbirlerine en yakın oldukları sıcak alt yüzeyin hemen üzerinde yeni akış döngülerinin oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.9.e). Soldaki akış merkezi eğimli soğuk yüzeyden yalıtımlı dik duvara doğru kaymıştır. Rayleigh sayısının artması sıcak alt yüzeyin akışkan hareketi üzerindeki etkisini de artırmaktadır (Şekil 5.9.f). Tüm akış hücrelerine ait merkezler sıcak olan alt yüzeye doğru genişlemekte ve alt yüzeye yakın bölgelerde küçük döngüler oluşturmaktadır. Yinede sağ ve sol eğimli yüzeylerin altındaki akış hücreleri birbirlerine karışmamaktadır. Çatı sınırlarına yakın bölgelerde ki sabit sıcaklık eğrilerinin daha sık olduğu görülmektedir. Buralarda konveksiyon daha etkilidir. Ayrıca  $Ra=10^7$  değerinde akışkanın hareketsiz olduğu bölgeler çok azdır. Kış sezonunda diğer çatılara oranla bu çatıda özellikle yüksek Rayleigh sayılarında konveksiyonun daha güçlü olduğu söylenebilir.



**Şekil 5.8.** FYAB çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Yaz sezonu)



**Şekil 5.9.** FYAB çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit akım çizgileri (Kış sezonu)

### 5.3. Sıcaklık Alanının İncelenmesi

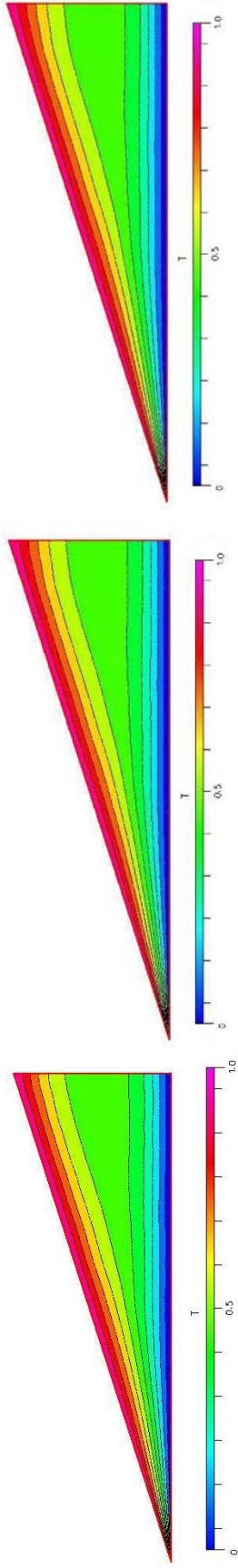
#### Beşik çatı için sıcaklık alanının incelenmesi

Beşik çatının yaz sezonunda düşük Rayleigh sayılarındaki sabit sıcaklık eğrileri Şekil 5.10.a-c’de gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi düşük Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri eşit aralıklı ve sıcak olan eğimli yüzey ile soğuk olan alt yüzeye yakın bulunmaktadır. Orta bölgelerde ise sabit sıcaklığa sahip geniş bir alan vardır. Bu durumda konveksiyonun ısı transferi üzerinde daha etkili olduğu söylenebilir. Rayleigh sayısının  $10^6$  olmasıyla birlikte konveksiyonun ısı transferine etkisi daha da belirginleşir (Şekil 5.10.d-f). Eğimli yüzeyin dik duvara yakın bölgelerindeki sabit sıcaklık eğrileri soğuk alt yüzeye doğru dalgalı bir hareket yaparlar. Böylece orta kısımdaki sabit sıcaklıklı bölge daralarak konveksiyonla ısı transferi tüm hacimde etkili olur.

Yaz sezonunda olduğu gibi kış sezonunda da  $Ra=10^6$  oluncaya kadar konveksiyonun ısı transferine etkisi azdır (Şekil 5.11.a-c). Ancak bu Rayleigh değerinden itibaren sabit sıcaklık eğrileri yaz sezonundakilere oranla konveksiyondan çok daha fazla etkilenmektedir. Sıcak olan eğimli yüzey üzerindeki sabit sıcaklık eğrileri dalgalı bir şekilde hareket etmektedir (Şekil 5.11.d). Bu hareket soğuk eğimli yüzeye yakın akışkanları daha da etkilemiştir. Konveksiyonun çatının orta kısmı haricindeki birçok bölgede etkili olduğu söylenebilir.  $Ra=5 \times 10^6$  değerinden itibaren çatının tamamını dolduran sabit sıcaklık eğrileri görülmektedir (Şekil 5.11.e-f). Bu durumda ısı transferinin de oldukça arttığı muhakkaktır. Ancak Rayleigh sayısının yüksek olduğu bu durumda laminar akışın halen devam ettiğini söylemek doğru olmayabilir. Yüksek Rayleigh sayılarında yaz sezonuna oranla konveksiyon ısı transferine daha fazla etki etmektedir.

#### Mansart çatı için sıcaklık alanının incelenmesi

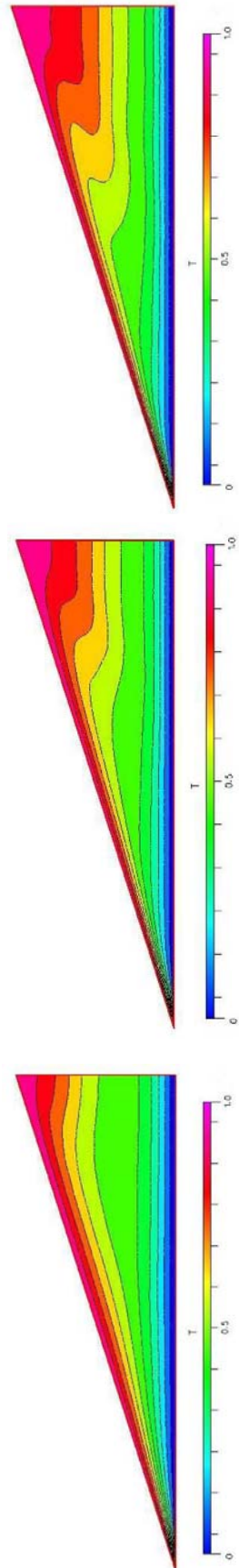
Mansart çatıda yaz sezonunda konveksiyonun ısı transferi üzerindeki etkisinin artması, beşik çatıya göre daha yüksek Rayleigh sayısında ( $Ra=5 \times 10^6$ ) olmaktadır (Şekil 5.12.e). Bunun sebebi mansart çatının sıcak olan üst eğimli yüzeyleri ile soğuk olan alt yüzeyi arasındaki mesafenin beşik çatıya oranla daha büyük olmasıdır. Bu mesafe nedeniyle düşük Rayleigh sayılarında sıcak ve soğuk yüzeylere yakın olan bölgeler dışındaki büyük bir alanda sıcaklık sabittir (Şekil 5.12.a-d). Sıcak ve soğuk yüzeylere yakın bölgelerdeki sabit sıcaklık eğrileri ise bu yüzeylere paraleldir.  $Ra=5 \times 10^6$  olmasıyla sıcak olan eğimli yüzeylere yakın sabit sıcaklık eğrileri aşağıya doğru eğim almıştır. Konveksiyonun ısı transferi üzerindeki etkisi  $Ra=10^7$  olduğunda daha da artmıştır (Şekil 5.12.f). Ancak bu Rayleigh değerlerinde bile sabit sıcaklıklı geniş bir bölge bulunmaktadır.



a)  $Ra=10^3$

b)  $Ra=10^4$

c)  $Ra=10^5$

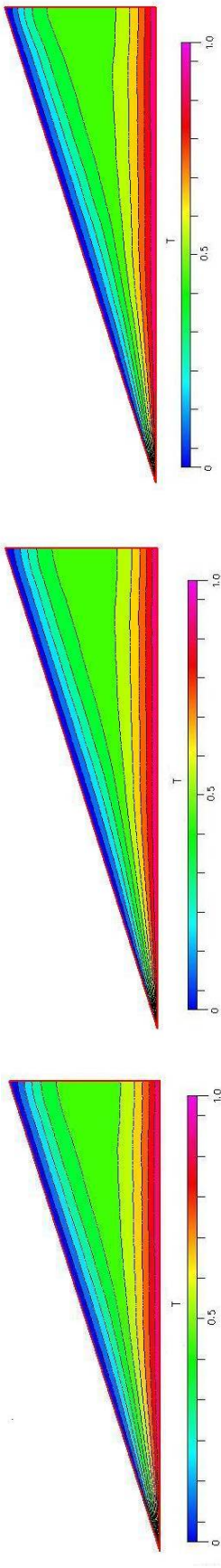


d)  $Ra=10^6$

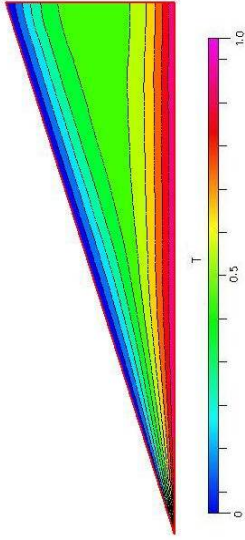
e)  $Ra=5 \times 10^6$

f)  $Ra=10^7$

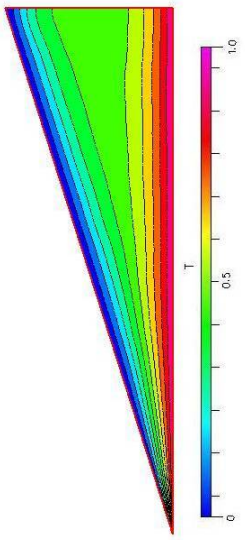
**Şekil 5.10.** Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Yaz sezonu)



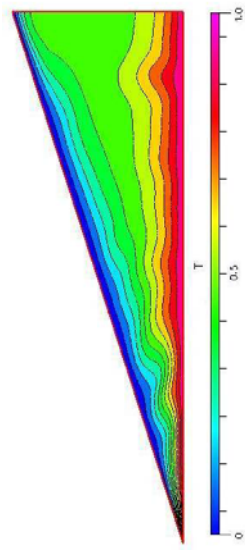
a)  $Ra=10^3$



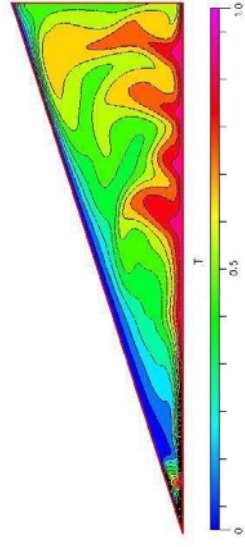
b)  $Ra=10^4$



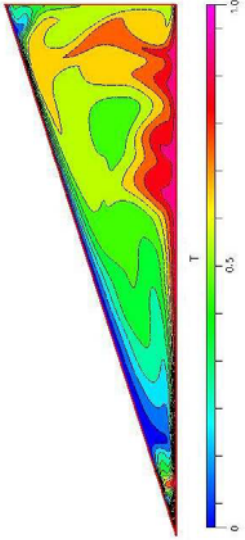
c)  $Ra=10^5$



d)  $Ra=10^6$

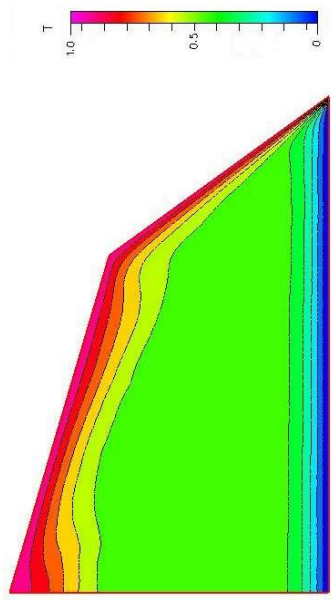
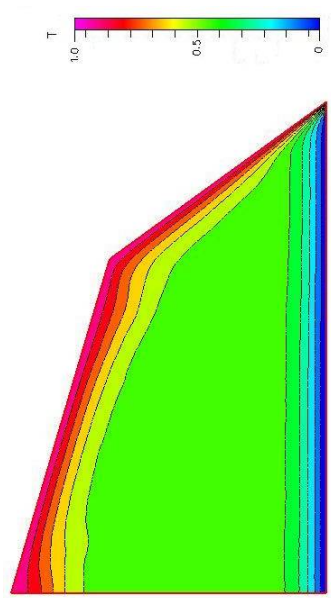
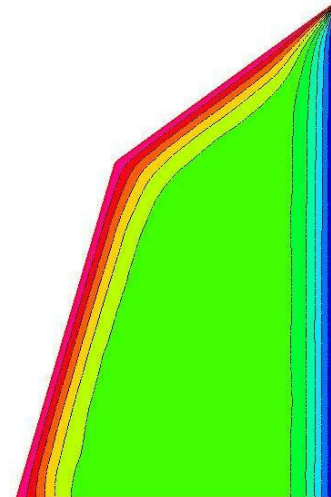
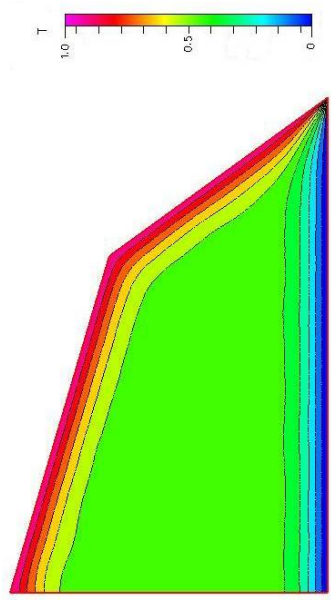
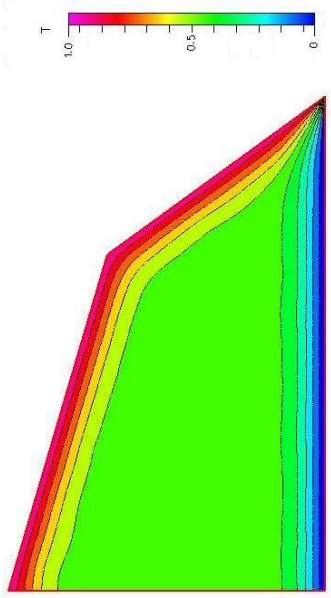
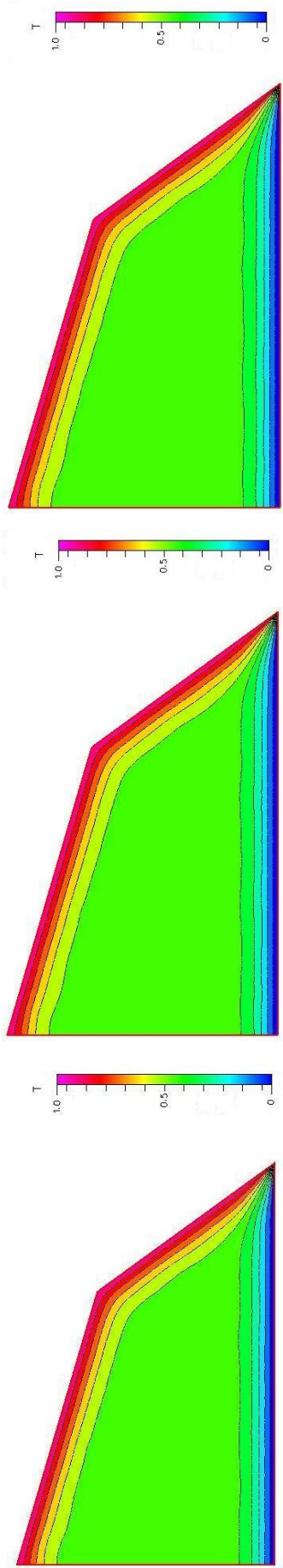


e)  $Ra=5 \times 10^6$



f)  $Ra=10^7$

**Şekil 5.11.** Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Kış sezonu)



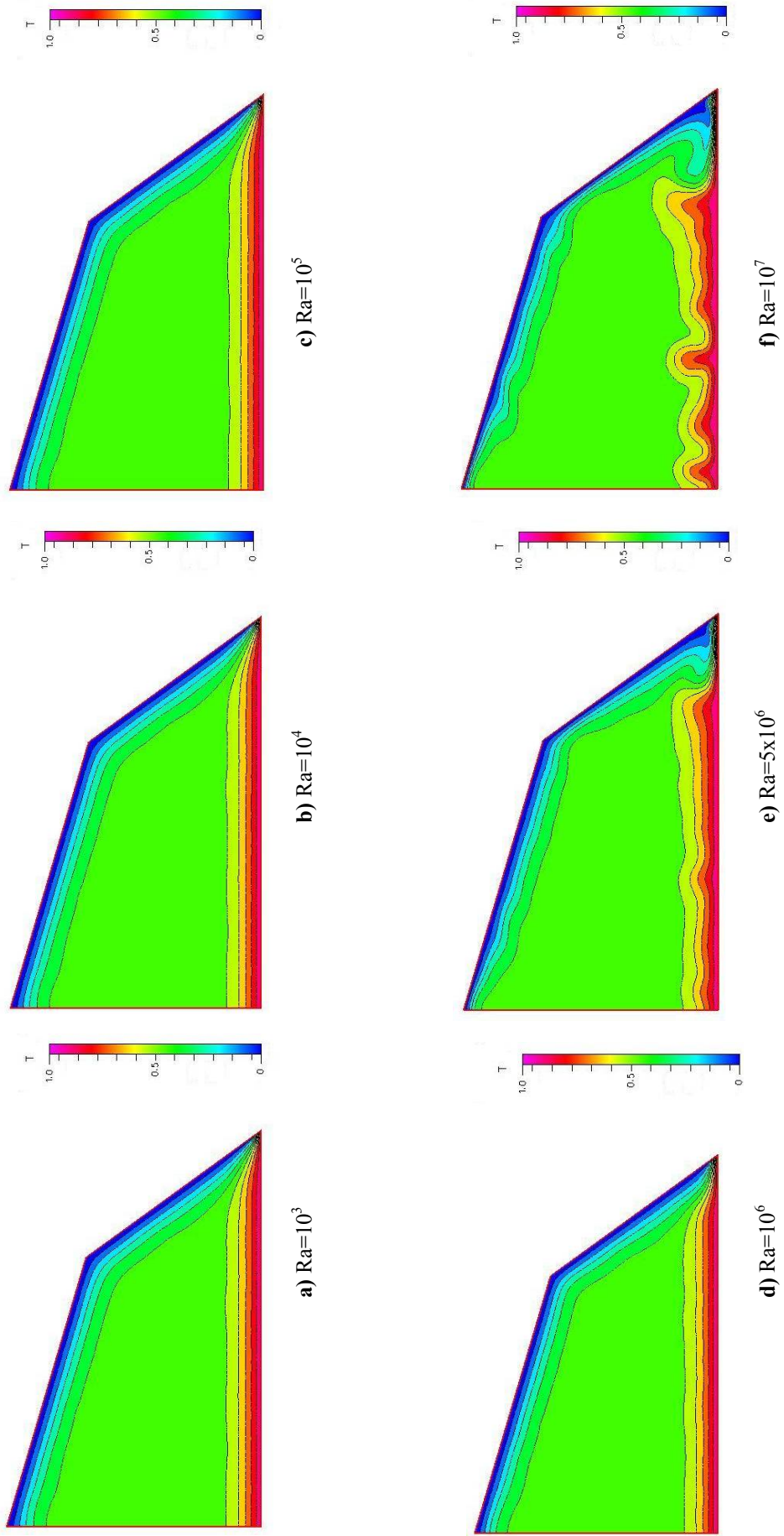
**Şekil 5.12.** Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Yaz sezonu)

Konveksiyonun ısı transferine etkisi yaz sezonunda olduğu gibi kış sezonunda da  $Ra=5 \times 10^6$  değerinden sonra artmaktadır. Bu değere kadar sabit sıcaklık eğrileri Rayleigh sayısı ile değişmemektedir (Şekil 5.13.a-d). Özellikle soğuk eğimli çatı yüzeyi ile alttaki sıcak yüzeyin kesişme noktasındaki sabit sıcaklık eğrilerinin konveksiyonun ısı transferi üzerinde etkisini göstermesiyle birlikte sıcak yüzeye doğru hareket ettikleri görülür (Şekil 5.13.e). Bu hareketin sebebi eğim açısının yüksek olmasıdır. İncelenen çatılar içerisinde en büyük eğim açısı mansart çatıya aittir. Rayleigh sayısının  $10^7$  olmasıyla birlikte alttaki sıcak yüzeye yakın sabit sıcaklık eğrileri arasındaki mesafeler genişlemekte ve eğimli soğuk yüzey altındaki sabit sıcaklık eğrilerini de etkilemektedir (Şekil 5.13.f). Yüksek Rayleigh sayılarında yaz sezonuna göre konveksiyonun çok daha etkili olduğu söylenebilir.

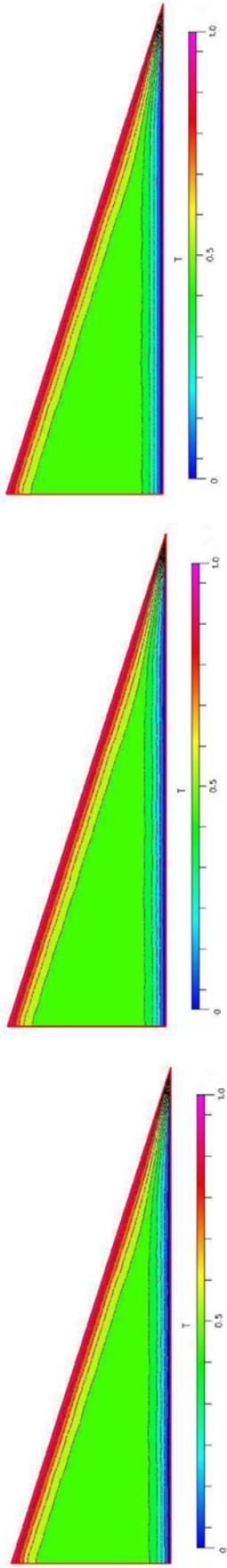
#### Sundurma çatı için sıcaklık alanının incelenmesi

Yaz sezonunda sundurma çatının sabit sıcaklık eğrileri yüksek Rayleigh sayılarına kadar alt yüzey ve eğimli üst yüzeylere paraleldir. Çatının büyük bir bölümünde sıcaklık değişmemektedir.  $Ra=10^7$  oluncaya kadar kondüksiyon ısı transferinde daha etkilidir (Şekil 5.14.a-e). Bu Rayleigh değerinde yalıtımlı dik duvarın üst kısmına yakın bölgelerdeki sabit sıcaklık eğrilerinde küçük değişimler göze çarpmaktadır (Şekil 5.14.f). Konveksiyonun etkisi sadece bu Rayleigh değerinde görülmektedir.

Sundurma çatının kış sezonunda da yüksek Rayleigh sayılarına kadar ısı transferinde kondüksiyon etkilidir. Sabit sıcaklık eğrileri sıcak ve soğuk yüzeylere paraleldir ve Rayleigh sayısının değişiminden etkilenmemektedir (Şekil 5.15.a-d). Yaz sezonundan farklı olarak daha düşük Rayleigh sayısında ( $Ra=5 \times 10^6$ ) konveksiyonun ısı transferine etkisi hissedilir (Şekil 5.15.e). Diğer çatıların kış sezonlarında olduğu gibi sıcak olan alt yüzeye yakın sabit sıcaklık eğrileri dalgalı bir şekil oluştururlar. Bu hareket eğimli üst yüzeye yakın olan daha düşük sıcaklıktaki eğrileri de etkiler. Rayleigh sayısının artmasıyla daha fazla alanda konveksiyon etkili olur (Şekil 5.15.f) Ancak bu etki beşik çatıdaki gibi çatının tamamında değil sadece soğuk ve sıcak yüzeylerin çevresindedir.



**Şekil 5.13.** Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Kış sezonu)



**a)  $Ra=10^3$**

**b)  $Ra=10^4$**

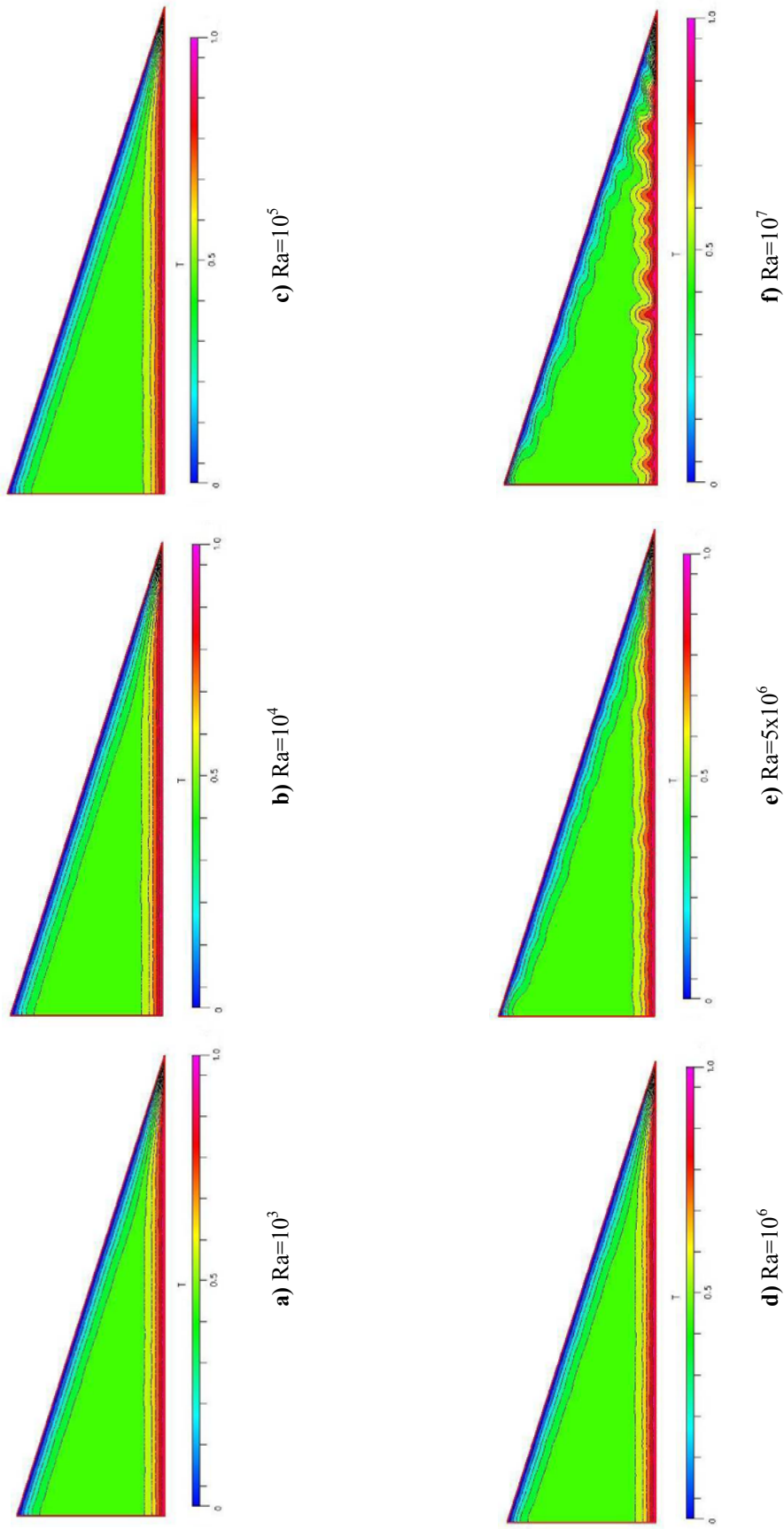
**c)  $Ra=10^5$**

**d)  $Ra=10^6$**

**e)  $Ra=5 \times 10^6$**

**f)  $Ra=10^7$**

**Şekil 5.14.** Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Yaz sezonu)



**Şekil 5.15.** Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Kış sezonu)

#### Farklı Yüzey Alanlı Beşik çatı için sıcaklık alanının incelenmesi

Diğer çatılarda olduğu gibi FYAB çatının yaz sezonunda da düşük Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri sıcak ve soğuk yüzeylere paraleldir. Şekil 5.16.a-c’de görüldüğü gibi çatının büyük bir kısmında sıcaklık Rayleigh sayısıyla değişmemektedir.  $Ra=10^6$  olduğunda üstteki sıcak iki yüzeyin birleşme noktalarındaki sabit sıcaklık eğrileri aşağıya doğru eğim alır (Şekil 5.16.d). Bu eğimli hareket yüksek Rayleigh sayılarında daha belirgin olarak görülmektedir (Şekil 5.16.e-f).

