

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KANATLI BORULU BİR ISI EŞANJÖRÜNDEKİ ISI  
GEÇİŞİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Makine Mühendisi Hatice CANBAZ

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı:** Prof. Dr. Oktay ÖZCAN (YTÜ)

**İSTANBUL, 2011**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                 | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ .....                                                             | iv    |
| KISALTMA LİSTESİ .....                                                          | v     |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                             | vi    |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                                           | viii  |
| ÖNSÖZ .....                                                                     | ix    |
| ÖZET .....                                                                      | x     |
| ABSTRACT .....                                                                  | xi    |
| 1. GİRİŞ .....                                                                  | 1     |
| 1.1 Plakalı Çapraz Akımlı Yüzeyle Isı Değıştiriciler (Plakalı Eşanjörler) ..... | 3     |
| 1.2 Kanatlı – Borulu Çapraz Akımlı Yüzeyle Isı Değıştiriciler .....             | 4     |
| 1.3 Kanatlı Borulu Isı Değıştiricilerin Özellikleri .....                       | 5     |
| 1.4 Bataryayı Oluşturan Parçalar ve İşlemler .....                              | 6     |
| 