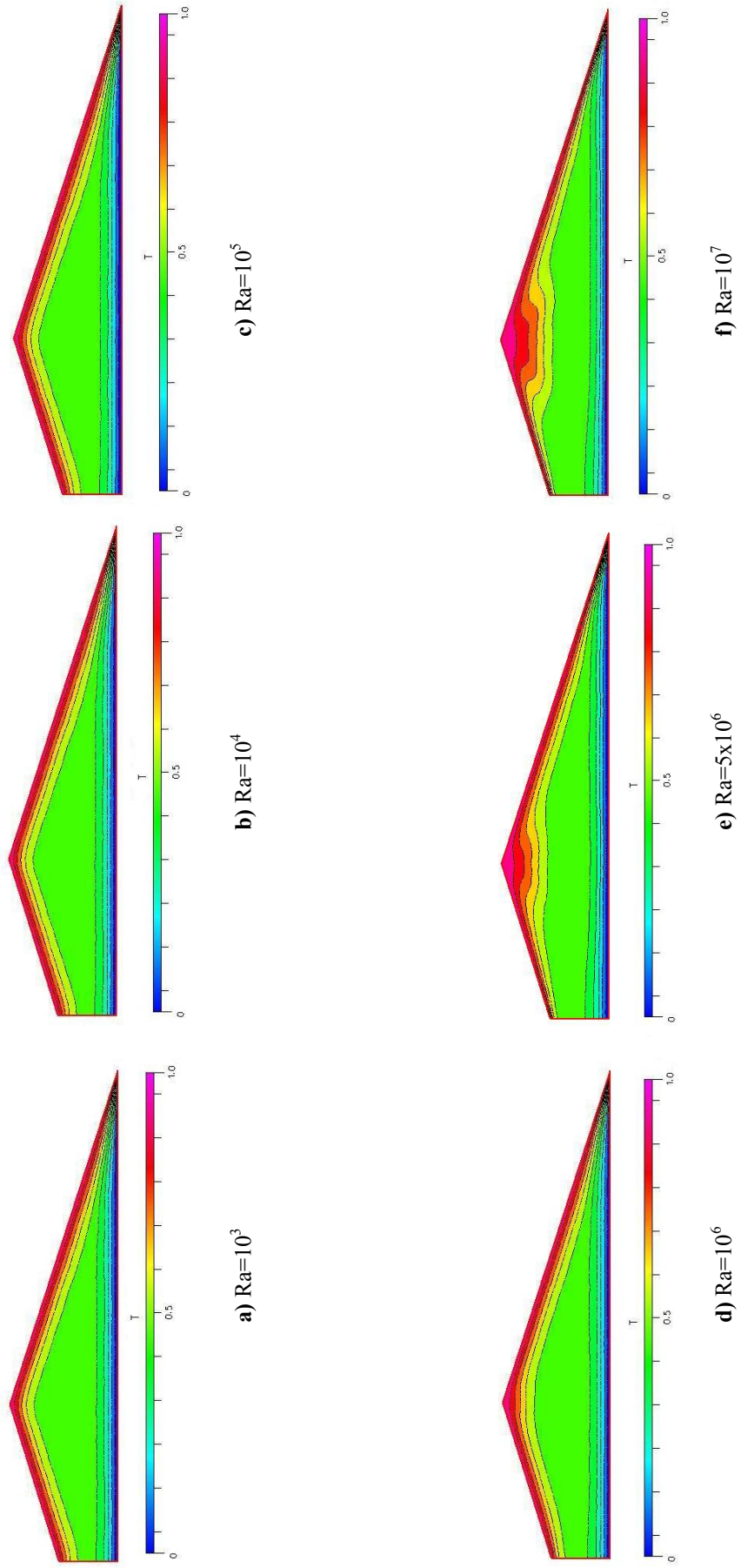
Yaz sezonunda olduğu gibi kış sezonunda da düşük Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri değişmemektedir (Şekil 5.17.a-c). Ancak  $Ra=10^6$  olmasıyla sıcak alt yüzey üzerindeki sabit sıcaklık eğrilerinde değişiklik başlar (Şekil 5.17.d). Özellikle daha büyük Rayleigh sayılarında konveksiyonun etkisi giderek artar. Kış sezonunda Beşik çatıdan sonra konveksiyondan en fazla etkilenen çatı tipidir. Büyük Rayleigh sayılarında özellikle sıcak alt yüzey ile soğuk eğimli yüzeylerin kesişme noktasında ve sol taraftaki yalıtımlı yüzeye yakın bölgelerde sabit sıcaklık eğrilerinin aralıkları genişler (Şekil 5.17.e). Rayleigh sayısının daha da artmasıyla sabit sıcaklık eğrileri çatının büyük bir alanında etkili olur (Şekil 5.17.f). Rayleigh sayısı arttıkça soğuk olan üst eğimli iki yüzeyin kesişme noktasındaki sabit sıcaklık eğrileri daralır.

#### **5.4. Isı Transferinin İncelenmesi**

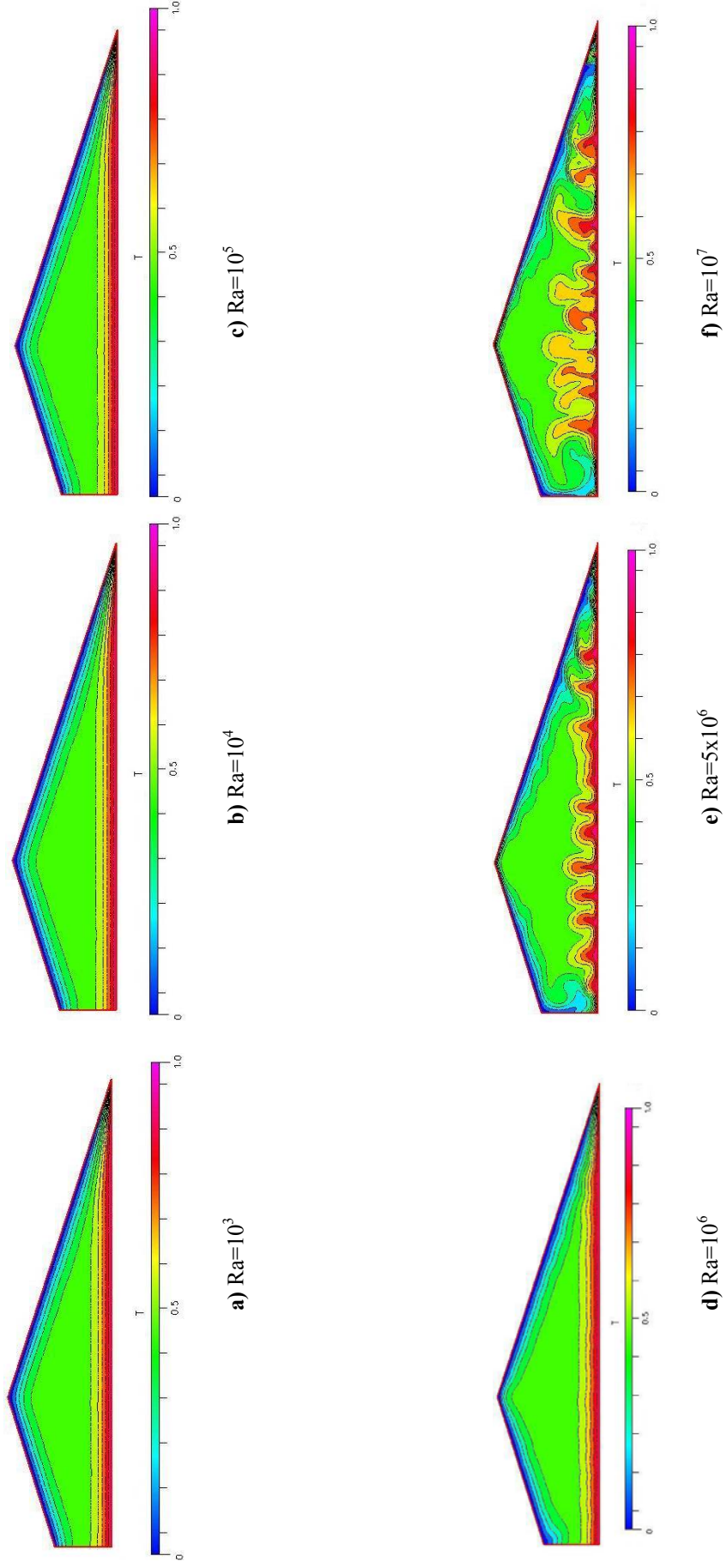
##### Beşik çatı için ısı transferinin incelenmesi

Yaz sezonunda beşik çatı için akım (Şekil 5.2) ve sıcaklık (Şekil 5.10) grafiklerinden de görüldüğü gibi Rayleigh sayısının  $10^6$  değerine kadar konveksiyonun ısı transferine etkisi sabit kalmıştır. Bu değerden itibaren ısı transferinde konveksiyonun etkisi başlar (Şekil 5.18).

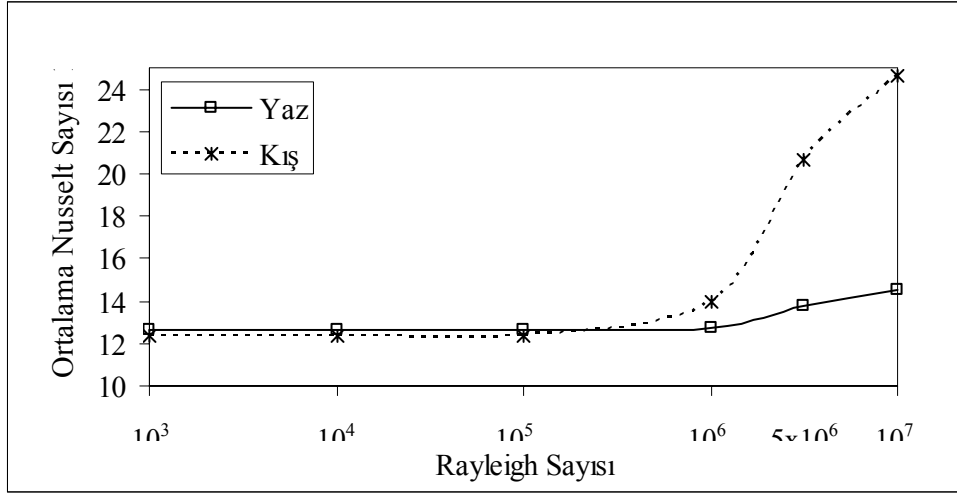
Kış sezonunda ise  $Ra=10^5$  olduktan sonra konveksiyonun ısı transferine etkisi görülmektedir (Şekil 5.18). Yaz sezonuna oranla kış sezonunda Rayleigh sayısının artmasıyla ulaşılan Nusselt sayısı değerleri çok daha yüksektir.



**Şekil 5.16.** FYAB çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Yaz sezonu)



**Şekil 5.17.** FYAB çatı için farklı Rayleigh sayılarında sabit sıcaklık eğrileri (Kış sezonu)

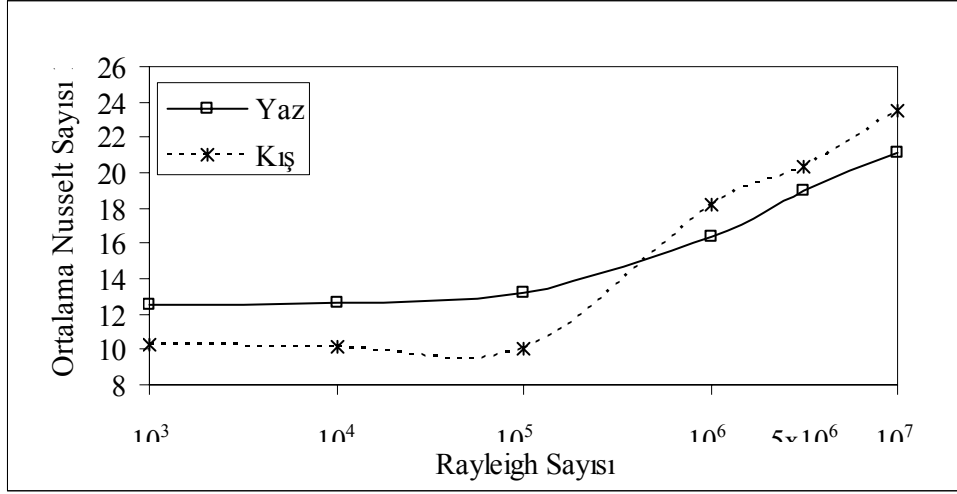


**Şekil 5.18.** Beşik çatıda ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi

#### Mansart çatı için ısı transferinin incelenmesi

Bu çalışmada incelenen dört çatı tipi içerisinde yaz sezonunda Rayleigh sayısının değişiminden en fazla etkilenen çatının Mansart çatı olduğu görülmektedir (Şekil 5.19). Rayleigh sayısı  $10^5$  olduğunda Nusselt sayısı da artmaya başlar. Artış oranı beşik çatıya oranla daha fazladır. Mansart çatının akım (Şekil 5.4) ve sıcaklık (Şekil 5.12) grafiklerine bakıldığında bu değişim görülmemektedir. Bunun sebebi, dört çatı içerisinde en büyük eğime sahip çatı olmasıdır. Çünkü çatı eğimi arttıkça sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki mesafe de arttığından bu iki yüzeyin birbirilerini etkilemeleri daha az olmaktadır. Bu da sabit akım çizgileri ve sabit sıcaklık eğrilerine yansımaktadır.

Kış sezonunda ise  $Ra=10^6$  olduğunda Nusselt sayısında büyük oranda bir artış olur (Şekil 5.19). Daha sonraki Rayleigh değerlerinde Nusselt sayısının artış oranı çok yüksek olmamakla birlikte beşik çatıdakine benzerdir. Hem kış hem de yaz sezonunda beşik çatıdan daha düşük Rayleigh değerinde konveksiyonun ısı transferine etkisi hissedilmeye başlamıştır.



Şekil 5.19. Mansart çatıda ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi

#### Sundurma çatı için ısı transferinin incelenmesi

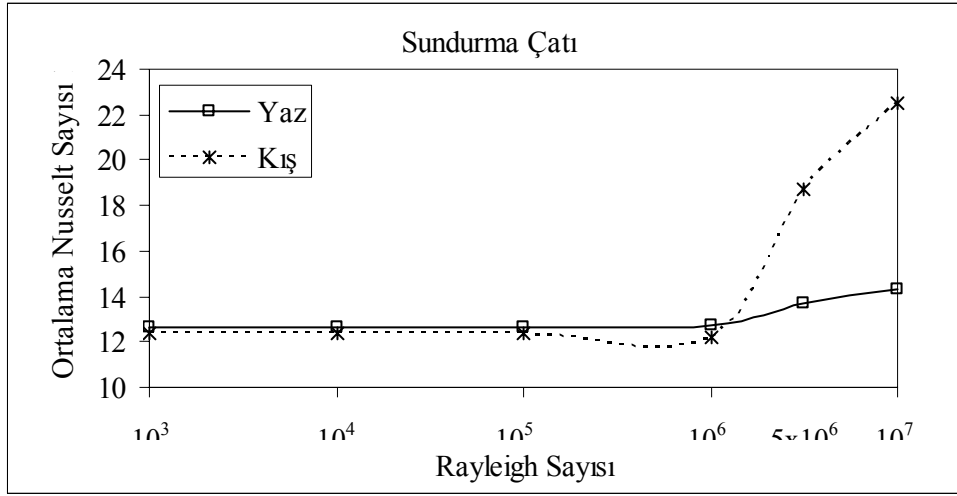
Yaz sezonunda Sundurma çatıda Nusselt sayısının Rayleigh sayısına göre değişimi beşik çatıdakine oldukça benzemektedir (Şekil 5.20). Rayleigh sayısı  $10^6$  olduktan sonra Nusselt sayısı da artmaya başlamaktadır.

Yaz sezonunda olduğu gibi kış sezonunda da Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi beşik çatıdakine benzerdir. Rayleigh sayısının ( $Ra=10^6$ ) değerinden sonra Nusselt sayısı hızlı bir artış göstermektedir (Şekil 5.20). Aynı geometrik oranlara sahip olan bu iki çatı tipinin Rayleigh sayısının değişiminde benzer tepkiler vermesi normaldir.

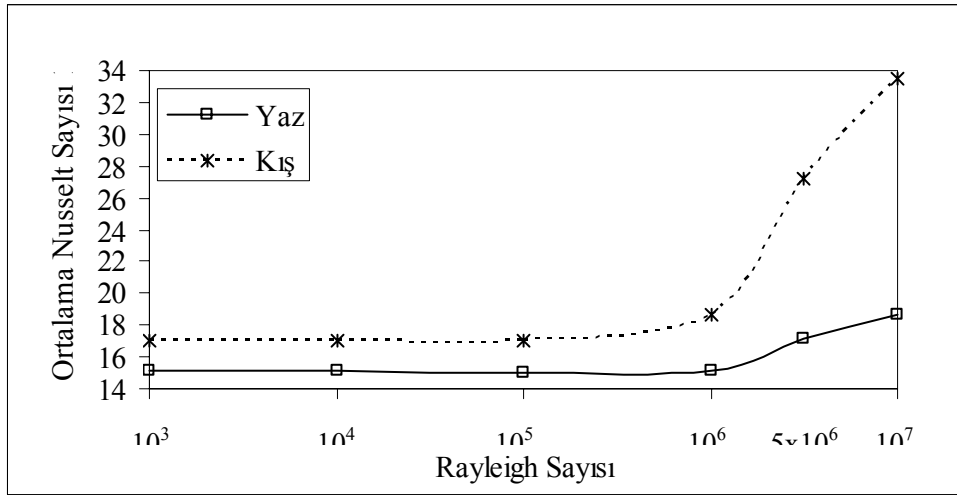
#### Farklı Yüzey Alanlı Beşik çatı için ısı transferinin incelenmesi

Yaz sezonunda Beşik çatı ve Sundurma çatıda olduğu gibi bu çatıda da  $Ra=10^6$  olduktan sonra Nusselt sayısında konveksiyonun ısı transferine etkisi görülmeye başlamıştır (Şekil 5.21).

Kış sezonunda diğer çatılarda olduğu gibi FYAB çatıda Rayleigh sayısının ( $Ra=10^6$ ) değerinden itibaren Nusselt sayısı yükselmeye başlamıştır. İncelenen tüm çatılarda kış ve yaz sezonları dikkate alındığında en yüksek Nusselt sayısına FYAB çatının kış sezonunda ulaşılmıştır. Bunun sebebi en büyük tavan uzunluğunun bu çatıda olmasıdır.



Şekil 5.20. Sundurma çatıda ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi

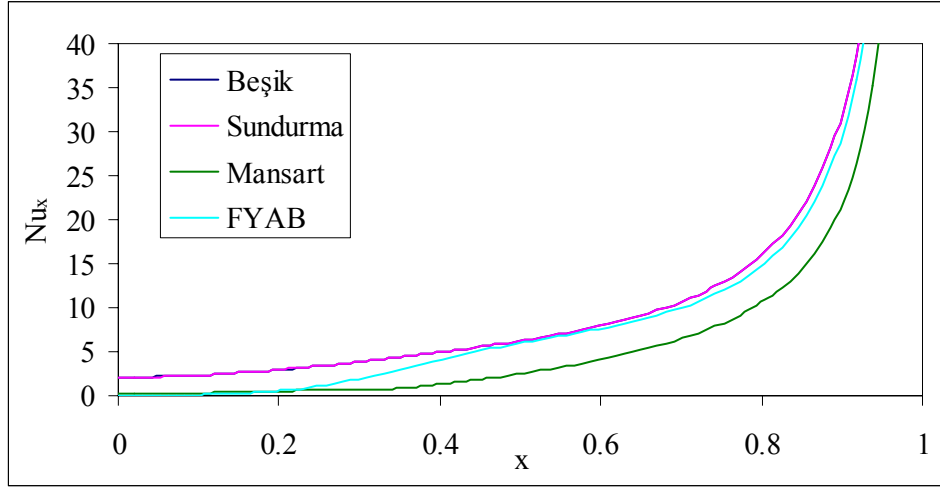


Şekil 5.21. Farklı yüzey alanlı beşik çatıda ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi

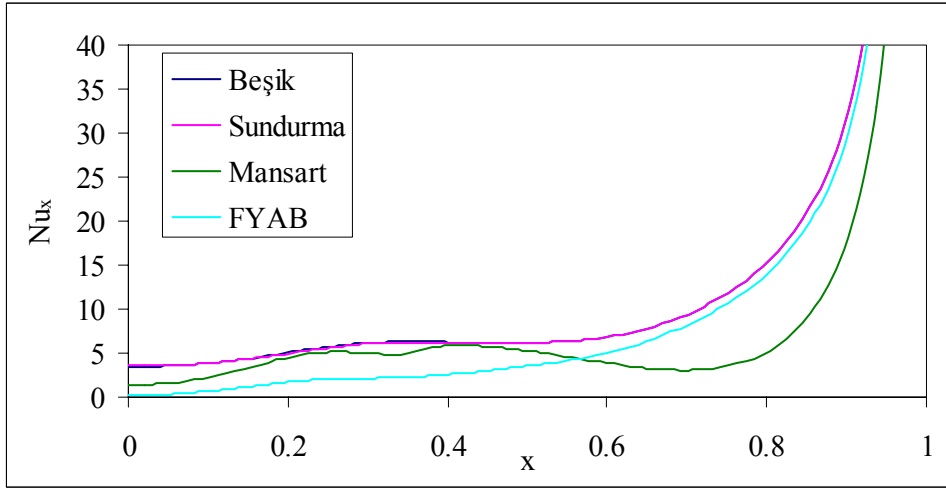
#### Çatılarda yerel Nusselt sayılarının incelenmesi

Yaz sezonunda tüm çatı tiplerinin yerel Nusselt sayılarının tavan yüzeyindeki  $x$  mesafesiyle değişimi Şekil 5.22 ( $Ra=10^3$ ) ve 5.23' de ( $Ra=10^6$ ) verilmiştir.

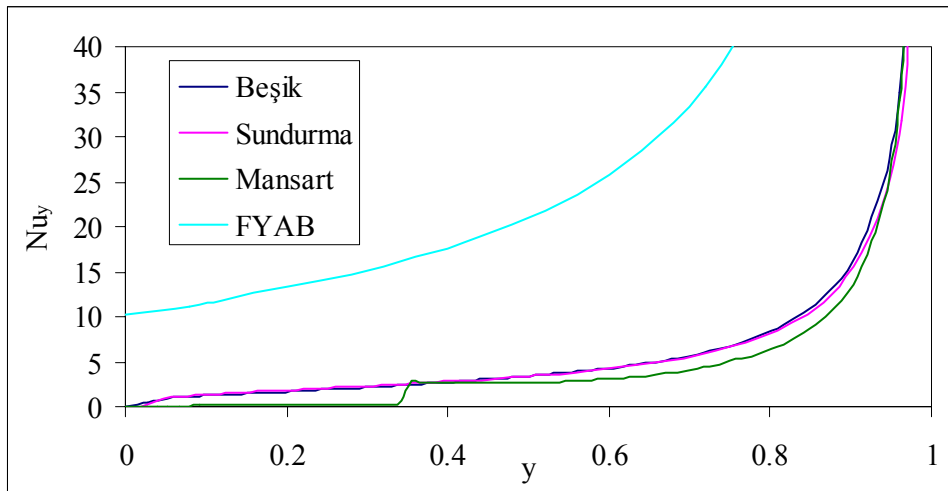
Kış sezonunda tüm çatı tiplerinin yerel Nusselt sayılarının çatı yüzeyindeki  $y$  mesafesiyle değişimi Şekil 5.24 ( $Ra=10^3$ ) ve 5.25' de ( $Ra=10^6$ ) verilmiştir.



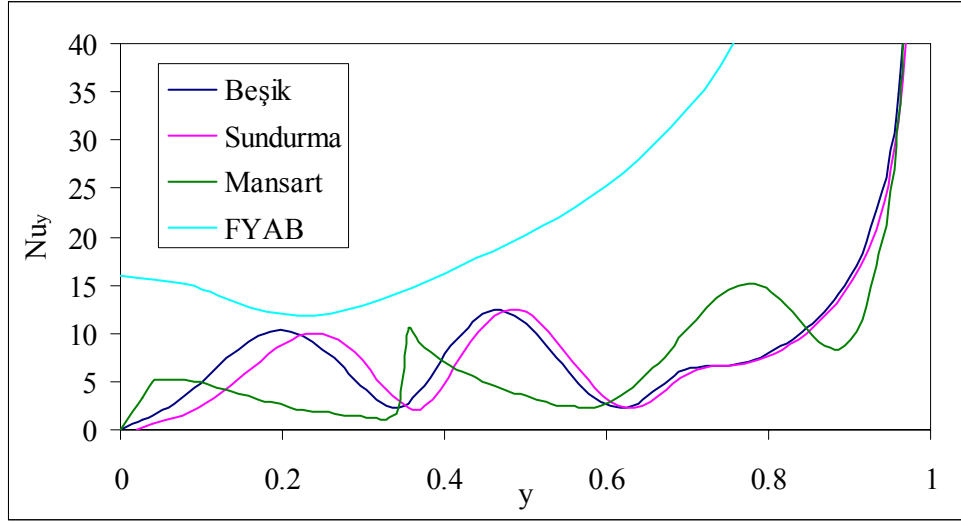
Şekil 5.22.  $Ra=10^3$  için yaz sezonunda yerel Nusselt sayılarının tavan yüzeyindeki  $x$  mesafesiyle değişimi



Şekil 5.23.  $Ra=10^6$  için yaz sezonunda yerel Nusselt sayılarının tavan yüzeyindeki  $x$  mesafesiyle değişimi



Şekil 5.24.  $Ra=10^3$  için kış sezonunda yerel Nusselt sayılarının çatı yüzeyindeki  $y$  mesafesiyle değişimi

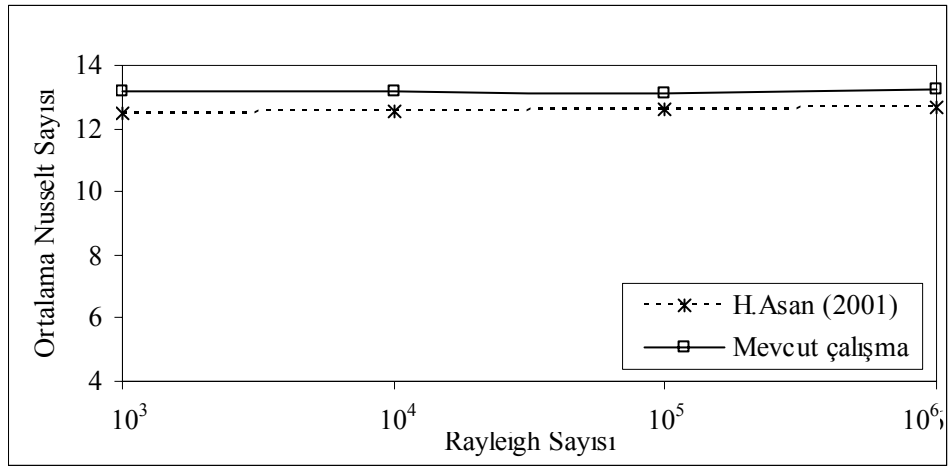


Şekil 5.25.  $Ra=10^6$  için kış sezonunda yerel Nusselt sayılarının çatı yüzeyindeki y mesafesiyle değişimi

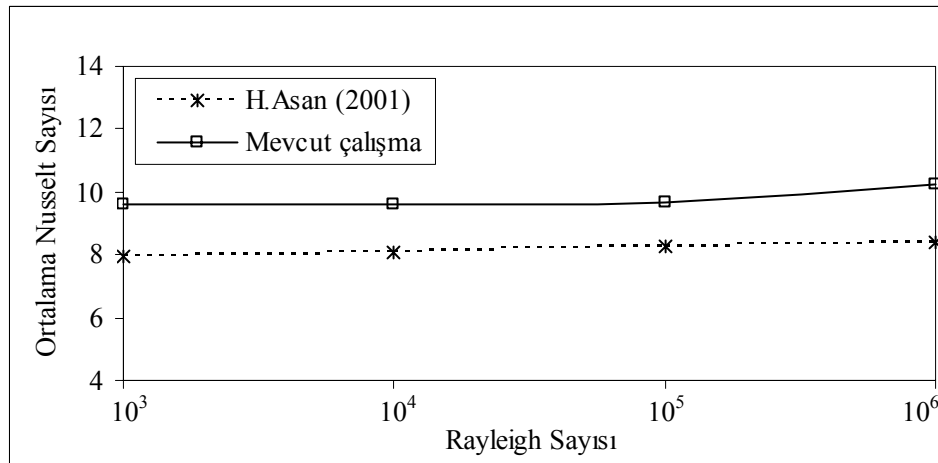
### 5.5. Sonuçların Literatür İle Karşılaştırılması

Mevcut çalışmada elde edilen sayısal sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırmak gerekir. Literatüre bakıldığında bu çalışmaya benzer sadece iki çalışmaya rastlanmıştır. H.Asan ve L.Namlı beşik çatılarda ısı transferi ve akışkan hareketini kontrol hacim yöntemiyle sayısal olarak çözmüşlerdir. Araştırmacılar bu tip bir çatının ısı transferi ve akışkan hareketini yaz ve kış sezonunda olmak üzere iki farklı çalışmada incelemişlerdir [98,99]. Çalışmalarında çatı boyutlarının ve Rayleigh sayısının ısı transferine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmalarda Rayleigh sayısının  $10^3$ - $10^6$  aralığı ve çatının boy-en oranının 5 farklı değeri (0.25, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0) için sayısal çözümlemeler tekrarlanmıştır. Grid sayısı olarak 51x51, yakınsama kriteri olarak da  $10^{-4}$  almışlardır. Ayrıca araştırmacılar yaz sezonunda boy-en oranının 0.25, Rayleigh sayısının 2772 olduğu durumda alt yüzeydeki yerel Nusselt sayısının x mesafesiyle değişimini hesaplamışlardır. Bir kıyaslama yapabilmek için ilgili çalışmalardaki değerlerin aynısını kullanarak beşik çatı için hazırladığımız Fortran programı ile yeni sonuçlar elde edilmiştir. Böylece kullanılan sayısal çözüm yöntemi farklı olmak koşuluyla, H.Asan ve L.Namlı'ninkine benzer bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ortalama Nusselt sayıları için elde ettiğimiz sonuçların H.Asan ve L.Namlı'nın sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 5.26 (yaz sezonu) ve 5.27'de (kış sezonu), yerel Nusselt sayıları için elde ettiğimiz sonuçların karşılaştırılması ise Şekil 5.28'de verilmiştir. Şekil 5.26 ve 5.27'de de görüleceği gibi tüm boy-en oranları için yaz ve kış sezonlarında Rayleigh sayısı ile ortalama Nusselt sayısının değişimi grafiksel olarak ifade edilmiştir. Şekil 5.28'de ise yaz sezonunda yerel Nusselt sayısının çatının alt yüzeyindeki x mesafesiyle değişimi

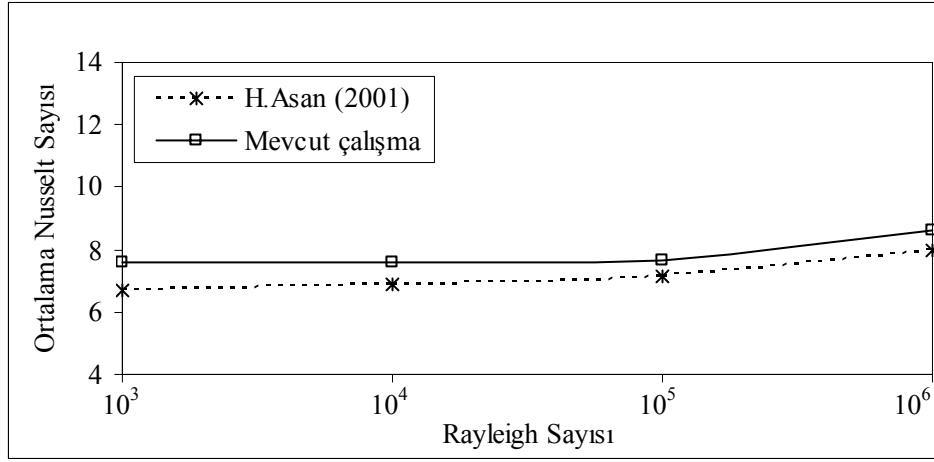
gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi mevcut çalışmadaki sonuçlarla literatürdeki sonuçlar birbirlerine çok yakındır. Ortalama Nusselt sayısının değişimi için hem yaz (Şekil 5.26) hem de kış (Şekil 5.27) sezonuna bakıldığında mevcut çalışmada elde edilen sonuçlarla literatürdeki sonuçların büyük oranda örtüştüğü görülmektedir. Mevcut çalışma ile literatürdeki çalışmanın sonuçları arasında yaz sezonunda ortalama %9, kış sezonunda ortalama %7'lik bir fark vardır. Bu farkın da sebebi kullanılan sayısal yöntemlerin aynı olmamasıdır. Zira H.Asan ve L.Namlı kontrol hacim yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada ise sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca araştırmacıların sayısal çözümde kullandıkları relaksasyon faktörleri ve iterasyon sayıları gibi sonucu direkt etkileyen parametrelerin değerleri ilgili literatürde belirtilmemiştir. Tüm bunlar göz önüne alındığında literatür ile bu çalışmanın sonuçlarının uyumlu olduğu söylenebilir. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan sayısal yöntem ve matematiksel formülasyon ile bilgisayar programı yüksek doğrulukta sonuçlar vermiştir.



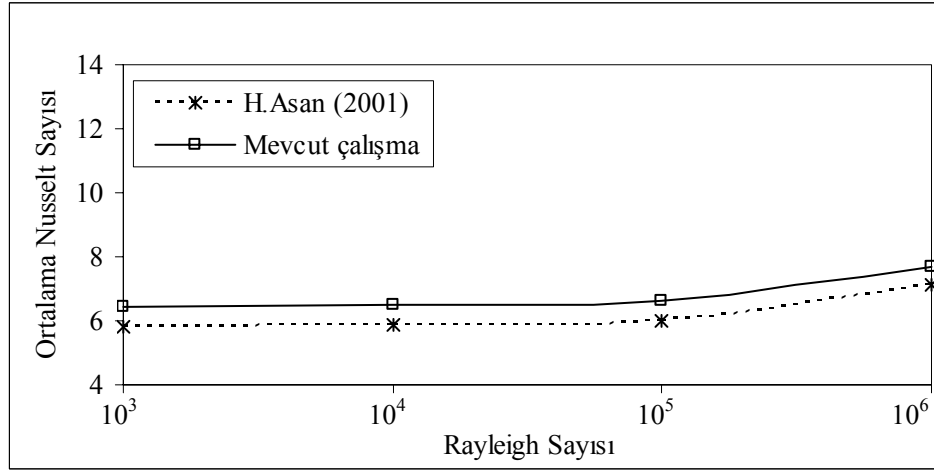
a) Oran 0.25



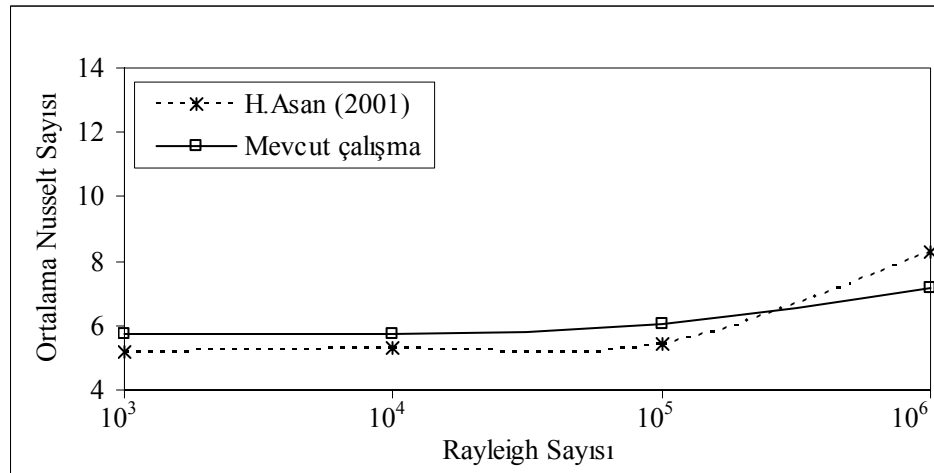
b) Oran 0.4



c) Oran 0.6

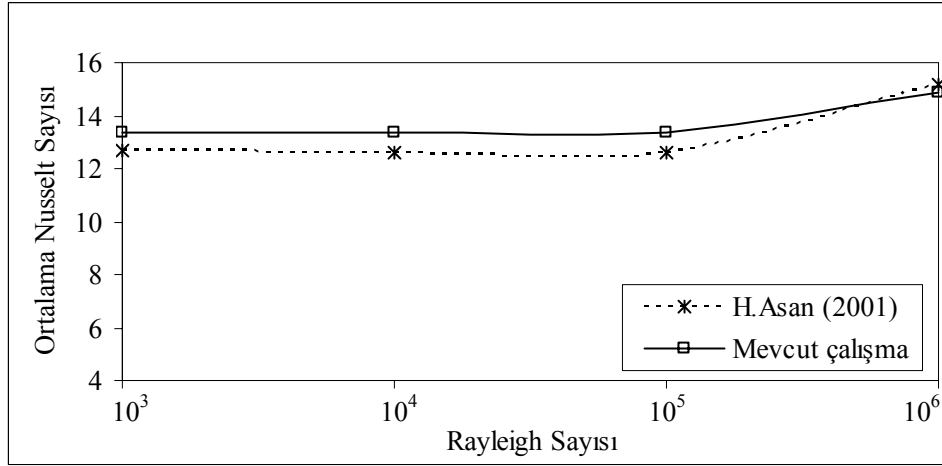


d) Oran 0.8

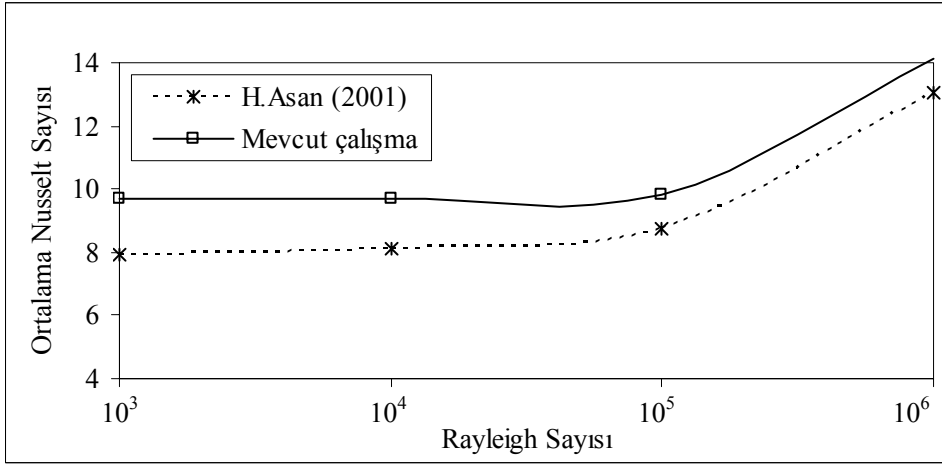


e) Oran 1.0

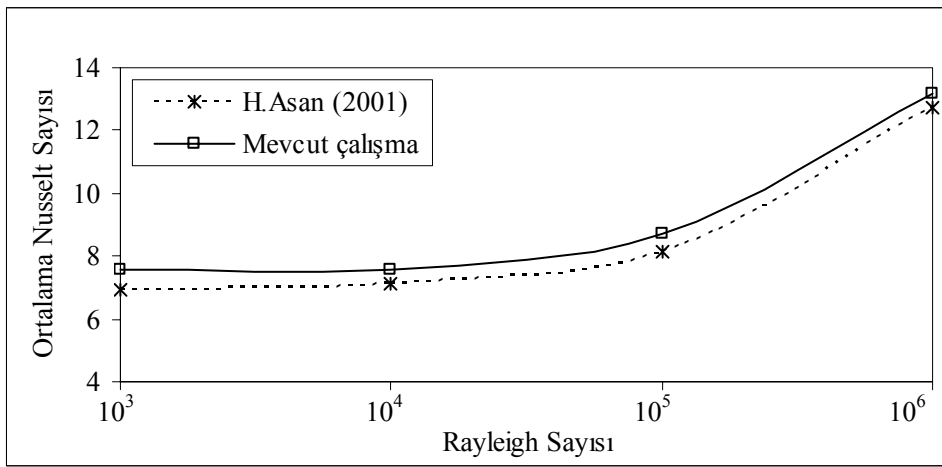
Şekil 5.26. Beşik çatı için yaz sezonunda farklı geometrik oranlarda ortalama Nusselt sayısı ile Rayleigh sayısının değişimi



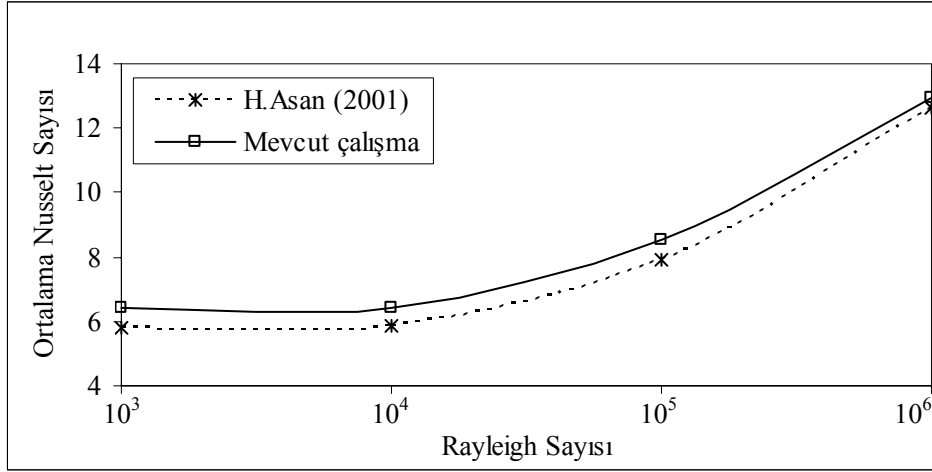
a) Oran 0.25



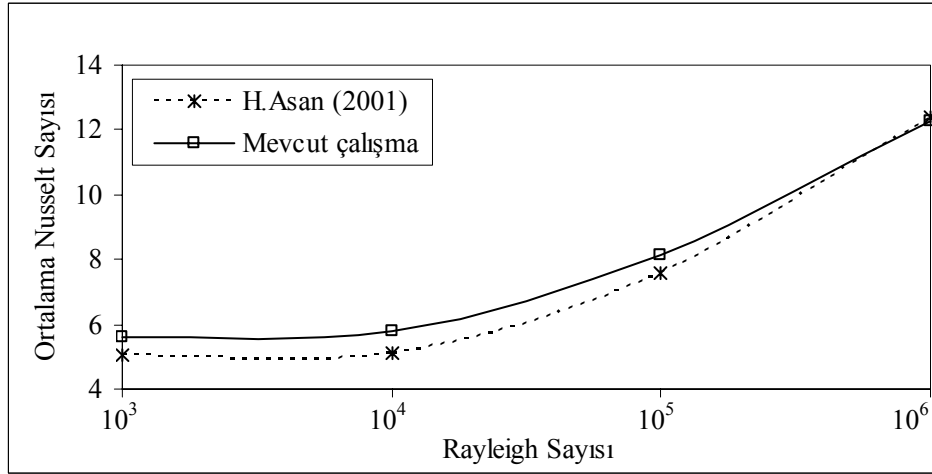
b) Oran 0.4



c) Oran 0.6

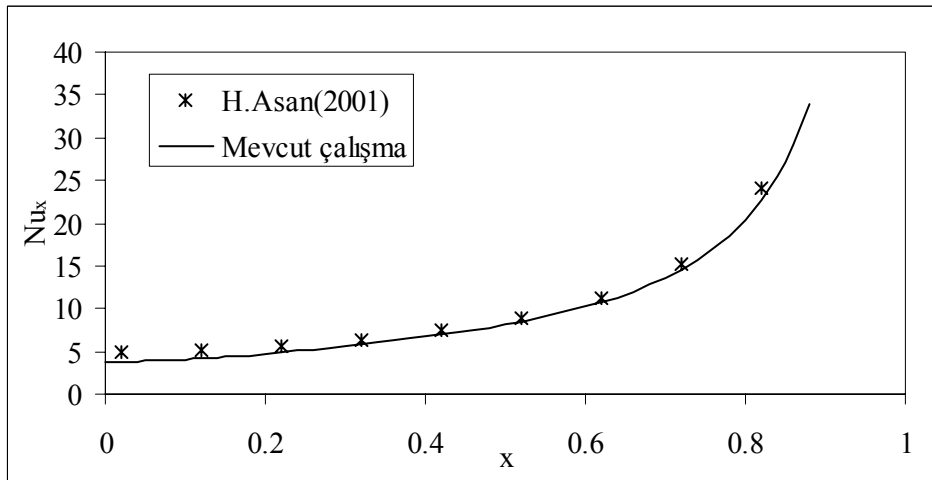


d) Oran 0.8



e) Oran 1.0

Şekil 5.27. Beşik çatı için kış sezonunda farklı geometrik oranlarda ortalama Nusselt sayısı ile Rayleigh sayısının değişimi



Şekil 5.28. Beşik çatının yaz sezonunda  $Ra=2772$  ve  $bo-y-en=0.25$  için alt yüzeydeki yerel Nusselt sayısının  $x$  mesafesiyle değişimi

## 6. BULGULAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı çatı tiplerinde (beşik, mansart, sundurma ve farklı yüzey alanlı beşik çatı) akışkan hareketi ve ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çözüm için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Çatılar, kapalı hacim gibi düşünülerek laminar doğal konveksiyonla ısı transferi sürekli rejimde iki boyutlu olarak incelenmiştir. Problem Bousinesq yaklaşımı ve akım-girdap formülasyonu ile matematiksel olarak ifade edilmiştir. Her çatı tipi için Fortran dilinde hazırlanan bilgisayar programı ile diferansiyel denklemlerin çözümü yapılmıştır. Yaz ve kış sezonunda farklı Rayleigh sayılarının çatı tiplerine etkilerini incelemek için sabit akım eğrileri, sabit sıcaklık çizgileri ve Nusselt sayıları elde edilmiştir. Çalışmada incelenen çatı tipleri; beşik, mansart, sundurma ve farklı yüzey alanlı beşik çatıdır. Sayısal işlemler Rayleigh sayısının  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $5 \times 10^6$  ve  $10^7$  değerleri için yaz ve kış sezonlarında ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Yapılan çalışma neticesinde aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Tüm çatı tiplerinde kış sezonunda akış ve sıcaklık alanlarının Rayleigh sayısından daha fazla etkilendiği görülmüştür.
- Her iki sezon (yaz ve kış) birlikte düşünüldüğünde, Rayleigh sayısının değişiminden akışkan hareketinin en az etkilendiği çatı tipi mansart çatıdır. Ayrıca kış sezonunda maksimum Rayleigh sayısında ( $Ra=10^7$ ) akış alanında girdapların oluşmadığı tek çatı tipi de yine mansart çatıdır.
- Benzer geometrik şekil ve orana sahip beşik ve sundurma çatıda sınır şartlarının farklı olmasının (beşik çatıda simetri, sundurma çatıda yalıtım sınır şartı) akım ve sıcaklık alanlarını oldukça etkilediği görülmüştür. Ancak her iki sezon için de çatılarda ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi benzerdir.
- Tüm çatılarda yaz sezonuna oranla kış sezonunda daha fazla ısı transferi miktarlarına rastlanmıştır.
- Düşük ve yüksek Rayleigh sayılarında ve farklı sezonlarda çatı tiplerine göre ortalama Nusselt sayısının değişimlerine bakıldığında;
  - a) Yaz sezonunda düşük Rayleigh sayılarında ( $Ra \leq 10^5$ ) minimum konveksiyonla ısı transferi beşik ve sundurma çatıda, maksimum konveksiyonla ısı transferi farklı yüzey alanlı beşik çatıda görülmüştür,

- b) Yaz sezonunda yüksek Rayleigh sayılarında ( $Ra \geq 10^6$ ) minimum konveksiyonla ısı transferi beşik ve sundurma çatıda, maksimum konveksiyonla ısı transferi mansart çatıda görülmüştür,
- c) Kış sezonunda düşük Rayleigh sayılarında ( $Ra \leq 10^5$ ) minimum konveksiyonla ısı transferi mansart çatıda, maksimum konveksiyonla ısı transferi farklı yüzey alanlı beşik çatıda görülmüştür,
- d) Kış sezonunda yüksek Rayleigh sayılarında ( $Ra \geq 10^6$ ) minimum konveksiyonla ısı transferi sundurma çatıda, maksimum konveksiyonla ısı transferi farklı yüzey alanlı beşik çatıda görülmüştür.

Yukarıdaki değerlendirmeler ışığında;

- Her iki sezona bakıldığında sıcaklık farkının az olduğu düşük Rayleigh sayılarında en yüksek konveksiyonla ısı transferi değerlerine farklı yüzey alanlı beşik çatıda rastlanmıştır. Ayrıca kış sezonunda sıcaklık farkının fazla olduğu yüksek Rayleigh sayılarında da en yüksek konveksiyonla ısı transferi yine bu çatıda görülmüştür. Bunun sebebi farklı yüzey alanlı beşik çatının eğimli olan yüzeyinin diğer çatılara göre daha uzun olmasıdır.
- Kış sezonunda sıcaklık farkının az olduğu düşük Rayleigh sayılarında konveksiyonla ısı transferinin en düşük değerine mansart çatıda rastlanmıştır.
- Her iki sezon da düşünüldüğünde sıcaklık farkının fazla olduğu yüksek Rayleigh sayılarında konveksiyonla ısı transferinin en düşük değerine sundurma çatıda rastlanmıştır.
- Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında Elazığ ve benzer iklime sahip bölgeler için ısı transferi açısından en uygun çatı tipi sıcaklık farkının az olduğu durumlarda “Mansart Çatı”, sıcaklık farkının fazla olduğu durumlarda “Sundurma Çatı”dır. Sıcaklık farkının da binanın yalıtımı ile ilgili olduğu düşünülürse Elazığ bölgesindeki yalıtımı iyi olan binalarda “Mansart Çatı”nın, yalıtımı iyi olmayan binalarda “Sundurma Çatı”nın kullanılmasının ısı transferi açısından uygun olduğu söylenebilir.

Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgulara bakıldığında bu alanda gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik aşağıdaki öneriler getirilebilir:

- Bu çalışma farklı çatı tipleri ve bu çatıların farklı geometrik oranları için tekrarlanabilir.
- Bu çalışmada akışın laminar olduğu kabul edilerek sayısal çözüm yapılmıştır. Ancak özellikle yüksek Rayleigh sayılarında bazı çatı tiplerinde akış türbülansa geçmiştir. Bu nedenle hem laminar hem de türbülanslı akışın birlikte düşünüldüğü çalışmalar yapılabilir.
- Bu çalışma soğuk çatılar için yapılmıştır. Dolayısıyla çatı içerisi kapalı hacim olarak kabul edilmiştir. Benzer çalışmalar sıcak çatılar için yapılarak dış ortam sıcaklığı ve rüzgarın etkisi de incelenebilir.
- Bu dört çatı için konveksiyonla ısı transferi açısından en uygun boyutsal değerlerin araştırıldığı bir başka çalışma yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Erengözgin, Ç., 2003, *Enerji Yaşamın Çekirdeği*. İnterteks İnşaat 2003 Fuarı, İstanbul.
- [2] [www.eie.gov.tr](http://www.eie.gov.tr)
- [3] Ekinci, C.E., 2002, *Yapı ve Tasarımcının İnşaat El Kitabı*. Üniversite Kitabevi, Elazığ, 993s.
- [4] Taymaz, H., 1978, *Yapı Bilgisi Cilt 2*. Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, 190s.
- [5] Özcan, K., 2000, *Yapı*. Bilim Yayınları, Ankara, 345s.
- [6] TSE 825, 1998, *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 79s.
- [7] Radziemska, E., Lewandowski, W.M., 2001, Heat transfer by natural convection from an isothermal downward-facing round plate in unlimited space, *Applied Energy*, 68, 347-366.
- [8] Dayan, A., Kushnir, R., Ullmann, A., 2002, Laminar free convection underneath a hot horizontal infinite flat strip, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 4021-4031.
- [9] Kwak, C.E., Song, T.H., 2000, Natural convection around horizontal downward-facing plate with rectangular grooves: experiments and numerical simulations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 825-838.
- [10] Sripada, R.K.L., Angirasa, D., 2001, Simultaneous heat and mass transfer by natural convection above upward facing horizontal surfaces, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 36, 1019-1029.
- [11] Pretot, S., Zeghmami, B., Le Palee, G., 2000, Theoretical and experimental study of natural convection on a horizontal plate, *Applied Thermal Engineering*, 20, 873-891.
- [12] Lin, M.-H., 2001, Numerical study of formation of longitudinal vortices in natural convection flow over horizontal and inclined surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 1759-1766.
- [13] El Alami, M., Najam, M., Semma, E., Oubarra, A., Penot, F., 2005, Electronic components cooling by natural convection in horizontal channel with slots, *Energy and Conversion and Management*, 46, 2765-2772.
- [14] Kwak, C.E., Song, T.H., 1998, Experimental and numerical study on natural convection from vertical plates with horizontal rectangular grooves, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41, No.16, 2517-2528.
- [15] Özek, M., 1998, Yatay levha üzerine yerleştirilmiş dikdörtgen kesitli kanatçık dizilerinden doğal konveksiyon ile ısı transferinin sayısal analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 122s.
- [16] Kanlı, H., 2000, Yatay iki paralel levha arasındaki doğal konveksiyon ile ısı transferinin sayısal olarak incelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 164s.

- [17] Krishnan, A.S., Premachandran, B., Balaji, C., Venkateshan, S.P., 2004, Combined experimental and numerical approaches to multi-mode heat transfer between vertical parallel plates, *Thermal and Fluid Science*, 29, 75-86.
- [18] Morrone, B., Campo, A., Manca, O., 1997, Optimum plate separation in vertical parallel-plate channels for natural convective flows: incorporation of large spaces at the channel extremes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, No.5, 993-1000.
- [19] Desrayaud, G., Fichere, A., 2002, Laminar natural convection in a vertical isothermal channel with symmetric surface-mounted rectangular ribs, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23, 519-529.
- [20] Giri, A., Narasimham, G.S.V.L., Krishna Murthy, M.V., 2003, Combined natural convection heat and mass transfer from vertical fin arrays, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24, 100-113.
- [21] Çakmanus, İ., 2000, Duvarlarından birisinde ısıtıcı bloklar bulunan kanallarda akış ve ısı transferinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 286s.
- [22] Sadeghipour, M.S., Razi, Y.P., 2001, Natural convection from a confined horizontal cylinder: the optimum distance between the confining walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 367-374.
- [23] Konka, W.T., 2000, Natural convection heat transfer around horizontal tube in vertical slot, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 447-455.
- [24] Yang, H.X., Zhu, Z.J., 2003, Numerical study on transient laminar natural convection in an inclined parallel-walled channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 30, No.3, 359-367.
- [25] Gao, W., Lin, W., Lu, E., 2000, Numerical study on natural convection inside the channel between the flat-plate cover and sine-wave absorber of a cross-corrugated solar air heater, *Energy Conversion & Management*, 41, 141-151.
- [26] Lee, K.-T., 1999, Natural convection heat and mass transfer in partially heated vertical parallel plates, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 4417-4425.
- [27] Demiralay, Ş., 2000, Bir duvarı üzerinde ısıtıcı elemanlar bulunan eğik bir kanaldaki akışkan akışının ve ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 114s.
- [28] Sahoo, R.K., Sastri, V.M.K., 1997, Numerical investigation of free convective flow in divergent channels, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 146, 31-41.
- [29] Kaiser, A.S., Zamora, B., Viedma, A., 2004, Correlation for Nusselt number in natural convection in vertical convergent channels at uniform wall temperature by a numerical

investigation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25, 671-682.

[30] Abu-Hijleh, B.A/K., Abu-Qudais, M., Abu Nada, E., 1999, Numerical prediction of entropy generation due to natural convection from a horizontal cylinder, *Energy*, 24, 327-333.

[31] Chouikh, R., Guizani, A., Maalej, M., Belghith, A., 1998, Numerical study of the laminar natural convection flow around horizontal isothermal cylinder, *Renewable Energy*, 13, No.1, 77-88.

[32] Chouikh, R., Guizani, A., Maalej, M., 1999, Numerical study of the laminar natural convection flow around an array of two horizontal isothermal cylinders, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 26, No.3, 329-338.

[33] Wu, H.W., Tsai, W.C., Chou, H.-M., 2004, Transient natural convection heat transfer of fluids with variable viscosity between concentric and vertically eccentric spheres, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 1685-1700.

[34] He, Y.L., Tao, W.Q., Qu, Z.G., Chen, Z.Q., 2004, Steady natural convection in a vertical cylindrical envelope with adiabatic lateral wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 3131-3144.

[35] Lin, W., Armfield, S.W., 2001, Natural convection cooling of rectangular and cylindrical containers, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 22, 72-81.

[36] Silva, A.K., Gosselin, L., 2005, On the thermal performance of an internally finned three-dimensional cubic enclosure in natural convection, *International Journal of Thermal Sciences*, 44, 540-546.

[37] Takahashi, K., Morikawa, T., Harada, Y., Hattori, N., 2001, Natural convective heat transfer in uniformly heated vertical pipe annuli, *Heat Transfer – Asian Research*, 30, No.8, 676-688.

[38] Scanlon, T.J., Stickland, M.T., 2001, An experimental and numerical investigation of natural convection melting, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 28, No.2, 181-190.

[39] Laouadi, A., Atif, M.R., 2001, Natural convection heat transfer within multi-layer domes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 1973-1981.

[40] Shu, C., Zhu, Y.D., 2002, Efficient computation of natural convection in a concentric annulus between an outer square cylinder and an inner circular cylinder, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 38, 429-445.

[41] Hirose, K., Hachinohe, T., Ishii, Y., 2001, Natural convection heat transfer in eccentric horizontal annuli between a heated outer tube and a cooled inner tube with different orientation: the case of an elliptic outer tube, *Heat Transfer – Asian Research*, 30, No.8, 624-635.

[42] Kumar, R., 1997, Three-Dimensional natural convective flow in a vertical annulus with

longitudinal fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, No.14, 3323-3334.

[43] Farinas, M.-I., Garon, A., Saint-Louis, K., 1997, Study of heat transfer in a horizontal cylinder with fins, *Revue Generale de Thermique*, 36, 398-410.

[44] Aydin, O., Ünal, A., Ayhan, T., 1999, Natural convection in rectangular enclosures heated from one side and cooled from the ceiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 2345-2355.

[45] Aktas, M.K., Farouk, B., 2003, Numerical simulation of developing natural convection in an enclosure due to rapid heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 2253-2261.

[46] Kwak, H.S., Kuwahara, K., Hyun, J.M., 1998, Resonant enhancement of natural convection heat transfer in a square enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41, 2837-2846.

[47] Frederic, R.L., 1999, On the aspect ratio for which the heat transfer in differentially heated cavities is maximum, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 26, No.4, 549-558.

[48] Piazza, I.D., Ciofalo, M., 2000, Low-Prandtl number natural convection in volumetrically heated rectangular enclosures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 3027-3051.

[49] Arcidiacono, S., Piazza, I.D., Ciofalo, M., 2001, Low-Prandtl number natural convection in volumetrically heated rectangular enclosures II. Square cavity,  $AR=1$ , *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 537-550.

[50] Arcidiacono, S., Ciofalo, M., 2001, Low-Prandtl number natural convection in volumetrically heated rectangular enclosures III. Shallow cavity,  $AR=0.25$ , *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 3053-3065.

[51] Lee, J.R., Ha, M.Y., 2005, A numerical study of natural convection in a horizontal enclosure with a conducting body, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 3308-3318.

[52] Sundaravadevelu, K., Kandaswamy, P., 2000, Double diffusive nonlinear convection in a square cavity, *Fluid Dynamics Research*, 27, 291-303.

[53] Moshkin, N.P., 2002, Numerical model to study natural convection in a rectangular enclosure filled with two immiscible fluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23, 373-379.

[54] Costa, V.A.F., 2002, Laminar natural convection in differentially heated rectangular enclosures with vertical diffusive walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 4217-4225.

[55] Manz, H., 2003, Numerical simulation of heat transfer by natural convection in cavities of

facade elements, *Energy and Buildings*, 35, 305-311.

[56] Yilbas, B.S., Shuja, S.Z., Gbadebo, S.A., Abu Al-Hamayel, H.I., Boran, K., 1998, Natural convection and entropy generation in a square cavity, *International Journal of Energy Research*, 22, 1275-1290.

[57] Shen, L.-J., Lin, J.-D., Chen, J.-R., 1999, Numerical analysis on the hot spot in reactive chemical storage, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, 125-136.

[58] Sarris, I.E., Lekakis, I., Vlachos, N.S., 2004, natural convection in rectangular tanks heated locally from below, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 3549-3563.

[59] Dubovsky, V., Ziskind, G., Druckman, S., Moshka, E., Weiss, Y., Letan, R., 2001, Natural convection inside ventilated enclosure heated by downward-facing plate: experiments and numerical simulations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 3155-3168.

[60] Ishihara, I., Fukui, T., Matsumoto, R., 2002, Natural convection in a vertical rectangular enclosure with symmetrically localized heating and cooling zones, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23, 366-372.

[61] Soong, C.Y., Tzeng, P.Y., Hsieh, C.D., 2001, Numerical study of bottom-wall temperature modulation effects on thermal instability and oscillatory cellular convection in a rectangular enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 3855-3868.

[62] Raos, M., 2001, Numerical investigation of laminar natural convection in inclined square enclosures, *Physics, Chemistry and Technology*, 2, No.3, 149-157.

[63] Raos, M., Zivkovic, L., 2002, Nusselt number dependence on inclination of paralelogramic enclosure under natural convection conditions, *Working and Living Environmental Protection*, 2, No.2, 135-142.

[64] Eroğlu, M., 1999, Eğimli kapalı hacimler içinde doğal taşınım ısı transferi ve akışkan hareketinin sayısal incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 91s.

[65] Deng, Q.-H., Tang, G.-F., Li, Y., 2002, A combined temperature scale for analyzing natural convection in rectangular enclosures with discrete wall heat sources, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3437-3446.

[66] El-Refae, M.M., Elsayed, M.M., Al-Najem, N.M., Noor, A.A., 1998, Natural convection in partially cooled tilted cavities, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 28, 478-499.

[67] Küçük, A.M.İ., 1998, Duvarlarında kanatçıklar bulunan kapalı hacimlerde laminar doğal konveksiyon ısı transferinin sayısal analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 101s.

[68] Onbaşıoğlu, S.U., Onbaşıoğlu, H., 2004, On enhancement of heat transfer with ribs,

Applied Thermal Engineering, 24, 43-57.

- [69] Shi, X., Khodadadi, J.M., 2003, Laminar natural convection heat transfer in a differentially heated square cavity due to a thin fin on the hot wall, Transactions of the ASME, 125, 624-634.
- [70] Bilgin, E., 2002, Natural convection in enclosures with partial partitions, Renewable Energy, 26, 257-270.
- [71] Costa, V.A.F., Oliveira, M.S.A., Sousa, A.C.M., 2003, Control of laminar natural convection in differentially heated square enclosures using solid inserts at the corners, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 3529-3537.
- [72] Asan, H., 2000, Natural convection in an annulus between two isothermal concentric square ducts, International Communications in Heat and Mass Transfer, 27, No.3, 367-376.
- [73] Funawatashi, Y., Suzuki, T., 2001, Natural convection heat transfer between concentric rectangular parallelepipeds, Heat Transfer – Asian Research, 30, No.2, 152-163.
- [74] Deng, Q.-H., Tang, G.-F., 2002, Numerical visualization of mass and heat transport for conjugate natural convection/heat conduction by streamline and heatline, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45, 2373-2385.
- [75] Liu, J.P., Tao, W.Q., 1996, Numerical analysis of natural convection around a vertical channel in a rectangular enclosure, Heat and Mass Transfer, 31, 313-321.
- [76] Barozzi, G.S., Corticelli, M.A., 2000, Natural convection in cavities containing internal sources, Heat and Mass Transfer, 36, 473-480.
- [77] Cesini, G., Paroncini, M., Cortella, G., Manzan, M., 1999, Natural convection from a horizontal cylindrical in a rectangular cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, 1801-1811.
- [78] Shu, C., Xue, H., Zhu, Y.D., 2001, Numerical study of natural convection in an eccentric annulus between a square outer cylindrical and a circular inner cylinder using DQ method, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 3321-3333.
- [79] Dong, S.-F., Li, Y.-T., 2004, Conjugate of natural convection and conduction in a complicated enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, 2233-2239.
- [80] Elsayed, M.M., Al-Najem, 1999, N.M., El-Refaee, M.M., Noor, A.A., Numerical study of natural convection in fully open tilted cavities, Heat Transfer Engineering, 20, No.3, 73-85.
- [81] Sezai, I., Mohamad, A.A., 2000, Natural convection from a discrete heat source on the bottom of a horizontal enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, 2257-2266.
- [82] Tric, E., Labrosse, G., Betrouni, M., 2000, A first incursion into the 3D structure of natural convection of air in a differentially heated cubic cavity, from accurate numerical solutions, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, 4043-4056.

- [83] Colomer, G., Costa, M., Consul, R., Oliva, A., 2004, Three-dimensional numerical simulation of convective and radiation in a differentially heated cavity using the discrete ordinates method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 257-269.
- [84] Wakitani, S., 2001, Numerical study of three-dimensional oscillatory natural convection at low Prandtl number in rectangular enclosures, *Journal of Heat Transfer*, 123, 77-83.
- [85] Tou, S.K.W., Tso, C.P., Zhang, X., 1999, 3-D numerical analysis of natural convective liquid cooling of a 3\*3 heater array in rectangular enclosures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 3231-3244.
- [86] Yu, E., Joshi, Y., 1997, A numerical study of three-dimensional laminar natural convection in a vented enclosure, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 18, 600-612.
- [87] Sigey, J.K., Gatheri, F.K., Kinyanjui, M., 2004, Numerical study of free convection turbulent heat transfer in an enclosure, *Energy Conversion & Management*, 45, 2571-2582.
- [88] Adjlout, L., Imine, O., Azzi, A., Belkadi, M., 2002, Laminar natural convection in an inclined cavity with a wavy wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 2141-2152.
- [89] Mahmud, S., Das, P.K., Hyder, N., Islam, A.K.M.S., 2002, Free convection in an enclosure with vertical wavy walls, *International Journal of Thermal Sciences*, 41, 440-446.
- [90] Kim, E., 1997, Natural convection along a wavy vertical plate to non-Newtonian fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, No.13, 3069-3078.
- [91] Van Der Eyden, J.T., Van Der Meer, Th.H., Hanjalic, K., Biezen, E., Bruining, J., 1998, Double-diffusive natural convection in trapezoidal enclosures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41, No.13, 1885-1898.
- [92] Farinas M.-I., Garon, A., St-Louis, K., Lacroix, M., 1999, Study of heat transfer in horizontal bare and finned annuli, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 3905-3917.
- [93] Chang, T.S., Tsay, Y.L., 2001, Natural convection heat transfer in an enclosure with a heated backward step, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 3963-3971.
- [94] Chen, C.-L., Cheng, C.-H., 2002, Buoyancy-induced flow and convective heat transfer in an inclined arc-shape enclosure, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23, 823-830.
- [95] Nourgaliev, R.R., Dinh, T.N., Sehgl, B.R., 1997, Effect of fluid Prandtl number on heat transfer characteristics in internally heated liquid pools with Rayleigh numbers up to  $10^{12}$ , *Nuclear Engineering and Design*, 169, 165-184.
- [96] Al-Shariah, A.M., 1990, Analysis of laminar natural convective heat transfer in a triangular enclosure, *Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 60p.
- [97] Morsi, Y.S., Das, S., 2003, Numerical investigation of natural convection inside complex

enclosure, Heat Transfer Engineering, 24, No.2, 30-41.

[98] Asan, H., Namli, L., 2001, Numerical simulation of buoyant flow in a roof of triangular cross-section under winter day boundary conditions, Energy and Buildings, 33, 753-757.

[99] Asan, H., Namli, L., 2000, Laminar natural convection in a pitched roof of triangular cross-section: summer day boundary conditions, Energy and Buildings, 33, 69-73.

[100] Moukalled, F., Acharya, S., 2001, Natural convection in a trapezoidal enclosure with offset baffles, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 15, No.2, 212-218.

[101] Oosthuizen, P.H., Naylor, D., 1999, *Introduction to Convective Heat Transfer Analysis*. McGraw-Hill International Editions, Singapore, 620p.

[102] Özışık, M.N., 2000, *Finite Difference Methods in Heat Transfer*. CRC Press, Florida, 412p.

[103] Chapra, S.C., Canale, R.P., 2003, *Mühendisler için Sayısal Yöntemler*. Literatür Yayıncılık, İstanbul, 1004s.

## **ÖZGEÇMİŞ**

10 Ocak 1977 yılında ELAZIĞ ilinin Ağın ilçesinde doğan Ahmet KOCA, ilkokulu ve ortaokulu aynı ilçedeki okullarda tamamladı. 1990 yılında girmiş olduğu Elazığ Gazi Anadolu Teknik Lisesi'nden 1994 yılında mezun oldu. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 1998 yılında bu okuldan mezun olduktan sonra Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü'nde Enerji Bilimi üzerine yüksek lisansa başladı. 2001 yılında bu bölümdeki yüksek lisans eğitimini bitirerek aynı bilim dalında doktora başladı. Halen Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Yabancı dili İngilizce'dir.

**EK1. FARKLI ÇATI TİPLERİ İÇİN HAZIRLANAN FORTRAN  
PROGRAMLARI**

## EK1.a. BEŞİK ÇATI İÇİN HAZIRLANAN FORTRAN PROGRAMI

```
* ****
* ****BU PROGRAM BEŞİK ÇATI İÇİN LAMİNER DOĞAL KONVEKSİYON****
* ****İSİ TRANSFERİNİ, AKIM VE GİRDAP FONKSİYONLARINI****
* ****HESAPLAMAKTADIR****
* ****

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION PSI(1000,1000),T(1000,1000),OME(1000,1000)
DIMENSION TOLD(1000,1000),TABNU(1000),CATNU(1000)

OPEN (3,FILE='DOĞALSICAKLIK.TXT')
OPEN (2,FILE='DOĞALAKIM.TXT')
OPEN (1,FILE='NUSSELT.TXT')
C ****
C ****GİRİŞ DEĞERLERİ****
C ****
010 WRITE(*,001)
    WRITE(*,002)
    READ(*,*) RA,NX
020 WRITE(*,003)
    READ(*,*) İPER

030 FORMAT(51F10.4)

C
001 FORMAT(/)
002 FORMAT(/,10X,'RAYLEIGH SAYISI',/,5X,'X VE Y YÖNÜNDE NOD SAYISI')
003 FORMAT(/,10X,'ÇÖZÜM İÇİN SEZON SEÇİMİ',/,5X,'1 YAZ SEZONU -
    *2 KIS SEZONU',/)

C ****SEZON SEÇİMİ****
IF (İPER.EQ.1) THEN
    TTAB=0.
    TCAT=1.
ELSE
    IF (İPER.EQ.2) THEN
        TTAB=1.
        TCAT=0.
    ELSE
        GOTO 020
    ENDIF
ENDIF

C
PR=0.7
NY=NX
NX1=NX-1
NX2=NX-2
NY1=NY-1
NY2=NY-2
TOL=1.E-4
```

IMAX=200000  
IMIN=5000  
IAVG=IMIN-2500  
REX=0.10  
REXB=0.15  
REXT=0.05

ORAN=16./50.  
DELX=1./NX1  
DELY=ORAN/NY1

C \*\*\*\*\*  
C \*\*\*\*\*BASLANGIC DEGERLERI\*\*\*\*\*  
C \*\*\*\*\*

DO 100 J=1,NY  
DO 110 I=J,NX  
PSI(I,J)=0.0  
110 OME(I,J)=0.0  
100 CONTINUE

DO 120 J=1,NY  
DO 130 I=J,NX

C \*\*\*\*\*ALT TABAN ICIN SICAKLIK DEGERI\*\*\*\*\*  
IF (J.EQ.1) THEN  
T(I,J)=TTAB  
TOLD(I,J)=T(I,J)  
ELSE

C \*\*\*EGIMLI CATI YUZEYI ICIN SICAKLIK DEGERI\*\*\*  
IF (I.EQ.J) THEN  
T(I,J)=TCAT  
TOLD(I,J)=T(I,J)  
  
ENDIF  
ENDIF

130 CONTINUE  
120 CONTINUE

C \*\*\*CATI ILE TABANIN KESISME NOKTASI SICAKLIGI\*\*\*  
T(1,1)=0.5

C \*\*\*\*\*AKIM FONKSIYONU (PSI)\*\*\*\*\*  
DO 200 IREP=1,2  
DO 210 J=2,NY1  
DO 220 I=J,NX1  
IF (I.EQ.J) THEN  
GOTO 220  
ENDIF

F1=1./FAC\*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+PSI(I-1,J))/DELX\*\*2+

```

*          (PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/DELY**2)
PSI(I,J)=PSI(I,J)+REX*(F1-PSI(I,J))

220  CONTINUE
210  CONTINUE
200  CONTINUE

C  *****GIRDAP FONKSIYONU(OME)*****
DO 300 IREP=1,2
DO 310 J=2,NY1
DO 320 I=J,NX1
IF (I.EQ.J) THEN
GOTO 420
ENDIF

F3=1./FAC*((OME(I+1,J)+OME(I-1,J))/DELX**2+(OME(I,J+1)
*   +OME(I,J-1))/DELY**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/
*   (2.*DELX))-PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-
*   OME(I-1,J))/(4.*PR*DELX*DELY)+(PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*
*   (OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(4.*PR*DELX*DELY))
OME(I,J)=OME(I,J)+REX*(F3-OME(I,J))

320  CONTINUE
310  CONTINUE

C  ****SINIRDAKI GIRDAP FONKSIYONU (OME)***
C  **TABAN YUZEYDEKI GIRDAP FONKSIYONU***
DO 410 I=2,NX
F41=-2.*PSI(I,2)/DELY**2
OME(I,1)=OME(I,1)+REXB*(F41-OME(I,1))
410  CONTINUE

C  **EGIMLI CATI YUZEYINDEKI GIRDAP FONKSIYONU
DO 430 J=2,NY1
I=J

F43=-2*PSI((I+1),(J-1))/(HIP**2)
OME(I,J)=OME(I,J)+REXB*(F43-OME(I,J))

430  CONTINUE

F44=-2*PSI(2,1)/DELX**2
OME(1,1)=OME(1,1)+REXB*(F44-OME(1,1))

F45=-2*PSI(NX,NY1)/DELY**2
OME(NX,NY)=OME(NX,NY)+REXB*(F45-OME(NX,NY))
300  CONTINUE

C  *****BOYUTSUZ SICAKLIK (T)*****
DO 500 IREP=1,2

```

```

DO 510 J=2,NY1
DO 520 I=J,NX1
IF (I.EQ.J) THEN
GOTO 520
ENDIF

F2=1./FAC*((T(I+1,J)+T(I-1,J))/DELX**2+
* (T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY**2+
* (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(4.*DELX*DELY)-
* (PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/(4.*DELX*DELY))
T(I,J)=T(I,J)+REX*(F2-T(I,J))

520 CONTINUE
510 CONTINUE
500 CONTINUE
C *****SICAKLIK ICIN SINIR SARTI (SIMETRI YUZEYI)*****
DO 550 IREP=1,2
DO 560 J=2,NY2

F2=(4.0/3.0)*(T(NX1,J)-T(NX2,J)/4.0)
T(NX,J)=T(NX,J)+REXT*(F2-T(NX,J))
560 CONTINUE
F21=T(NX1,NY1)
T(NX,NY1)=T(NX,NY1)+REXT*(F21-T(NX,NY1))
550 CONTINUE

C *****NUSSELT SAYISI*****

TOPCATNU=0.
TOPTABNU=0.

DO 650 I=2,NX
TABNU(I)=ABS((TTAB-T(I,2))/DELY)
650 CONTINUE
DO 651 J=2,NY1
I=J
CATNU(J)=ABS((TCAT-T((I+1),(J-1)))/HIP)
651 CONTINUE
CATNU(1)=ABS((0.5-T(2,1))/DELX)
CATNU(NY)=ABS((TCAT-T(NX,NY1))/DELY)

TABNU(1)=CATNU(1)

DO 660 I=3,NX,2
TOPTABNU=TOPTABNU+(TABNU(I)+TABNU(I-2)+4.*TABNU(I-1))*(DELX/3.)
660 CONTINUE

DO 661 J=3,NY,2
TOPCATNU=TOPCATNU+(CATNU(J)+CATNU(J-2)+4.*CATNU(J-1))*(HIP/3.)
661 CONTINUE

ONU=(TOPTABNU+TOPCATNU)/2.

```

```

WRITE(6,670) TOPCATNU,TOPTABNU,ONU,RA,ITER
670  FORMAT(1X,'Cati.Nu=',F5.2,'Taban.Nu=',F5.2,'Ort.Nu=',F5.2,1X,
*      'Ra=',F10.1,1X,'Iterasyon=',I6)

C  *****YAKINSAMA*****
IF(ITER.LT.IMIN) GOTO 1000
IF(ITER.GT.IMAX) GOTO 840
DET=0.0
DO 710 J=2,(NY1-1)
DO 720 I=J,NX1
IF (I.EQ.J) GOTO 720
DET=ABS((TOLD(I,J)-T(I,J))/T(I,J))
IF(DET.GT.TOL) GOTO 1000
720  CONTINUE
710  CONTINUE
GOTO 860

C  *****SONUCLAR*****
840  WRITE(6,850)
WRITE(1,850)
850  FORMAT(' YAKINSAMADI ')
860  CONTINUE
WRITE(6,900) ITER,RA,NX
900  FORMAT(2X,'ITERASYON SAYISI=',I5,4X,'Ra=',F10.1)
WRITE(1,910) RA,IPER,NX
910  FORMAT(2X,'1.CATI TIPI(BESIK CATI)',/,2X,'Ra=',F9.1,3X,'SEZON
*NO=',I1,5X,'GRID SAYISI=',I3)
WRITE(1,920)
920  FORMAT(4X,'X',6X,'Y',8X,'PSI',12X,'T',12X,'OME')
DO 925 I=1,NX
XC=DELX*(I-1)
DO 930 J=1,NY
YC=DELY*(J-1)
WRITE(1,940) XC,YC,PSI(I,J),T(I,J),OME(I,J)
940  FORMAT(1X,F5.2,2X,F5.2,4X,E10.3,4X,F9.4,5X,E10.3)
930  CONTINUE
920  CONTINUE

WRITE(2,030)((PSI(I,J),I=1,NX),J=1,NY)
WRITE(3,030)((T(I,J),I=1,NX),J=1,NY)

WRITE(1,471) TOPCATNU,TOPTABNU,ONU, RA,ITER,PR
471  FORMAT(2X,'CatiNu=',F8.3,2X,'TabanNu=',F8.3,2X,'Nu=',F8.3,2X,
*      'Ortalama Nu=',F8.3,2X,/, 'Ra=',F9.1,2X,
*      'Iterasyon Sayisi=',I7,2X,'PR=',F5.3,2X)

GOTO 1091

1000  CONTINUE
DO 810 J=1,NY
DO 820 I=J,NX
820  TOLD(I,J)=T(I,J)

```

```
810  CONTINUE
      IF(ITER.GT.IMAX) GOTO 840
C    *****
1091  CONTINUE
1001  CLOSE(1)
      CLOSE(2)
      CLOSE(3)
      STOP
      END
```

## EK1.b. MANSART ÇATI İÇİN HAZIRLANAN FORTRAN PROGRAMI

```
* *****
* ***BU PROGRAM MANSART CATI ICIN LAMINER DOGAL KONVEKSİYON***
* **ISI TRANSFERİNİ, AKIM VE GIRDAP FONKSİYONLARINI*****
* *****HESAPLAMAKTADIR*****
* *****

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION PSI(1000,1000),T(1000,1000),OME(1000,1000)
DIMENSION TOLD(1000,1000),TABNU(1000),CATNU(1000)

OPEN (3,FILE='DOGALSICAKLIK.TXT')
OPEN (2,FILE='DOGALAKIM.TXT')
OPEN (1,FILE='NUSSELT.TXT')
C *****
C *****GIRIS DEGERLERI*****
C *****
010 WRITE(*,001)
    WRITE(*,002)
    READ(*,*) RA,NX
020 WRITE(*,003)
    READ(*,*) IPER

030 FORMAT(52F10.4)

C
001 FORMAT(/)
002 FORMAT(/,10X,'RAYLEIGH SAYISI',/,5X,'X VE Y YONUNDE NOD SAYISI
    * (GIRILEN SAYININ BIR EKSIGI 3E BOLUNEBİLMELİ)')
003 FORMAT(/,10X,'COZUM ICIN SEZON SECIMI',/,5X,'1 YAZ SEZONU -
    *2 KIS SEZONU',/)

C *****SEZON SECIMI*****
IF (IPER.EQ.1) THEN
    TTAB=0.
    TCAT=1.
ELSE
    IF (IPER.EQ.2) THEN
        TTAB=1.
        TCAT=0.
    ELSE
        GOTO 020
    ENDIF
ENDIF

C
PR=0.7
NY=NX
NX1=NX-1
NY1=NY-1
NY2=NY-2
```

```
TOL=1.E-4
IMAX=200000
IMIN=5000
IAVG=IMIN-2500
REX=0.10
REXB=0.15
REXT=0.05
```

```
K=MOD(NX1,3)
IF (K.NE.0) THEN
GOTO 010
ENDIF
```

C \*\*\*\*\*1.2. VE 3. BOLGELER ICIN NOD SAYILARI\*\*\*\*\*

```
MX1=NX1/3.
MX2=MX1
MY2=MX1
MX3=2.*MX1
MY1=MX3
MY2=MX3
MY3=MY1
```

C \*\*\*\*\*1.2. VE 3. BOLGELER ICIN NOD ARALIKLARI\*\*\*\*\*

```
ORANX1=33.375/50.
ORANX2=ORANX1
ORANX3=16.625/50.
ORANY1=21.32/50.
ORANY2=10.68/50.
ORANY3=ORANY1
```

```
DELX1=ORANX1/MX1
DELX2=ORANX2/MX2
DELX3=ORANX3/MX3
DELY1=ORANY1/MY1
DELY2=ORANY2/MY2
DELY3=ORANY3/MY3
```

C \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*BASLANGIC DEGERLERI\*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*

```
DO 100 J=1,NY
DO 110 I=1,(NX+1-J)
PSI(I,J)=0.0
110 OME(I,J)=0.0
100 CONTINUE
DO 120 J=1,NY
DO 130 I=1,(NX+1-J)
```

C \*\*\*\*\*ALT TABAN ICIN SICAKLIK DEGERI\*\*\*\*\*

```
IF (J.EQ.1) THEN
T(I,J)=TTAB
TOLD(I,J)=T(I,J)
```

```

ELSE
C   ***EGIMLI CATI YUZEYI ICIN SICAKLIK DEGERI****
IF (I.EQ.(NX+1-J)) THEN
T(I,J)=TCAT
TOLD(I,J)=T(I,J)

ENDIF
ENDIF

130 CONTINUE
120 CONTINUE

C   ***CATI ILE TABANIN KESISME NOKTASI SICAKLIGI***
T(NX,1)=0.5

C   *****AKIM FONKSIYONU(PSI)*****
DO 200 IREP=1,2
DO 210 J=2,NY1
DO 220 I=2,(NX-J)
IF ((I.LT.(MX1+1)).AND.(J.LT.(MY1+1))) THEN
F1=1./FAC1*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+PSI(I-1,J))/DELX1**2+
*      (PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/DELY1**2)
ELSE

IF (I.EQ.(MX1+1)) THEN
F1=1./((1+E1**2)/DELX1**2+2./DELY1**2)*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+
*      (E1**2)*PSI(I-1,J))/DELX1**2+(PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/
*      DELY1**2)
ELSE

IF (I.GT.(MX1+1)) THEN
F1=1./FAC3*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+PSI(I-1,J))/DELX3**2+
*      (PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/DELY3**2)
ELSE

IF (J.EQ.(MY1+1)) THEN
F1=1./((1+E2**2)/DELY2**2+2./DELX1**2)*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+
*      PSI(I-1,J))/DELX1**2+(PSI(I,J+1)+(E2**2)*PSI(I,J-1))/
*      DELY2**2)
ELSE

F1=1./FAC2*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+PSI(I-1,J))/DELX2**2+
*      (PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/DELY2**2)

ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF

PSI(I,J)=PSI(I,J)+REX*(F1-PSI(I,J))

```

220 CONTINUE  
210 CONTINUE  
200 CONTINUE

```
C *****GIRDAP FONKSIYONU (OME)*****  
DO 300 IREP=1,2  
DO 310 J=2,NY1  
DO 320 I=2,(NX-J)  
IF ((I.LT.(MX1+1)).AND.(J.LT.(MY1+1))) THEN  
F3=1./FAC1*((OME(I+1,J)+OME(I-1,J))/DELX1**2+(OME(I,J+1)  
* +OME(I,J-1))/DELY1**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/  
* (2.*DELX1))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-  
* OME(I-1,J))/(4.*PR*DELX1*DELY1)+(PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*  
* (OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(4.*PR*DELX1*DELY1))  
ELSE  
  
IF (I.EQ.(MX1+1)) THEN  
  
F3=1./((1+E1**2)/DELX1**2+2./DELY1**2)*((OME(I+1,J)+  
* (E1**2)*OME(I-1,J))/DELX1**2+(OME(I,J+1)  
* +OME(I,J-1))/DELY1**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/  
* (DELX1+DELX3))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-  
* OME(I-1,J))/(2.*PR*DELY1*(DELX1+DELX3))+(PSI(I+1,J)-  
* PSI(I-1,J))*(OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(2.*PR*DELY1*  
* (DELX1+DELX3)))  
ELSE  
  
IF (I.GT.(MX1+1)) THEN  
F3=1./FAC3*((OME(I+1,J)+OME(I-1,J))/DELX3**2+(OME(I,J+1)  
* +OME(I,J-1))/DELY3**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/  
* (2.*DELX3))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-  
* OME(I-1,J))/(4.*PR*DELX3*DELY3)+(PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*  
* (OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(4.*PR*DELX3*DELY3))  
ELSE  
  
IF (J.EQ.(MY1+1)) THEN  
F3=1./((1+E2**2)/DELY2**2+2./DELX1**2)*((OME(I+1,J)+  
* OME(I-1,J))/DELX1**2+(OME(I,J+1)  
* +(E2**2)*OME(I,J-1))/DELY2**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/  
* (2*DELX1))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-  
* OME(I-1,J))/(2.*PR*DELX1*(DELY1+DELY2))+(PSI(I+1,J)-  
* PSI(I-1,J))*(OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(2.*PR*DELX1*  
* (DELY1+DELY2)))  
ELSE  
  
F3=1./FAC2*((OME(I+1,J)+OME(I-1,J))/DELX2**2+(OME(I,J+1)  
* +OME(I,J-1))/DELY2**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/  
* (2.*DELX2))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-  
* OME(I-1,J))/(4.*PR*DELX2*DELY2)+(PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*  
* (OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(4.*PR*DELX2*DELY2))  
  
ENDIF
```

```

ENDIF
ENDIF
ENDIF

OME(I,J)=OME(I,J)+REX*(F3-OME(I,J))

320  CONTINUE
310  CONTINUE

C   ***SINIRDAKI GIRDAP FONKSIYONU (OME)***
C   **TABAN YUZEYDEKI GIRDAP FONKSIYONU**
DO 410 I=1,NX1
  F41=-2.*PSI(I,2)/DELY1**2
  OME(I,1)=OME(I,1)+REXB*(F41-OME(I,1))
410  CONTINUE
C   **EGIMLI CATI YUZEYINDEKI GIRDAP FONKSIYONU*****

DO 430 J=2,(MY1+1)
  I=(NX+1-J)
  IF (I.GT.(MX1+1)) THEN
    F43=-2*PSI((I-1),(J-1))/(HIP3**2)
  ELSE
    F43=-2*PSI((I-1),(J-1))/(HIP1**2)
  ENDIF
  OME(I,J)=OME(I,J)+REXB*(F43-OME(I,J))
430  CONTINUE

DO 431 J=(MY1+2),NY1
  I=(NX+1-J)
  F43=-2*PSI((I-1),(J-1))/(HIP2**2)
  OME(I,J)=OME(I,J)+REXB*(F43-OME(I,J))
431  CONTINUE

F44=-2*PSI(NX1,1)/DELX3**2
OME(NX,1)=OME(NX,1)+REXB*(F44-OME(NX,1))
F45=-2*PSI(1,NY1)/DELY2**2
OME(1,NY)=OME(1,NY)+REXB*(F45-OME(1,NY))

300  CONTINUE

C   *****BOYUTSUZ SICAKLIK (T)*****
DO 500 IREP=1,2
DO 510 J=2,NY1
DO 520 I=2,(NX-J)
  IF ((I.LT.(MX1+1)).AND.(J.LT.(MY1+1))) THEN
    F2=1./FAC1*((T(I+1,J)+T(I-1,J))/DELX1**2+
*      (T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY1**2+
*      (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(4.*DELX1*DELY1)-
*      (PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/(4.*DELX1*DELY1))
    ELSE
      IF (I.EQ.(MX1+1)) THEN

```

```

F2=1./((1+E1**2)/DELX1**2+2./DELY1**2)*((T(I+1,J)+(E1**2)*
* T(I-1,J))/DELX1**2+(T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY1**2+
* (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(2.*DELY1*(DELX1+
* DELX3))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/
* (2.*DELY1*(DELX1+DELX3)))
ELSE

IF(I.GT.(MX1+1)) THEN
F2=1./FAC3*((T(I+1,J)+T(I-1,J))/DELX3**2+
* (T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY3**2+
* (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(4.*DELX3*DELY3)-
* (PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/(4.*DELX3*DELY3))
ELSE

IF (J.EQ.(MY1+1)) THEN
F2=1./((1+E2**2)/DELY2**2+2./DELX1**2)*((T(I+1,J)+
* T(I-1,J))/DELX1**2+(T(I,J+1)+(E2**2)*T(I,J-1))/DELY2**2+
* (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(2.*DELX1*(DELY1+
* DELY2))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/
* (2.*DELX1*(DELY1+DELY2)))
ELSE

F2=1./FAC2*((T(I+1,J)+T(I-1,J))/DELX2**2+
* (T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY2**2+
* (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(4.*DELX2*DELY2)-
* (PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/(4.*DELX2*DELY2))

ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF

T(I,J)=T(I,J)+REX*(F2-T(I,J))

520 CONTINUE
510 CONTINUE
500 CONTINUE

C *****SICAKLIK ICIN SINIR SARTI (SIMETRI YUZEYI)*****
DO 550 IREP=1,2
DO 560 J=2,NY2

F2=(4.0/3.0)*(T(2,J)-T(3,J)/4.0)
T(1,J)=T(1,J)+REXT*(F2-T(1,J))
560 CONTINUE
F21=T(1,NY1)
T(1,NY1)=T(1,NY1)+REXT*(F21-T(1,NY1))
550 CONTINUE

C *****NUSSELT SAYISI*****

TOPCATNU=0.
TOPTABNU=0.

```

```

DO 650 I=1,NX1
  TABNU(I)=ABS((TTAB-T(I,2))/DELY1)

650  CONTINUE
DO 651 J=2,(MY1+1)
  I=(NX+1-J)
  IF (I.LE.(MX1+1)) THEN
    CATNU(J)=ABS((TCAT-T((I-1),(J-1)))/HIP1)
  ELSE
    CATNU(J)=ABS((TCAT-T((I-1),(J-1)))/HIP3)
  ENDIF
651  CONTINUE

      DO 652 J=(MY1+2),NY1
        I=(NX+1-J)
        CATNU(J)=ABS((TCAT-T((I-1),(J-1)))/HIP2)
652  CONTINUE

CATNU(1)=ABS((0.5-T(NX1,1))/DELX3)
CATNU1=ABS((TCAT-T(1,NY1))/DELY2)

DO 660 I=3,NX,2
  IF (I.LE.(MX1+1)) THEN
    TOPTABNU=TOPTABNU+(TABNU(I)+TABNU(I-2)+4.*TABNU(I-1))*(DELX1/3.)
  IF (I.EQ.(MX1+2)) THEN
    TOPTABNU=TOPTABNU+(TABNU(I)*DELX3+TABNU(I-2)*DELX1+4.*TABNU(I-1)
*      *(DELX1+DELX3)/2.)/(3.)
  ELSE
    TOPTABNU=TOPTABNU+(TABNU(I)+TABNU(I-2)+4.*TABNU(I-1))*(DELX3/3.)
  ENDIF
  ENDIF
660  CONTINUE

DO 661 J=3,NY,2
  IF (J.LE.(MY1+1)) THEN
    TOPCATNU=TOPCATNU+(CATNU(J)+CATNU(J-2)+4.*CATNU(J-1))*(HIP3/3.)
  IF (J.EQ.(MY1+2)) THEN
    TOPCATNU=TOPCATNU+(CATNU(J)*HIP2+CATNU(J-2)*HIP3+4.*CATNU(J-1)*
*      (HIP2+HIP3)/2.)/(3.)
  ELSE
    TOPCATNU=TOPCATNU+(CATNU(J)+CATNU(J-2)+4.*CATNU(J-1))*(HIP2/3.)
  ENDIF
  ENDIF
661  CONTINUE

      ONU=(TOPTABNU+TOPCATNU)/2.

WRITE(6,670) TOPCATNU,TOPTABNU,ONU,RA,ITER
670  FORMAT(1X,'Cati.Nu=',F5.2,'Taban.Nu=',F5.2,'Ort.Nu=',F5.2,1X,
*      'Ra=',F10.1,1X,'Iterasyon=',I6)

```

```

C  ***** YAKINSAMA *****
  IF(ITER.LT.IMIN) GOTO 1000
  IF(ITER.GT.IMAX) GOTO 840
  DET=0.0
  DO 610 J=2,NY1
  DO 620 I=2,(NX-J)
    DET=ABS((TOLD(I,J)-T(I,J))/T(I,J))
    IF(DET.GT.TOL) GOTO 1000
620  CONTINUE
610  CONTINUE
    GOTO 860
C  *****SONUCLAR*****
840  WRITE(6,850)
    WRITE(1,850)
850  FORMAT(' YAKINSAMADI ')
860  CONTINUE
    WRITE(6,700) ITER,RA,NX
700  FORMAT(2X,'ITERASYON SAYISI=',I6,4X,'Ra=',F10.1)
    WRITE(1,705) RA,IPER,NX
705  FORMAT(2X,'3.CATI TIPI(MANSART CATI)',/,2X,'Ra=',F9.1,3X,'SEZON
    *NO=',I1,5X,'GRID SAYISI=',I3)
    WRITE(1,710)
710  FORMAT(4X,'X',6X,'Y',8X,'PSI',12X,'T',12X,'OME')
    DO 720 I=1,NX
      XC=DELX*(I-1)
      DO 730 J=1,NY
        YC=DELY*(J-1)
        WRITE(1,740) XC,YC,PSI(I,J),T(I,J),OME(I,J)
740  FORMAT(1X,F5.2,2X,F5.2,4X,E10.3,4X,F9.4,5X,E10.3)
730  CONTINUE
720  CONTINUE

    WRITE(2,030)((PSI(I,J),I=1,NX),J=1,NY)
    WRITE(3,030)((T(I,J),I=1,NX),J=1,NY)

    WRITE(1,471) TOPCATNU,TOPTABNU,ONU, RA,ITER,PR
471  FORMAT(2X,'CatiNu=',F8.3,2X,'TabanNu=',F8.3,2X,'Nu=',F8.3,2X,
    *      'Ortalama Nu=',F8.3,2X,/, 'Ra=',F9.1,2X,
    *      'Iterasyon Sayisi=',I5,2X,'PR=',F5.3,2X)

    GOTO 1091

1000 CONTINUE
    DO 810 J=1,NY
      DO 820 I=1,(NX+1-J)
620  TOLD(I,J)=T(I,J)
810  CONTINUE
    IF(ITER.GT.IMAX) GOTO 840
C  *****
1091 CONTINUE
1001 CLOSE(1)
    CLOSE(2)

```

CLOSE(3)  
STOP  
END

## EK1.c. SUNDURMA ÇATI İÇİN HAZIRLANAN FORTRAN PROGRAMI

```
* ****
* ***BU PROGRAM SUNDURMA CATI ICIN LAMINER DOGAL KONVEKSİYON**
* **ISI TRANSFERİNİ, AKIM VE GIRDAP FONKSİYONLARINI*****
* *****HESAPLAMAKTADIR*****
* ****

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION PSI(1000,1000),T(1000,1000),OME(1000,1000)
DIMENSION TOLD(1000,1000),TABNU(1000),CATNU(1000)

OPEN (3,FILE='DOGALSICAKLIK.TXT')
OPEN (2,FILE='DOGALAKIM.TXT')
OPEN (1,FILE='NUSSELT.DAT')
C *****
C *****GIRIS DEGERLERI*****
C *****
010 WRITE(*,001)
WRITE(*,002)
READ(*,*) RA,NX
020 WRITE(*,003)
READ(*,*) IPER

030 FORMAT(51F10.4)

C
001 FORMAT(/)
002 FORMAT(/,10X,'RAYLEIGH SAYISI',/,5X,'X VE Y YONUNDE NOD SAYISI')
003 FORMAT(/,10X,'COZUM ICIN SEZON SECIMI',/,5X,'1 YAZ SEZONU -
*2 KIS SEZONU',/)

C *****SEZON SECIMI*****
IF (IPER.EQ.1) THEN
TTAB=0.
TCAT=1.
ELSE
IF (IPER.EQ.2) THEN
TTAB=1.
TCAT=0.
ELSE
GOTO 749
ENDIF
ENDIF

C
PR=0.7
NY=NX
NX1=NX-1
NX2=NX-2
NY1=NY-1
NY2=NY-2
TOL=1.E-4
```

IMAX=200000  
IMIN=5000  
IAVG=IMIN-2500  
REX=0.10  
REXB=0.15  
REXT=0.05

ORAN=32./100.  
DELX=1./NX1  
DELY=ORAN/NY1

C \*\*\*\*\*  
C \*\*\*\*\*BASLANGIC DEGERLERI\*\*\*\*\*  
C \*\*\*\*\*

DO 100 J=1,NY  
DO 110 I=1,(NX+1-J)  
PSI(I,J)=0.0  
110 OME(I,J)=0.0  
100 CONTINUE

DO 120 J=1,NY  
DO 130 I=1,(NX+1-J)

C \*\*\*\*\*ALT TABAN ICIN SICAKLIK DEGERI\*\*\*\*\*  
IF (J.EQ.1) THEN  
T(I,J)=TTAB  
TOLD(I,J)=T(I,J)  
ELSE

C \*\*\*EGIMLI CATI YUZEYI ICIN SICAKLIK DEGERI\*\*\*  
IF (I.EQ.(NX+1-J)) THEN  
T(I,J)=TCAT  
TOLD(I,J)=T(I,J)

ENDIF  
ENDIF

130 CONTINUE  
120 CONTINUE

C \*\*\*CATI ILE TABANIN KESISME NOKTASI SICAKLIGI\*\*\*  
T(NX,1)=0.5

C \*\*\*\*\*AKIM FONKSIYONU (PSI)\*\*\*\*\*  
DO 200 IREP=1,2  
DO 210 J=2,NY1  
DO 220 I=2,(NX-J)

F1=1./FAC\*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+PSI(I-1,J))/DELX\*\*2+  
\* (PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/DELY\*\*2)

```

        PSI(I,J)=PSI(I,J)+REX*(F1-PSI(I,J))

220  CONTINUE
210  CONTINUE
200  CONTINUE

C  *****GIRDAP FONKSIYONU (OME)*****
    DO 300 IREP=1,2
    DO 310 J=2,NY1
    DO 320 I=2,(NX-J)
        F3=1./FAC*((OME(I+1,J)+OME(I-1,J))/DELX**2+(OME(I,J+1)
*      +OME(I,J-1))/DELY**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/
*      (2.*DELX))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-
*      OME(I-1,J))/(4.*PR*DELX*DELY)+(PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*
*      (OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(4.*PR*DELX*DELY))
        OME(I,J)=OME(I,J)+REX*(F3-OME(I,J))
320  CONTINUE
310  CONTINUE

C  ****SINIRDAKI GIRDAP FONKSIYONU (OME)***
C  **TABAN YUZEYDEKI GIRDAP FONKSIYONU***
    DO 410 I=1,NX1
        F41=-2.*PSI(I,2)/DELY**2
        OME(I,1)=OME(I,1)+REXB*(F41-OME(I,1))
410  CONTINUE
C  **SIMETRI YUZEYINDEKI GIRDAP FONKSIYONU **
    DO 420 J=2,NY1
        F42=-2*PSI(2,J)/DELX**2
        OME(1,J)=OME(1,J)+REXB*(F42-OME(1,J))
420  CONTINUE
C  **EGIMLI CATI YUZEYINDEKI GIRDAP FONKSIYONU

    DO 430 J=2,NY1
        I=(NX+1-J)

        F43=-2*PSI((I-1),(J-1))/(HIP**2)
        OME(I,J)=OME(I,J)+REXB*(F43-OME(I,J))
430  CONTINUE

        F44=-2*PSI(NX1,1)/DELX**2
        OME(NX,1)=OME(NX,1)+REXB*(F44-OME(NX,1))

        F45=-2*PSI(1,NY1)/DELY**2
        OME(1,NY)=OME(1,NY)+REXB*(F45-OME(1,NY))
300  CONTINUE

C  *****BOYUTSUZ SICAKLIK(T)*****
    DO 400 IREP=1,2
    DO 410 J=2,NY1
    DO 420 I=2,(NX-J)

        F2=1./FAC*((T(I+1,J)+T(I-1,J))/DELX**2+

```

```

*      (T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY**2+
*      (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(4.*DELX*DELY)-
*      (PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/(4.*DELX*DELY))
      T(I,J)=T(I,J)+REX*(F2-T(I,J))

420  CONTINUE
410  CONTINUE
400  CONTINUE

C      *****SICAKLIK ICIN SINIR SARTI (SIMETRI YUZEYI)*****
      DO 450 IREP=1,2
      DO 460 J=2,NY2

      F2=(4.0/3.0)*(T(2,J)-T(3,J)/4.0)
      T(1,J)=T(1,J)+REXT*(F2-T(1,J))
460  CONTINUE
      F21=T(2,NY1)
      T(1,NY1)=T(1,NY1)+REXT*(F21-T(1,NY1))
450  CONTINUE

C      *****NUSSELT SAYISI*****

      TOPCATNU=0.
      TOPTABNU=0.

      DO 550 I=1,NX1
      TABNU(I)=ABS((TTAB-T(I,2))/DELY)
550  CONTINUE
      DO 551 J=2,NY1
      I=(NX+1-J)
      CATNU(J)=ABS((TCAT-T((I-1),(J-1)))/HIP)
551  CONTINUE
      CATNU(1)=ABS((0.5-T(NX1,1))/DELX)
      CATNU(NY)=ABS((TCAT-T(1,NY1))/DELY)

      TABNU(NX)=CATNU(1)

      DO 560 I=3,NX,2
      TOPTABNU=TOPTABNU+(TABNU(I)+TABNU(I-2)+4.*TABNU(I-1))*(DELX/3.)
560  CONTINUE
      DO 561 J=3,NY,2
      TOPCATNU=TOPCATNU+(CATNU(J)+CATNU(J-2)+4.*CATNU(J-1))*(HIP/3.)
561  CONTINUE
      ONU=(TOPTABNU+TOPCATNU)/2.
      WRITE(6,570) TOPCATNU,TOPTABNU,ONU,RA,ITER
570  FORMAT(1X,'Cati.Nu=',F5.2,'Taban.Nu=',F5.2,'Ort.Nu=',F5.2,1X,
*      'Ra=',F10.1,1X,'Iterasyon=',I6)

C      ***** YAKINSAMA *****
      IF(ITER.LT.IMIN) GOTO 1000

```

```

      IF(ITER.GT.IMAX) GOTO 840
      DET=0.0
      DO 610 J=2,(NY1-1)
      DO 620 I=2,(NX-J)
        DET=ABS((TOLD(I,J)-T(I,J))/T(I,J))
        IF(DET.GT.TOL) GOTO 1000
620   CONTINUE
610   CONTINUE
      GOTO 860

C   *****SONUCLAR*****
840   WRITE(6,850)
      WRITE(1,850)
850   FORMAT(' YAKINSAMADI ')
860   CONTINUE
      WRITE(6,700) ITER,RA
700   FORMAT(2X,'ITERASYON SAYISI=',I5,4X,'Ra=',F10.1)
      WRITE(1,705) RA,IPER,NX
705   FORMAT(2X,'2.CATI TIPI(SUNDURMA CATI)',/,2X,'Ra=',F9.1,3X,'SEZON
      * NO=',I1,5X,'GRID SAYISI=',I3)
      WRITE(1,710)
710   FORMAT(4X,'X',6X,'Y',8X,'PSI',12X,'T',12X,'OME')
      DO 720 I=1,NX
        XC=DELX*(I-1)
        DO 730 J=1,NY
          YC=DELY*(J-1)
          WRITE(1,740) XC,YC,PSI(I,J),T(I,J),OME(I,J)
740   FORMAT(1X,F5.2,2X,F5.2,4X,E10.3,4X,F9.4,5X,E10.3)
730   CONTINUE
720   CONTINUE

      WRITE(2,030)((PSI(I,J),I=1,NX),J=1,NY)
      WRITE(3,030)((T(I,J),I=1,NX),J=1,NY)
      WRITE(1,471) TOPCATNU,TOPTABNU,ONU,RA,ITER,PR
471   FORMAT(2X,'CatiNu=',F8.3,2X,'TabanNu=',F8.3,2X,'Nu=',F8.3,2X,
      *       'Ortalama Nu=',F8.3,2X,/, 'Ra=',F9.1,2X,
      *       'Iterasyon Sayisi=',I5,2X,'PR=',F5.3,2X)

      GOTO 1091

1000  CONTINUE
      DO 810 J=1,NY
      DO 820 I=1,(NX+1-J)
820   TOLD(I,J)=T(I,J)
810   CONTINUE
      IF(ITER.GT.IMAX) GOTO 840
C   *****
1091  CONTINUE
1001  CLOSE(1)
      CLOSE(2)
      CLOSE(3)
      STOP
      END

```

## EK1.d. FARKLI YÜZEY ALANLI BEŞİK ÇATI İÇİN HAZIRLANAN FORTRAN PROGRAMI

```
* *****
* ****BU PROGRAM FARKLI YUZEY ALANLI BESİK CATI ICIN *****
* ****LAMINER DOĞAL KONVEKSİYON ISI TRANSFERİNİ, AKIM VE ****
* ****GIRDAP FONKSİYONLARINI HESAPLAMAKTADIR*****
* *****

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION PSI(1000,1000),T(1000,1000),OME(1000,1000)
DIMENSION TOLD(1000,1000),TABNU(1000),CATNU(1000)

OPEN (3,FILE='DOĞALSICAKLIK.TXT')
OPEN (2,FILE='DOĞALAKIM.TXT')
OPEN (1,FILE='NUSSELT.TXT')
C *****
C *****GİRİŞ DEĞERLERİ*****
C *****

010 WRITE(*,001)
WRITE(*,002)
READ(*,*) RA,NX
020 WRITE(*,003)
READ(*,*) İPER

030 FORMAT(52F10.4)

C
001 FORMAT(//////)
002 FORMAT(/,10X,'RAYLEIGH SAYISI',/,5X,'X YONUNDE NOD SAYISI
* (GİRİLEN SAYININ BİR EKSİĞİ 3E BÖLÜNEBİLMELİ)')
003 FORMAT(/,10X,'ÇÖZÜM İÇİN SEZON SEÇİMİ',/,5X,'1 YAZ SEZONU -
*2 KİŞİ SEZONU',/)

C *****SEZON SEÇİMİ*****
IF (İPER.EQ.1) THEN
TTAB=0.
TCAT=1.
ELSE
IF (İPER.EQ.2) THEN
TTAB=1.
TCAT=0.
ELSE
GOTO 020
ENDIF
ENDIF

C
PR=0.7
TOL=1.E-4
IMAX=200000
İMIN=5000
```

```
IAVG=IMIN-2500
REX=0.10
REXB=0.15
REXT=0.05
```

```
K=MOD(NX1,3)
IF (K.NE.0) THEN
GOTO 010
ENDIF
```

C \*\*\*\*\*1.2. VE 3. BOLGELER ICIN NOD SAYILARI\*\*\*\*\*

```
NX1=NX-1
MX1=NX1*2./3.
NY=MX1+1
NY1=NY-1
MX2=MX1
MY2=MX1/2.
MX3=MY2
MY1=MY2
MY3=MY2
```

C \*\*\*\*\*1.2. VE 3. BOLGELER ICIN NOD ARALIKLARI\*\*\*\*\*

```
ORANX1=64./100.
ORANX2=ORANX1
ORANX3=36./100.
ORANY1=11.52/100.
ORANY2=10.24/100.
ORANY3=ORANY1

DELX1=ORANX1/MX1
DELX2=ORANX2/MX2
DELX3=ORANX3/MX3
DELY1=ORANY1/MY1
DELY2=ORANY2/MY2
DELY3=ORANY3/MY3
```

C \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*BASLANGIC DEGERLERI\*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*1. VE 3. BOLGELER ICIN\*\*\*\*\*

```
DO 100 J=1,MY1
DO 110 I=1,(NX+1-J)
PSI(I,J)=0.0
110 OME(I,J)=0.0
100 CONTINUE
```

C \*\*\*\*\*2. BOLGE ICIN\*\*\*\*\*

```
DO 115 J=(MY1+1),NY
DO 116 I=(J-MY1),(NX+1-J)
PSI(I,J)=0.0
116 OME(I,J)=0.0
```

115 CONTINUE

DO 120 J=1,MY1  
DO 130 I=1,(NX+1-J)

C \*\*\*\*\*ALT TABAN ICIN SICAKLIK DEGERI\*\*\*\*\*  
IF (J.EQ.1) THEN  
T(I,J)=TTAB  
TOLD(I,J)=T(I,J)  
ELSE

C \*\*EGIMLI CATI YUZEYI ICIN SICAKLIK DEGERI (1. VE 3. BOLGE)\*\*  
IF (I.EQ.(NX+1-J)) THEN  
T(I,J)=TCAT  
TOLD(I,J)=T(I,J)

ENDIF  
ENDIF

130 CONTINUE  
120 CONTINUE

C \*\*\*EGIMLI CATI YUZEYI ICIN SICAKLIK DEGERI (2. BOLGE)\*\*\*  
DO 140 J=(MY1+1),NY  
DO 150 I=(J-MY1),(NX+1-J)  
IF((I.EQ.(J-MY1)).OR.(I.EQ.(NX+1-J))) THEN  
T(I,J)=TCAT  
TOLD(I,J)=T(I,J)  
ENDIF

150 CONTINUE  
140 CONTINUE

C \*\*\*CATI ILE TABANIN KESISME NOKTASI SICAKLIGI\*\*\*  
T(NX,1)=0.5

C \*1. VE 3. BOLGELER ICIN AKIM FONKSIYONU (PSI)\*  
DO 200 IREP=1,2  
DO 210 J=2,MY1  
DO 220 I=2,(NX-J)  
IF (I.LT.(MX1+1)) THEN  
F1=1./FAC1\*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+PSI(I-1,J))/DELX1\*\*2+  
\* (PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/DELY1\*\*2)  
ELSE  
  
IF (I.EQ.(MX1+1)) THEN  
F1=1./((1+E1\*\*2)/DELX1\*\*2+2./DELY1\*\*2)\*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+  
\* (E1\*\*2)\*PSI(I-1,J))/DELX1\*\*2+(PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/  
\* DELY1\*\*2)  
ELSE

```

      F1=1./FAC3*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+PSI(I-1,J))/DELX3**2+
*      (PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/DELY3**2)

      ENDIF
      ENDIF

      PSI(I,J)=PSI(I,J)+REX*(F1-PSI(I,J))

220  CONTINUE
210  CONTINUE
200  CONTINUE

C    ***2. BOLGE ICIN AKIM FONKSIYONU (PSI)***
DO 250 IREP=1,2
DO 260 J=(MY1+1),NY1
DO 270 I=(J-MY1-1),(NX-J)

      IF (J.EQ.(MY1+1)) THEN
      F1=1./((1+E2**2)/DELY2**2+2./DELX1**2)*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+
*      PSI(I-1,J))/DELX1**2+(PSI(I,J+1)+(E2**2)*PSI(I,J-1))/
*      DELY2**2)
      ELSE

      F1=1./FAC2*(OME(I,J)+(PSI(I+1,J)+PSI(I-1,J))/DELX2**2+
*      (PSI(I,J+1)+PSI(I,J-1))/DELY2**2)

      ENDIF

      PSI(I,J)=PSI(I,J)+REX*(F1-PSI(I,J))

270  CONTINUE
260  CONTINUE
250  CONTINUE

C    *1. VE 3. BOLGELER ICIN GIRDAP FONKSIYONU (OME)*
DO 300 IREP=1,2
DO 310 J=2,MY1
DO 320 I=2,(NX-J)
      IF (I.LT.(MX1+1)) THEN
      F3=1./FAC1*((OME(I+1,J)+OME(I-1,J))/DELX1**2+(OME(I,J+1)
*      +OME(I,J-1))/DELY1**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/
*      (2.*DELX1))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-
*      OME(I-1,J))/(4.*PR*DELX1*DELY1)+(PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*
*      (OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(4.*PR*DELX1*DELY1))
      ELSE

      IF (I.EQ.(MX1+1)) THEN
      F3=1./((1+E1**2)/DELX1**2+2./DELY1**2)*((OME(I+1,J)+
*      (E1**2)*OME(I-1,J))/DELX1**2+(OME(I,J+1)
*      +OME(I,J-1))/DELY1**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/
*      (DELX1+DELX3))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-
*      OME(I-1,J))/(2.*PR*DELY1*(DELX1+DELX3))+(PSI(I+1,J)-

```

```

*      PSI(I-1,J))*(OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(2.*PR*DELY1*
*      (DELX1+DELX3)))
      ELSE

      F3=1./FAC3*((OME(I+1,J)+OME(I-1,J))/DELX3**2+(OME(I,J+1)
*      +OME(I,J-1))/DELY3**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/
*      (2.*DELX3))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-
*      OME(I-1,J))/(4.*PR*DELX3*DELY3)+(PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*
*      (OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(4.*PR*DELX3*DELY3))
      ENDIF
      ENDIF

      OME(I,J)=OME(I,J)+REX*(F3-OME(I,J))
320  CONTINUE
310  CONTINUE

C      ***2. BOLGE ICIN GIRDAP FONKSIYONUNUN HESAPLANMASI (OME)***
DO 340 J=(MY1+1),NY1
DO 345 I=(J-MY1-1),(NX-J)
IF (J.EQ.(MY1+1)) THEN
      F3=1./((1+E2**2)/DELY2**2+2./DELX1**2)*((OME(I+1,J)+
*      OME(I-1,J))/DELX1**2+(OME(I,J+1)
*      +(E2**2)*OME(I,J-1))/DELY2**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/
*      (2*DELX1))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-
*      OME(I-1,J))/(2.*PR*DELX1*(DELY1+DELY2)))+(PSI(I+1,J)-
*      PSI(I-1,J))*(OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(2.*PR*DELX1*
*      (DELY1+DELY2)))
      ELSE

      F3=1./FAC2*((OME(I+1,J)+OME(I-1,J))/DELX2**2+(OME(I,J+1)
*      +OME(I,J-1))/DELY2**2+RA*((T(I+1,J)-T(I-1,J))/
*      (2.*DELX2))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(OME(I+1,J)-
*      OME(I-1,J))/(4.*PR*DELX2*DELY2)+(PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*
*      (OME(I,J+1)-OME(I,J-1))/(4.*PR*DELX2*DELY2))
      ENDIF

      OME(I,J)=OME(I,J)+REX*(F3-OME(I,J))

345  CONTINUE
340  CONTINUE

C      ****SINIRDAKI GIRDAP FONKSIYONU (OME)***
C      **TABAN YUZEYDEKI GIRDAP FONKSIYONU***
DO 410 I=1,NX1
      F41=-2.*PSI(I,2)/DELY1**2
      OME(I,1)=OME(I,1)+REXB*(F41-OME(I,1))
410  CONTINUE
C      **SİMETRİ YÜZEYİNDEKİ GIRDAP FONKSIYONU **
DO 420 J=2,(MY1+1)
      F42=-2*PSI(2,J)/DELX1**2
      OME(1,J)=OME(1,J)+REXB*(F42-OME(1,J))
420  CONTINUE

```

```

C      **1. VE 3. BOLGELER ICIN EGIMLI CATI YUZEYINDEKI ***
C      *****GIRDAP FONKSIYONU*****
DO 530 J=2,(MY1+1)
  I=(NX+1-J)
    IF (I.EQ.(MX1+1)) THEN
      F43=-2*PSI((I-1),(J-1))/(HIP1**2)
    ELSE
      F43=-2*PSI((I-1),(J-1))/(HIP3**2)
    ENDIF
    OME(I,J)=OME(I,J)+REXB*(F43-OME(I,J))
530 CONTINUE
C      **2. BOLGE ICIN EGIMLI CATI YUZEYINDEKI ***
C      *****GIRDAP FONKSIYONU*****
DO 540 J=(MY1+2),NY1
  I=(J-MY1)
  F43=-2*PSI((I+1),(J-1))/(HIP2**2)
  OME(I,J)=OME(I,J)+REXB*(F43-OME(I,J))
  I=(NX+1-J)
  F44=-2*PSI((I-1),(J-1))/(HIP2**2)
  OME(I,J)=OME(I,J)+REXB*(F44-OME(I,J))
540 CONTINUE

  F45=-2*PSI((MY1+1),NY1)/(DELY2**2)
  OME((MY1+1),NY)=OME((MY1+1),NY)+REXB*(F45-OME((MY1+1),NY))

```

```

300 CONTINUE

```

```

C      *1. VE 3. BOLGELER ICIN BOYUTSUZ SICAKLIK (T)*
DO 600 IREP=1,2
DO 610 J=2,MY1
DO 620 I=2,(NX-J)
  IF (I.LT.(MX1+1)) THEN
    F2=1./FAC1*((T(I+1,J)+T(I-1,J))/DELX1**2+
*      (T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY1**2+
*      (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(4.*DELX1*DELY1)-
*      (PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/(4.*DELX1*DELY1))
    ELSE

    IF (I.EQ.(MX1+1)) THEN
      F2=1./((1+E1**2)/DELX1**2+2./DELY1**2)*((T(I+1,J)+(E1**2)*
*      T(I-1,J))/DELX1**2+(T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY1**2+
*      (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(2.*DELY1*(DELX1+
*      DELX3))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/
*      (2.*DELY1*(DELX1+DELX3)))
    ELSE

      F2=1./FAC3*((T(I+1,J)+T(I-1,J))/DELX3**2+
*      (T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY3**2+
*      (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(4.*DELX3*DELY3)-
*      (PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/(4.*DELX3*DELY3))

    ENDIF
  
```

```

ENDIF

T(I,J)=T(I,J)+REX*(F2-T(I,J))

620 CONTINUE
610 CONTINUE
600 CONTINUE

C   ***2. BOLGE ICIN BOYUTSUZ SICAKLIK (T)***
DO 630 IREP=1,2
DO 640 J=(MY1+1),NY1
DO 645 I=(J-MY1-1),(NX-J)

IF (J.EQ.(MY1+1)) THEN
F2=1./((1+E2**2)/DELY2**2+2./DELX1**2)*((T(I+1,J)+
*   T(I-1,J))/DELX1**2+(T(I,J+1)+(E2**2)*T(I,J-1))/DELY2**2+
*   (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(2.*DELX1*(DELY1+
*   DELY2))-(PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/
*   (2.*DELX1*(DELY1+DELY2)))
ELSE
F2=1./FAC2*((T(I+1,J)+T(I-1,J))/DELX2**2+
*   (T(I,J+1)+T(I,J-1))/DELY2**2+
*   (PSI(I+1,J)-PSI(I-1,J))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))/(4.*DELX2*DELY2)-
*   (PSI(I,J+1)-PSI(I,J-1))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))/(4.*DELX2*DELY2))

ENDIF

T(I,J)=T(I,J)+REX*(F2-T(I,J))

645 CONTINUE
640 CONTINUE
630 CONTINUE

C   *****SICAKLIK ICIN SINIR SARTI (SIMETRI YUZEYI)*****
DO 650 IREP=1,2
DO 660 J=2,(MY1-1)

F2=(4.0/3.0)*(T(2,J)-T(3,J)/4.0)
T(1,J)=T(1,J)+REXT*(F2-T(1,J))
660 CONTINUE
650 CONTINUE

C   *****NUSSELT SAYISI*****

TOPCATNU=0.
TOPTABNU=0.

DO 550 I=1,NX1
TABNU(I)=ABS((TTAB-T(I,2))/DELY1)

```

```

550  CONTINUE
      DO 551 J=2,NY1
        I=(NX+1-J)
        IF (J.LE.MY1) THEN
          CATNU(J)=ABS((TCAT-T((I-1),(J-1)))/HIP3)
          IF (J.EQ.(MY1+1)) THEN
            CATNU(J)=ABS((TCAT-T((I-1),(J-1)))/HIP1)
          ELSE

            CATNU(J)=ABS((TCAT-T((I-1),(J-1)))/HIP2)*2
          ENDIF
        ENDIF
551  CONTINUE
      CATNU(1)=ABS((0.5-T(NX1,1))/DELX3)
      CATNU1=ABS((TCAT-T((MY1+1),NY1))/DELY2)

      DO 560 I=3,NX,2
        IF (I.LE.(MX1+1)) THEN
          TOPTABNU=TOPTABNU+(TABNU(I)+TABNU(I-2)+4.*TABNU(I-1))*(DELX1/3.)
          IF (I.EQ.(MX1+2)) THEN
            TOPTABNU=TOPTABNU+(TABNU(I)*DELX3+TABNU(I-2)*DELX1+4.*TABNU(I-
1)
          *      *(DELX1+DELX3)/2.)/(3.)
          ELSE
            TOPTABNU=TOPTABNU+(TABNU(I)+TABNU(I-2)+4.*TABNU(I-1))*(DELX3/3.)
          ENDIF
        ENDIF
560  CONTINUE

      DO 561 J=3,NY,2
        IF (J.LE.(MY1+1)) THEN
          TOPCATNU=TOPCATNU+(CATNU(J)+CATNU(J-2)+4.*CATNU(J-1))*(HIP3/3.)
          IF (J.EQ.(MY1+2)) THEN
            TOPCATNU=TOPCATNU+(CATNU(J)*HIP2*2.+CATNU(J-2)*HIP3+4.*
          *      CATNU(J-1)*(HIP2+HIP2)/2.)/(3.)
          ELSE

            TOPCATNU=TOPCATNU+(CATNU(J)+CATNU(J-2)+4.*CATNU(J-1))*(HIP2/3.)
          ENDIF
        ENDIF
561  CONTINUE

      ONU=(TOPTABNU+TOPCATNU)/2.

      WRITE(6,570) TOPCATNU,TOPTABNU,ONU,RA,ITER
570  FORMAT(1X,'Cati.Nu=',F5.2,'Taban.Nu=',F5.2,'Ort.Nu=',F5.2,1X,
          *      'Ra=',F10.1,1X,'Iterasyon=',I6)

C    ***** YAKINSAMA *****
      IF(ITER.LT.IMIN) GOTO 1000
      IF(ITER.GT.IMAX) GOTO 840
      DET=0.0

```

```

DO 710 J=2,(MY1+1)
DO 720 I=2,(NX-J)
DET=ABS((TOLD(I,J)-T(I,J))/T(I,J))
IF(DET.GT.TOL) GOTO 1000
720 CONTINUE
710 CONTINUE

```

```

DO 730 J=(MY1+2),NY1
DO 740 I=(J-MY1+1),(NX-J)
DET=ABS((TOLD(I,J)-T(I,J))/T(I,J))
IF(DET.GT.TOL) GOTO 1000
740 CONTINUE
730 CONTINUE
GOTO 860

```

C \*\*\*\*\*SONUCLAR\*\*\*\*\*

```

840 WRITE(6,850)
WRITE(1,850)
850 FORMAT(' YAKINSAMADI ')
860 CONTINUE
WRITE(6,700) ITER,RA
700 FORMAT(2X,'ITERASYON SAYISI=',I6,4X,'Ra=',F10.1)
WRITE(1,705) RA,IPER,NX,NY
705 FORMAT(2X,'4.CATI TIPI(F.Y.A.BESIK CATI)',/,2X,'Ra=',F9.1,3X,
* 'SEZON NO=',I1,/,5X,'GRID SAYILARI NX=',I3,2X,'NY=',I3)
WRITE(1,710)
710 FORMAT(4X,'X',6X,'Y',8X,'PSI',12X,'T',12X,'OME')
DO 720 I=1,NX
XC=DELX*(I-1)
DO 730 J=1,NY
YC=DELY*(J-1)
WRITE(1,740) XC,YC,PSI(I,J),T(I,J),OME(I,J)
740 FORMAT(1X,F5.2,2X,F5.2,4X,E10.3,4X,F9.4,5X,E10.3)
730 CONTINUE
720 CONTINUE

```

```

WRITE(2,030)((PSI(I,J),I=1,NX),J=1,NY)
WRITE(3,030)((T(I,J),I=1,NX),J=1,NY)

```

```

WRITE(1,571) TOPCATNU,TOPTABNU,ANU,ANUA,RA,ITER,PR

```

```

571 FORMAT(2X,'CatiNu=',F8.3,2X,'TabanNu=',F8.3,2X,'Nu=',F8.3,2X,
* 'Ortalama Nu=',F8.3,2X,/, 'Ra=',F9.1,2X,
* 'Iterasyon Sayisi=',I5,2X,'PR=',F5.3,2X)
GOTO 1091
1000 CONTINUE

```

```

DO 810 J=1,MY1
DO 820 I=1,(NX+1-J)
820 TOLD(I,J)=T(I,J)
810 CONTINUE
DO 825 J=(MY1+1),NY

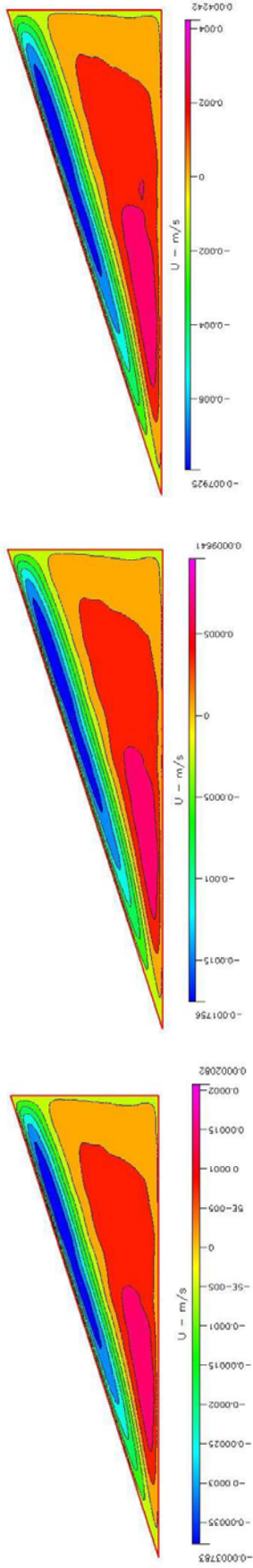
```

```
      DO 826 I=(J-MY1),(NX+1-J)
826   TOLD(I,J)=T(I,J)
825   CONTINUE

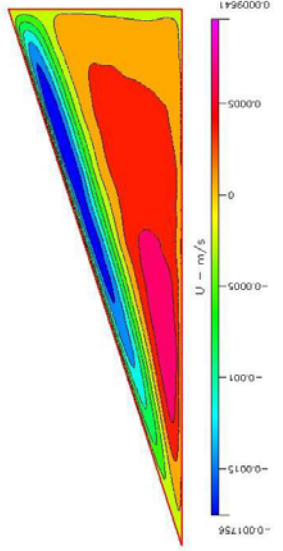
      IF(ITER.GT.IMAX) GOTO 840
C   *****
1091  CONTINUE
1001  CLOSE(1)
      CLOSE(2)
      CLOSE(3)
      STOP
      END
```

**EK2. FARKLI ÇATI TİPLERİ İÇİN YAZ VE KIŞ SEZONLARINDA  
HIZ GRAFİKLERİ**

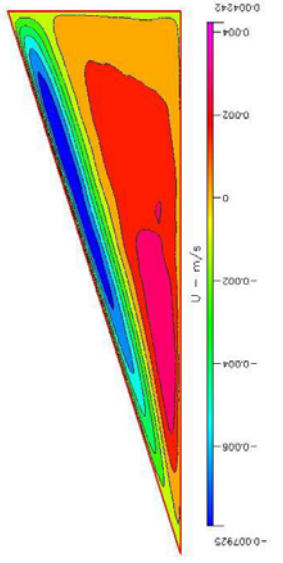
## EK2.a. BEŞİK ÇATI İÇİN HIZ GRAFİKLERİ



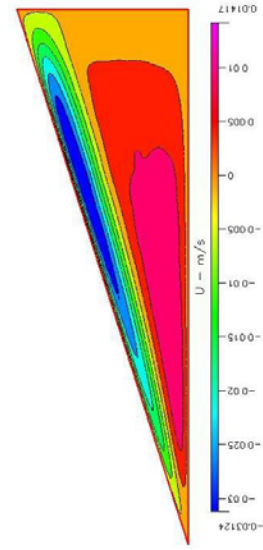
a)  $Ra=10^3$



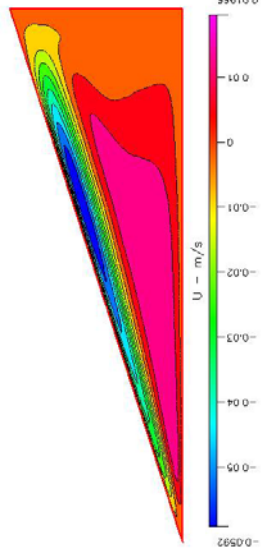
b)  $Ra=10^4$



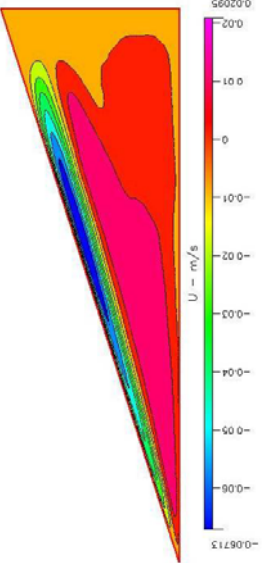
c)  $Ra=10^5$



d)  $Ra=10^6$

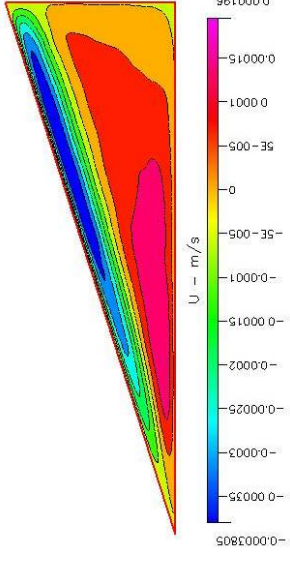


e)  $Ra=5 \times 10^6$

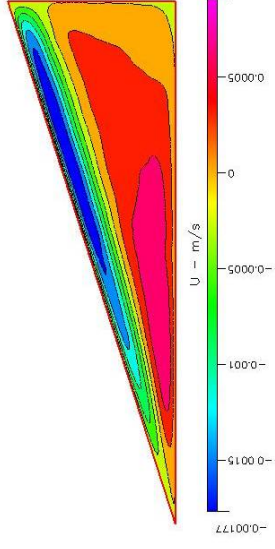


f)  $Ra=10^7$

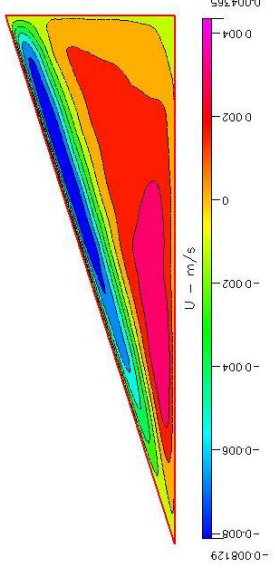
Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında x yönündeki sabit hız çizgileri (Yaz sezonu)



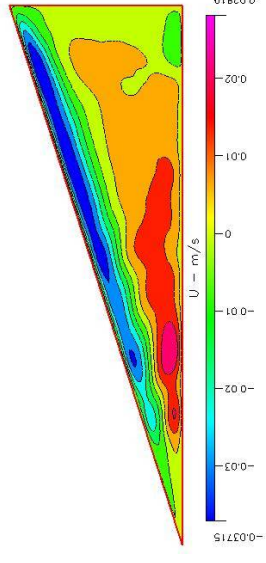
**a)  $Ra=10^3$**



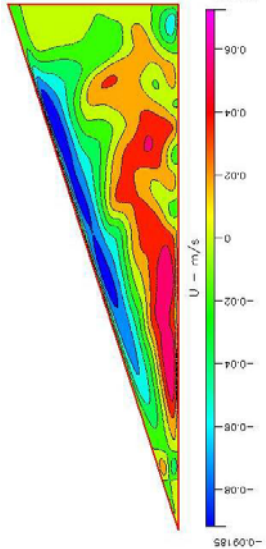
**b)  $Ra=10^4$**



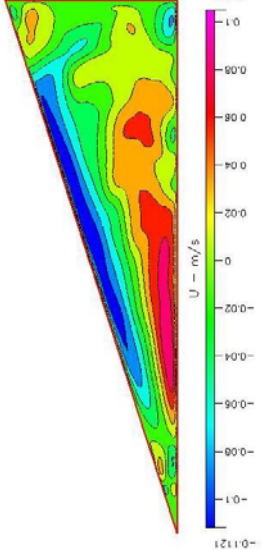
**c)  $Ra=10^5$**



**d)  $Ra=10^6$**

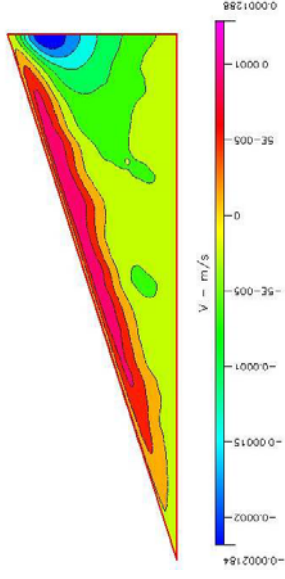


**e)  $Ra=5 \times 10^6$**

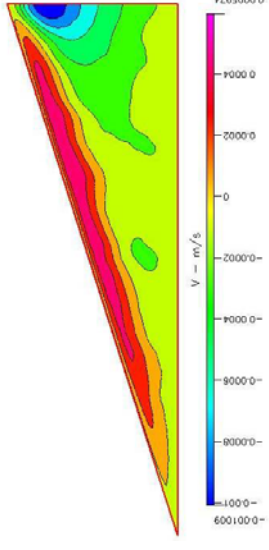


**f)  $Ra=10^7$**

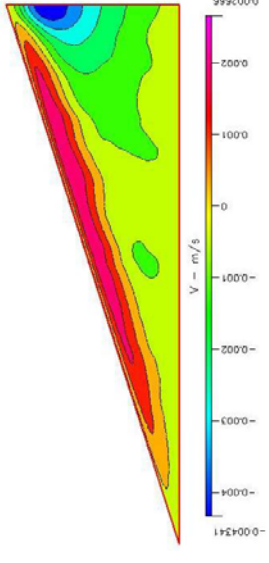
Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında x yönündeki sabit hız çizgileri (Kış sezonu)



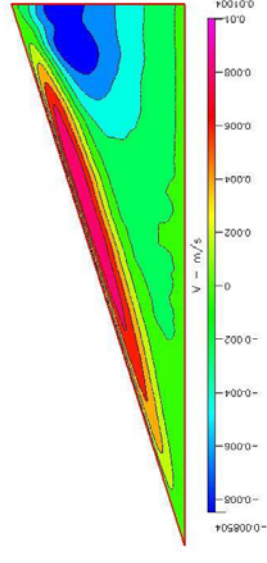
**a)  $Ra=10^3$**



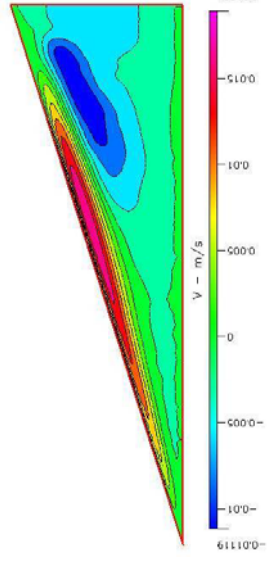
**b)  $Ra=10^4$**



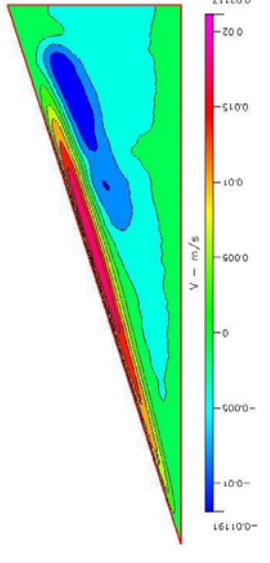
**c)  $Ra=10^5$**



**d)  $Ra=10^6$**

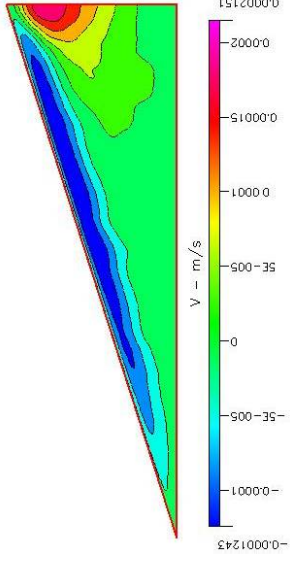


**e)  $Ra=5 \times 10^6$**

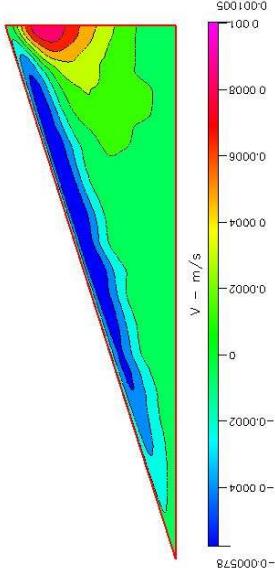


**f)  $Ra=10^7$**

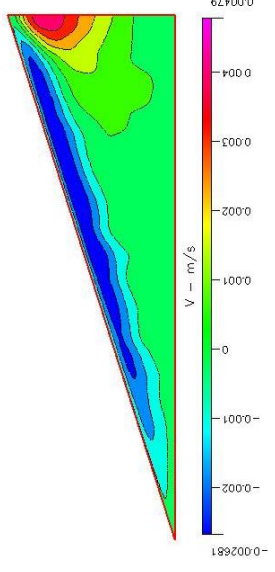
Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında y yönündeki sabit hız çizgileri (Yaz sezonu)



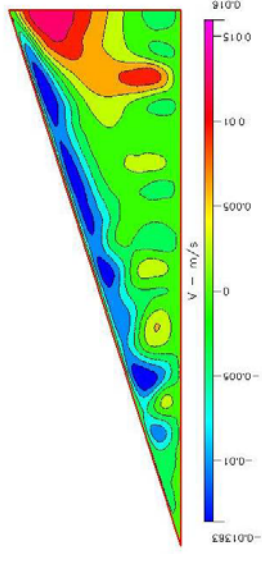
**a)  $Ra=10^3$**



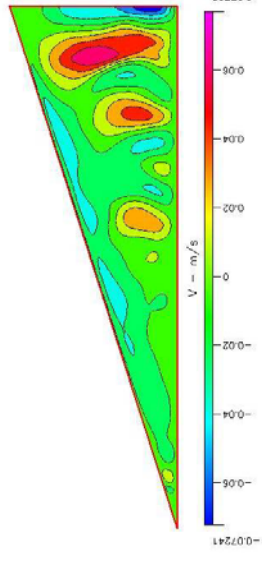
**b)  $Ra=10^4$**



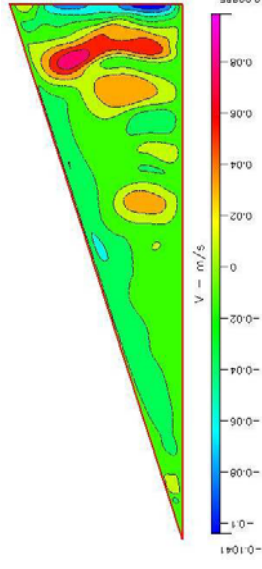
**c)  $Ra=10^5$**



**d)  $Ra=10^6$**



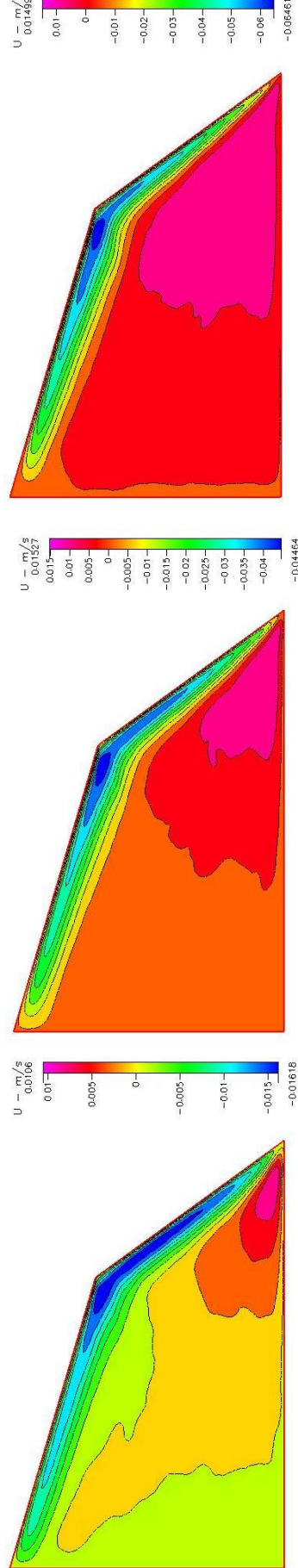
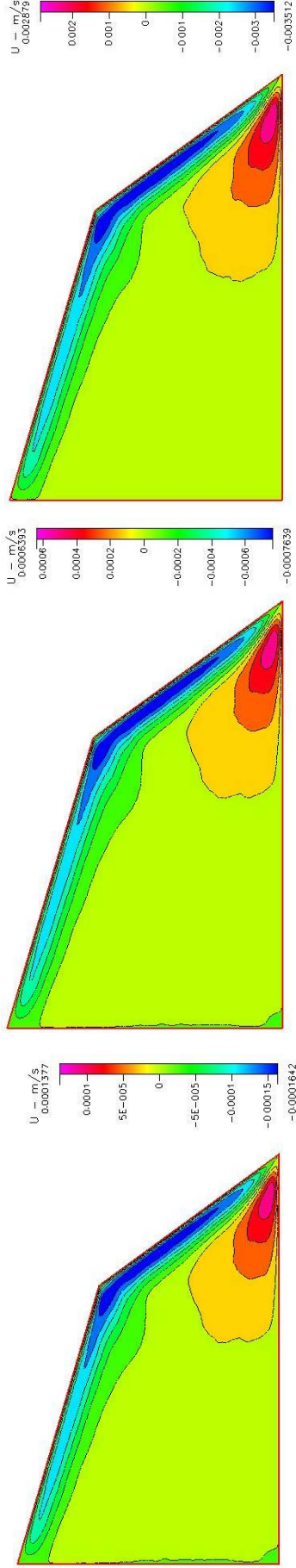
**e)  $Ra=5 \times 10^6$**



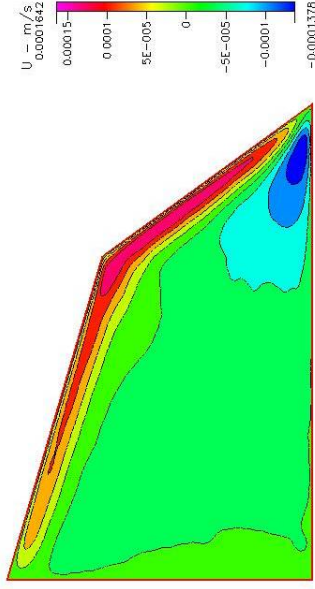
**f)  $Ra=10^7$**

Beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında y yönündeki sabit hız çizgileri (Kış sezonu)

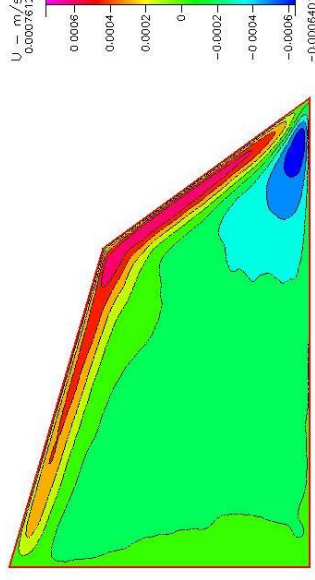
## EK2.b. MANSART ÇATI İÇİN HIZ GRAFİKLERİ



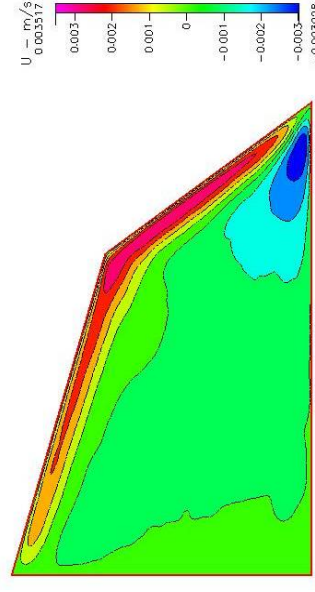
Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında x yönündeki sabit hız çizimleri (Yaz sezonu)



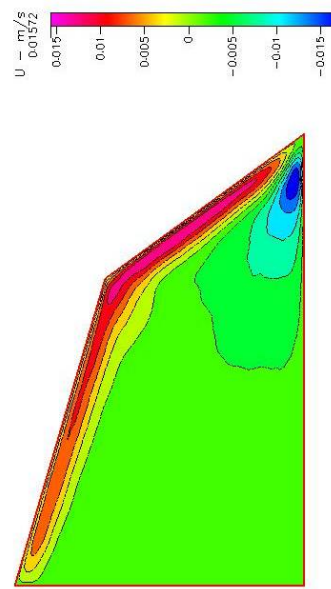
**a)  $Ra=10^3$**



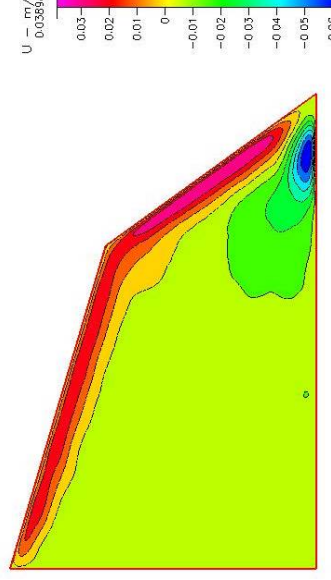
**b)  $Ra=10^4$**



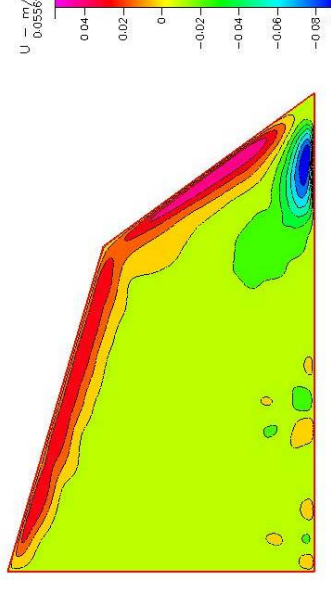
**c)  $Ra=10^5$**



**d)  $Ra=10^6$**

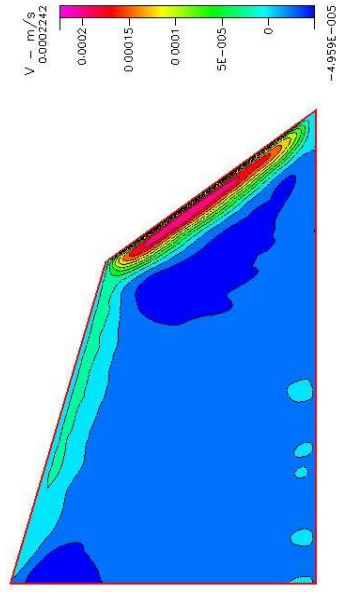


**e)  $Ra=5 \times 10^6$**

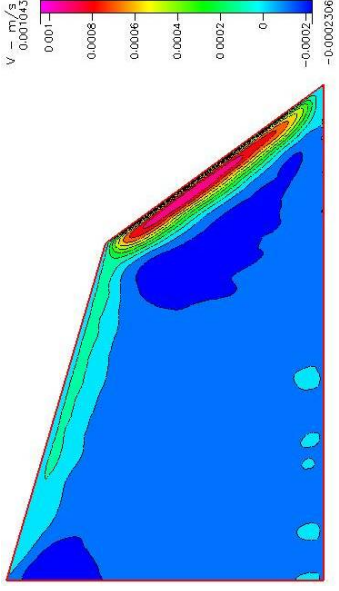


**f)  $Ra=10^7$**

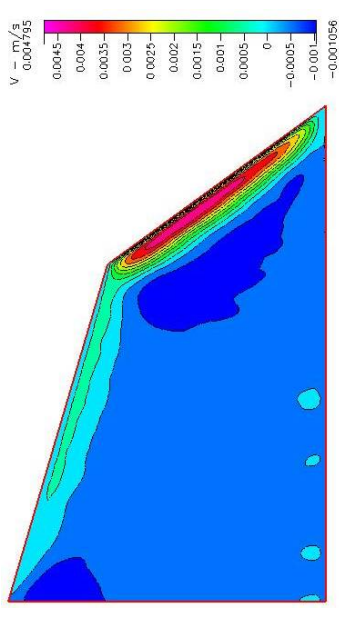
Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında x yönündeki sabit hız çizgileri (Kış sezonu)



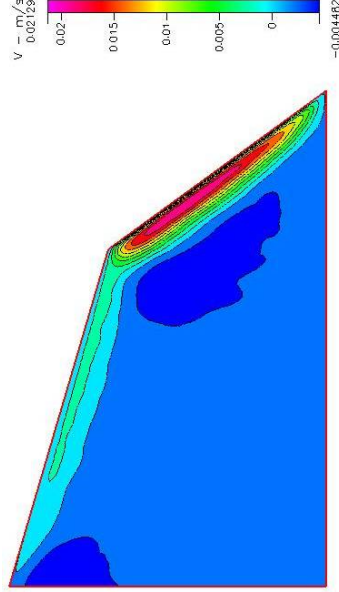
**a)  $Ra=10^3$**



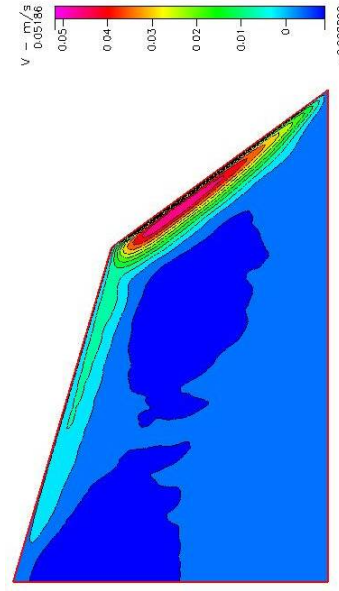
**b)  $Ra=10^4$**



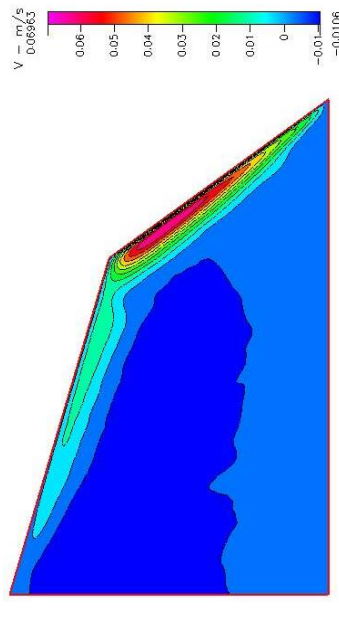
**c)  $Ra=10^5$**



**d)  $Ra=10^6$**

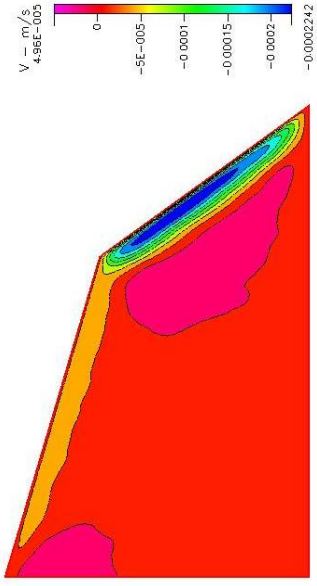


**e)  $Ra=5 \times 10^6$**

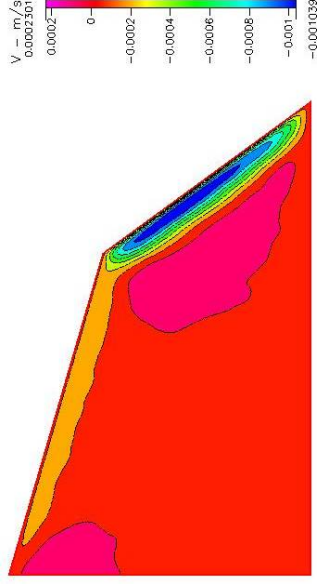


**f)  $Ra=10^7$**

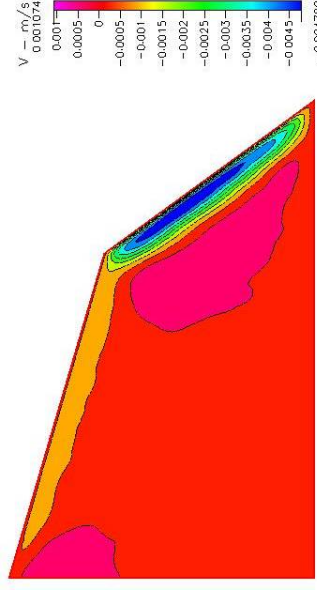
Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında y yönündeki sabit hız çizgileri (Yaz sezonu)



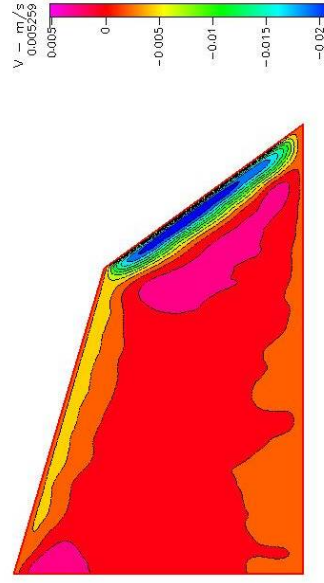
**a)  $Ra=10^3$**



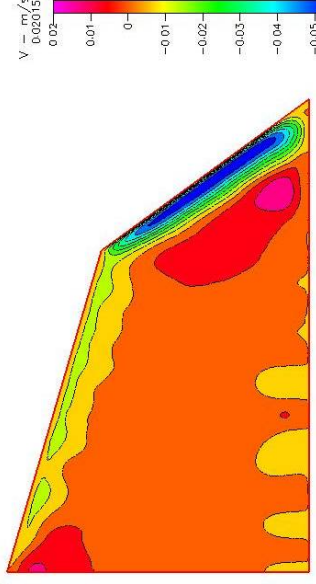
**b)  $Ra=10^4$**



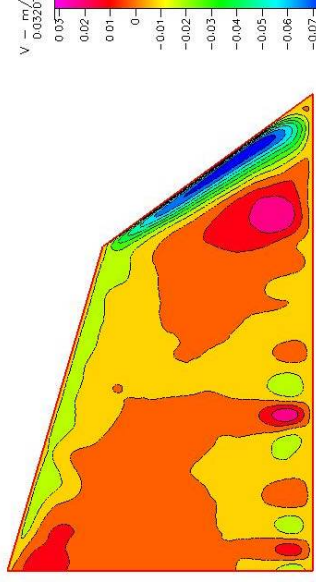
**c)  $Ra=10^5$**



**d)  $Ra=10^6$**



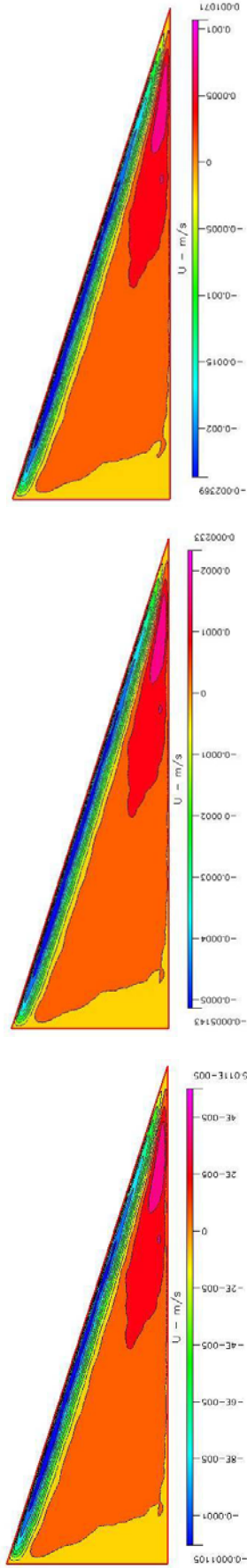
**e)  $Ra=5 \times 10^6$**



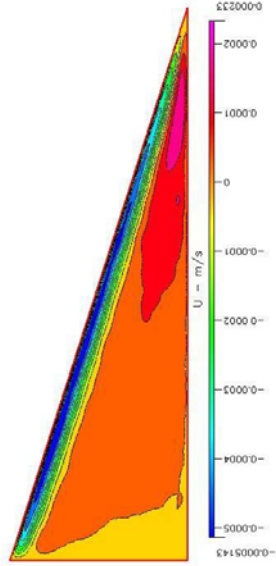
**f)  $Ra=10^7$**

Mansart çatı için farklı Rayleigh sayılarında y yönündeki sabit hız çizgileri (Kış sezonu)

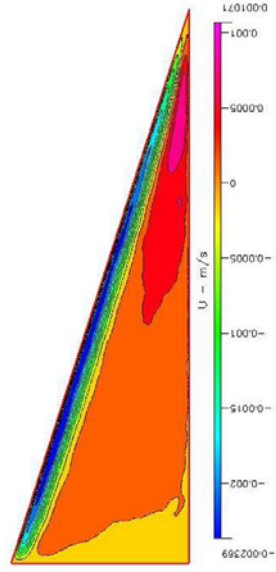
## EK2.c. SUNDURMA ÇATI İÇİN HIZ GRAFİKLERİ



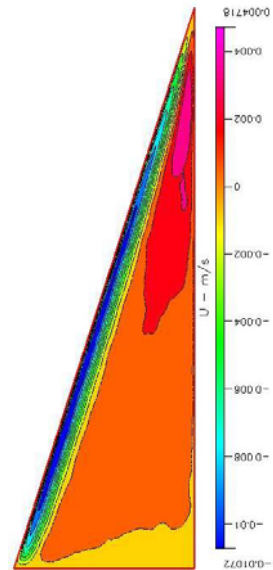
a)  $Ra=10^3$



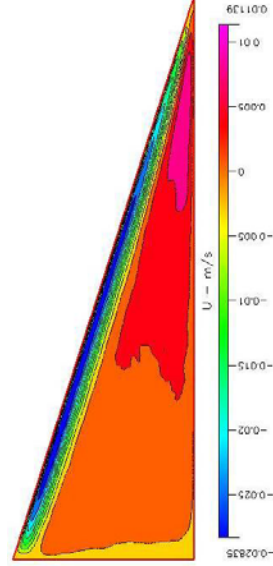
b)  $Ra=10^4$



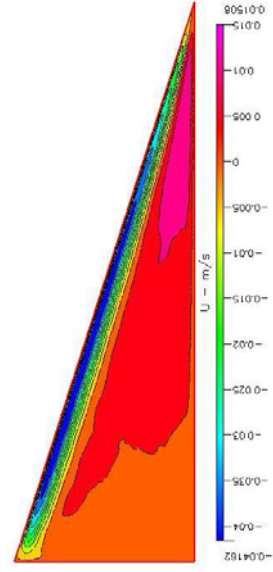
c)  $Ra=10^5$



d)  $Ra=10^6$

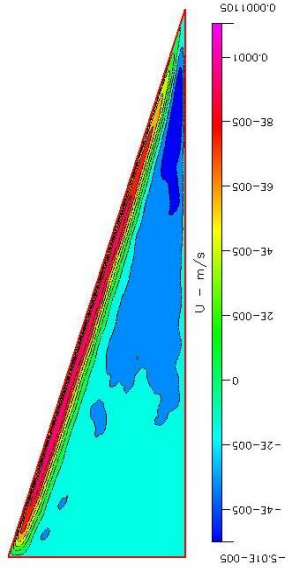


e)  $Ra=5 \times 10^6$

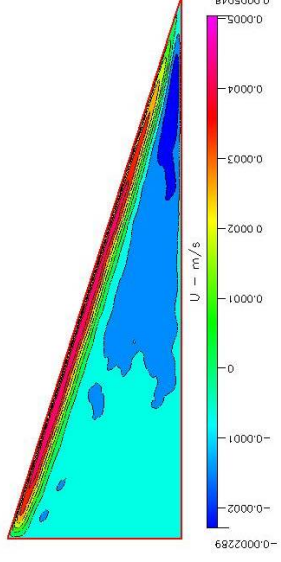


f)  $Ra=10^7$

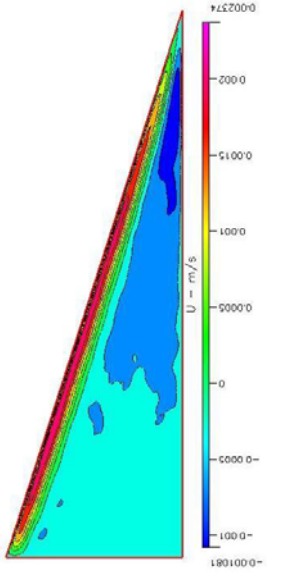
Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında x yönündeki sabit hız çizgileri (Yaz sezonu)



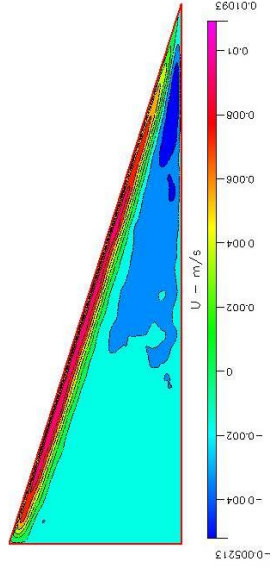
**a)  $Ra=10^3$**



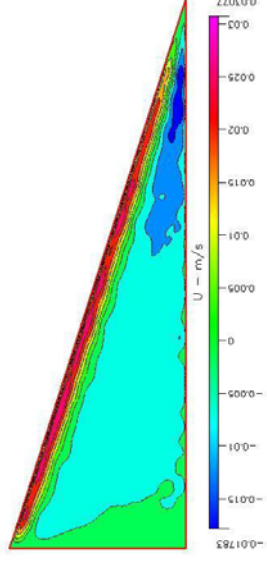
**b)  $Ra=10^4$**



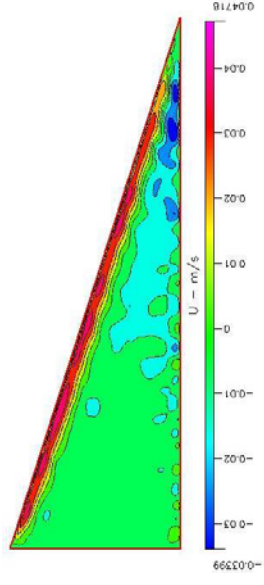
**c)  $Ra=10^5$**



**d)  $Ra=10^6$**

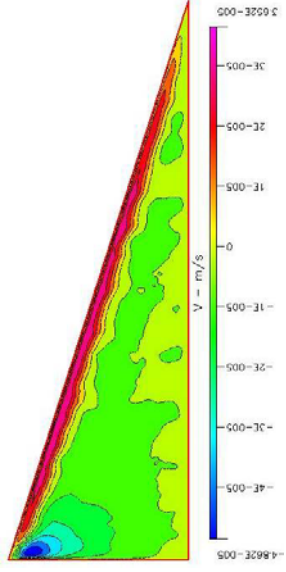


**e)  $Ra=5 \times 10^6$**

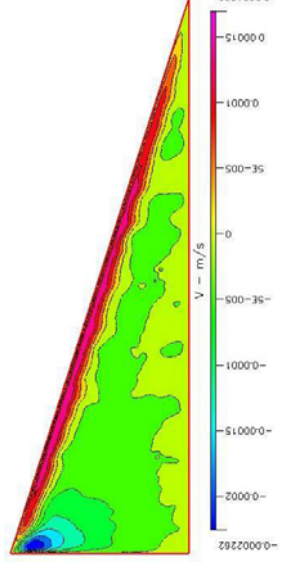


**f)  $Ra=10^7$**

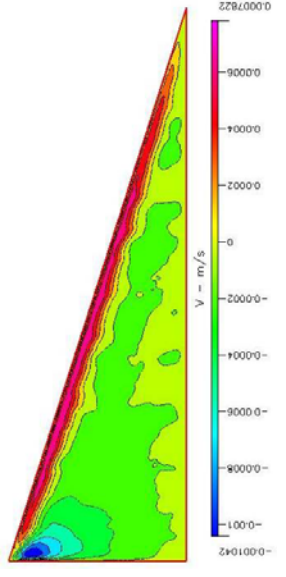
Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında x yönündeki sabit hız çizgileri (Kış sezonu)



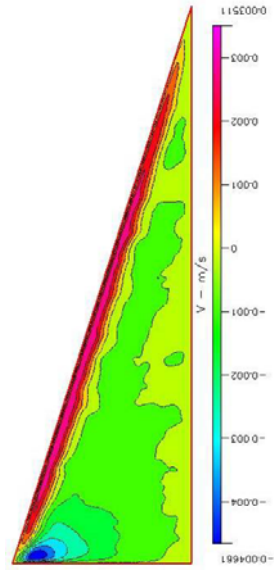
a)  $Ra=10^3$



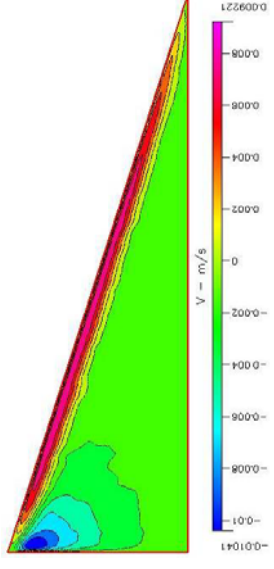
b)  $Ra=10^4$



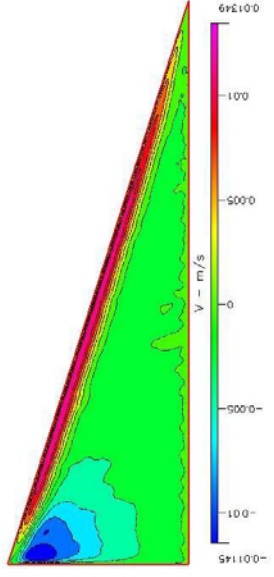
c)  $Ra=10^5$



d)  $Ra=10^6$

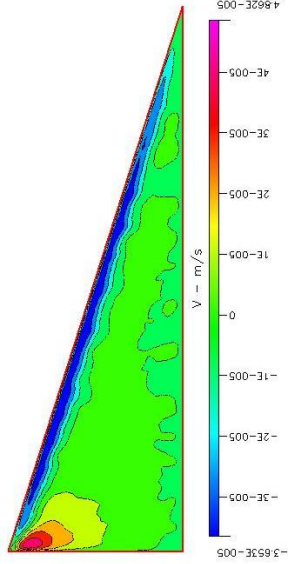


e)  $Ra=5 \times 10^6$

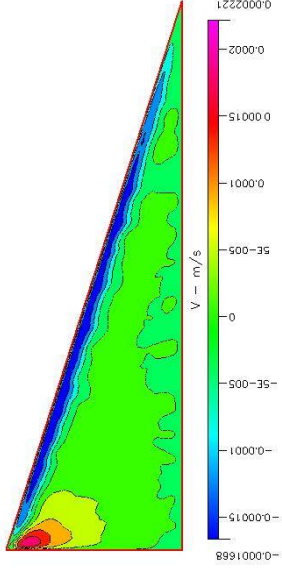


f)  $Ra=10^7$

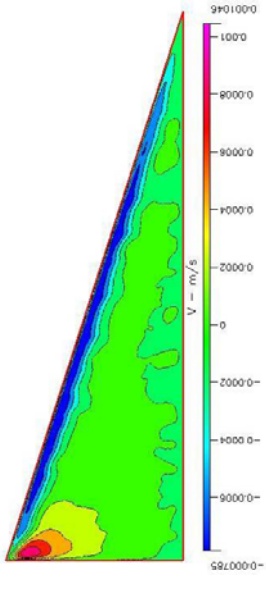
Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında y yönündeki sabit hız çizgileri (Yaz sezonu)



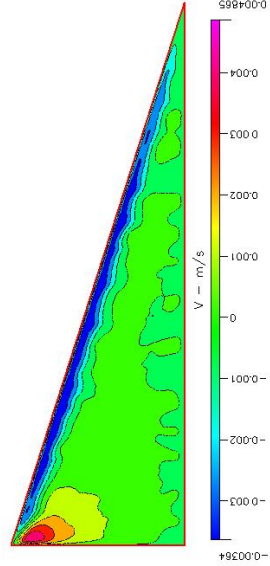
**a)  $Ra=10^3$**



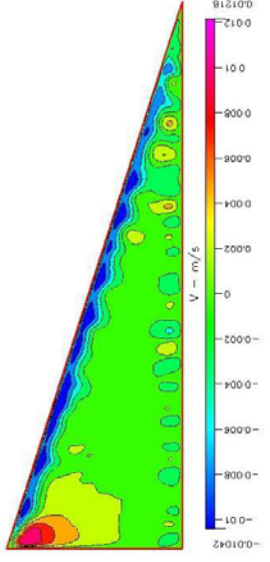
**b)  $Ra=10^4$**



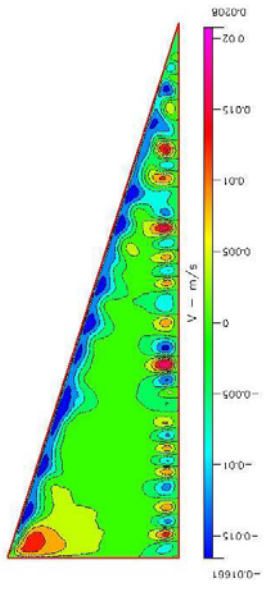
**c)  $Ra=10^5$**



**d)  $Ra=10^6$**



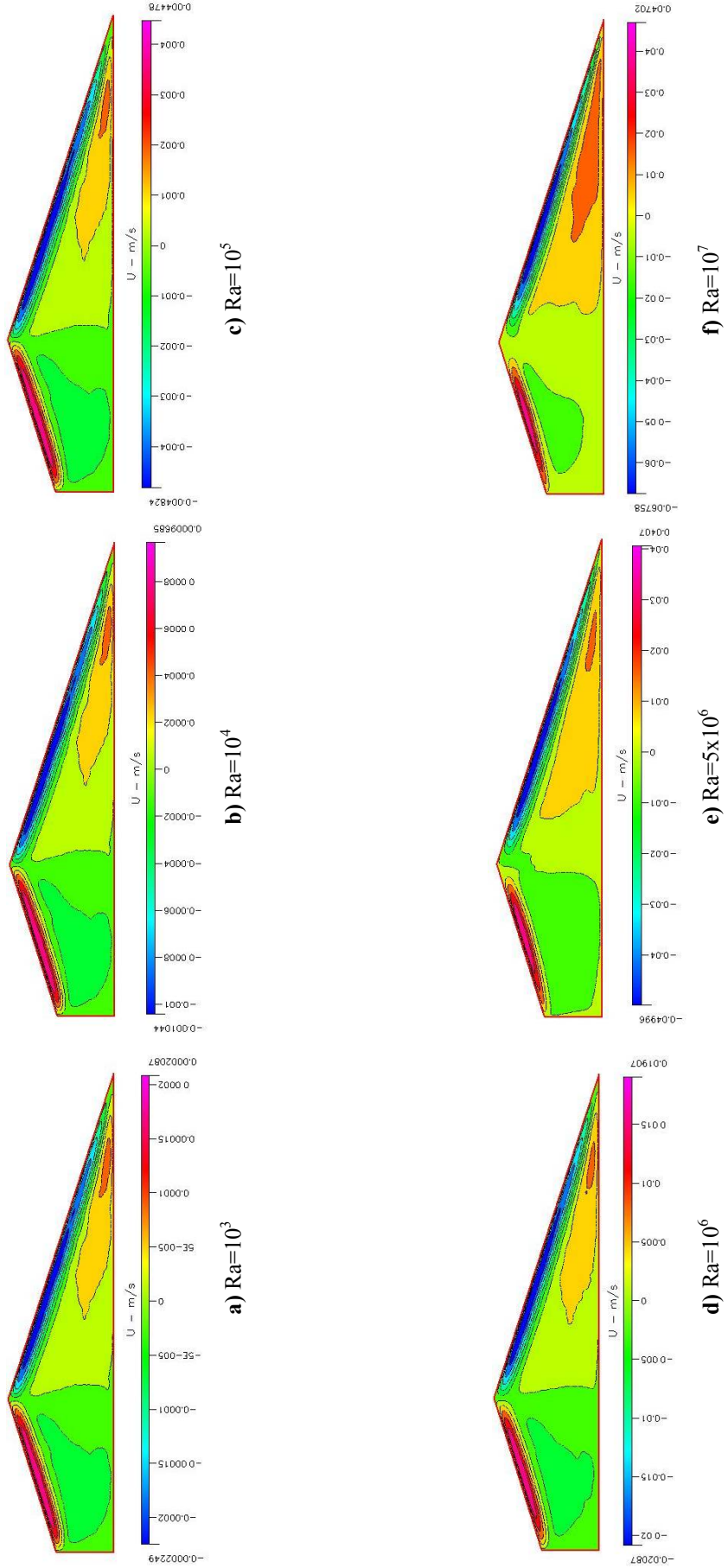
**e)  $Ra=5 \times 10^6$**



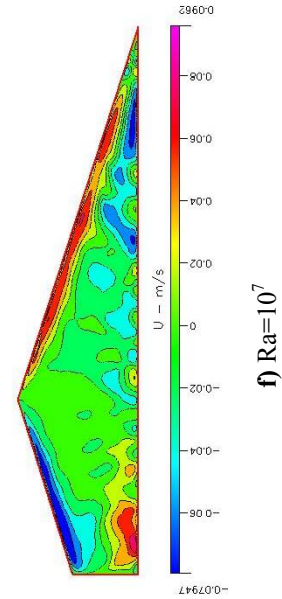
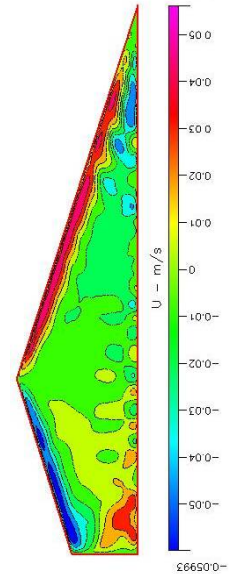
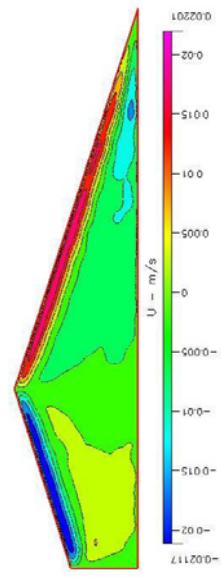
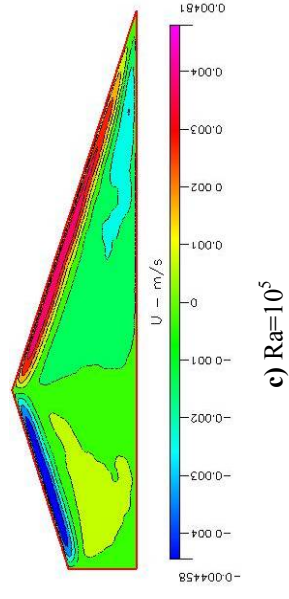
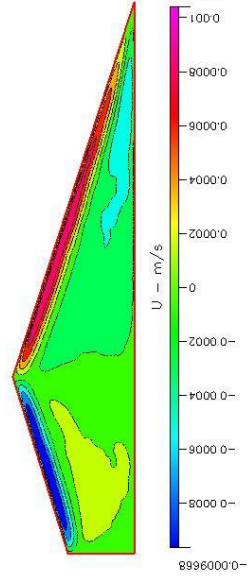
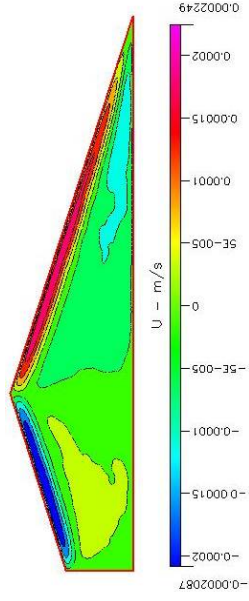
**f)  $Ra=10^7$**

Sundurma çatı için farklı Rayleigh sayılarında y yönündeki sabit hız çizgileri (Kış sezonu)

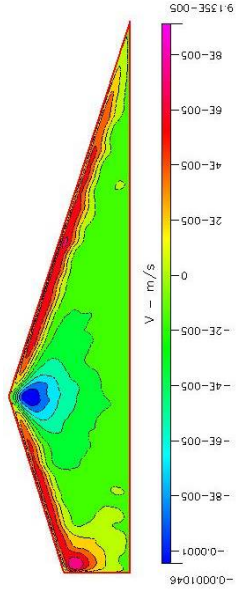
## EK2.d. FARKLI YÜZEY ALANLI BEŞİK ÇATI İÇİN HIZ GRAFİKLERİ



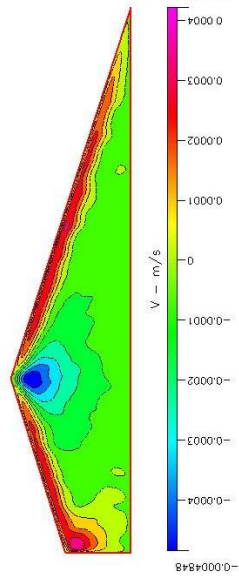
FYAB beşik çatı için farklı Rayleigh sayılarında x yönündeki sabit hız çizgileri (Yaz sezonu)



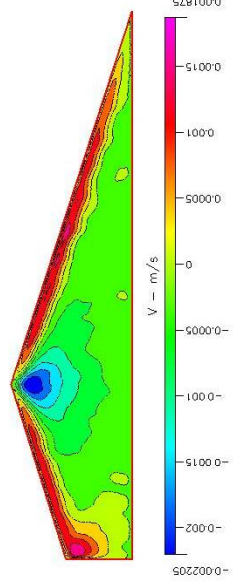
FYAB çatı için farklı Rayleigh sayılarında x yönündeki sabit hız çizgileri (Kış sezonu)



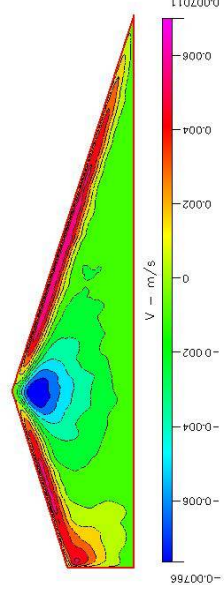
a)  $Ra=10^3$



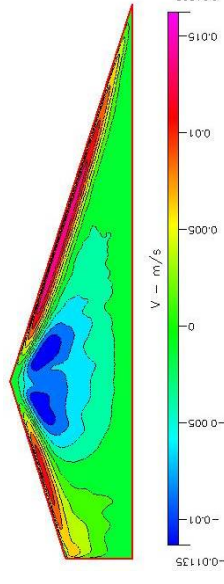
b)  $Ra=10^4$



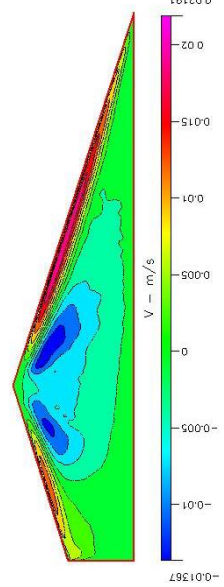
c)  $Ra=10^5$



d)  $Ra=10^6$

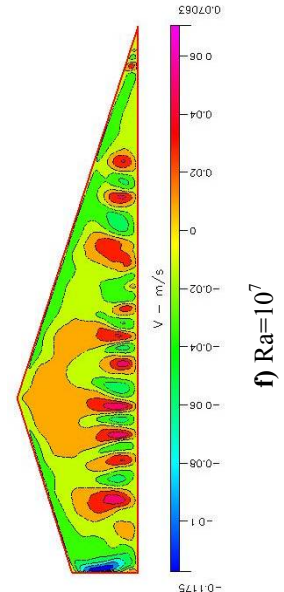
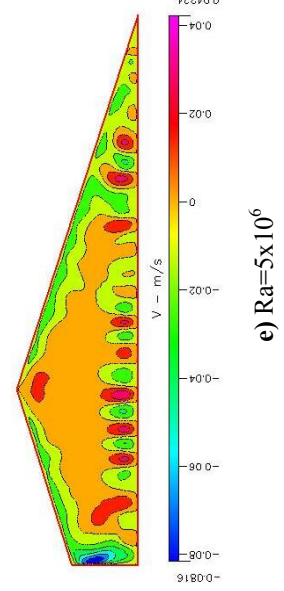
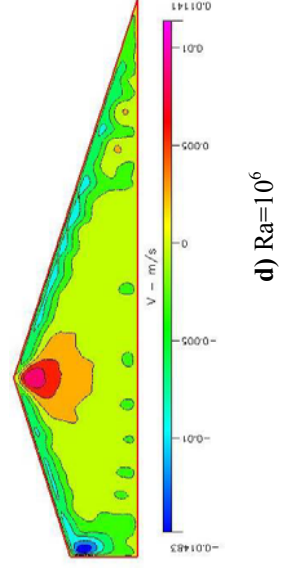
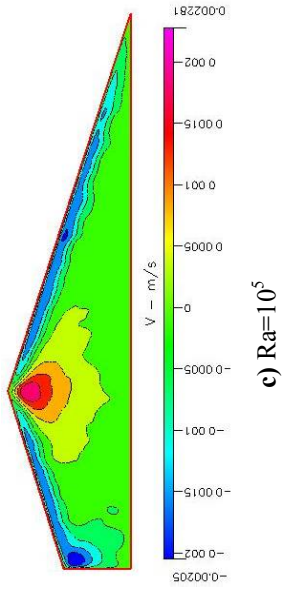
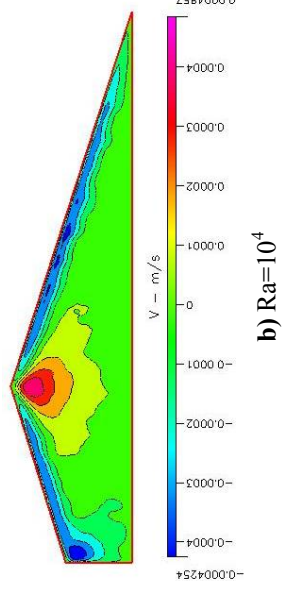
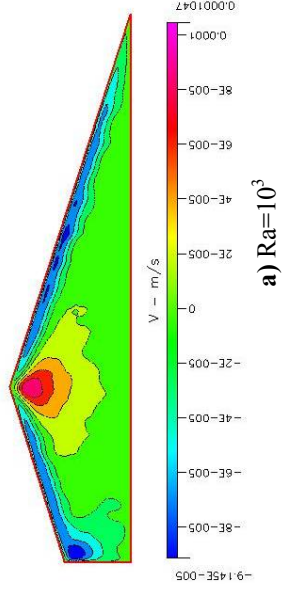


e)  $Ra=5 \times 10^6$



f)  $Ra=10^7$

FYAB çatı için farklı Rayleigh sayılarında y yönündeki sabit hız çizgileri (Yaz sezonu)



FYAB çatı için farklı Rayleigh sayılarında y yönündeki sabit hız çizgileri (Kış sezonu)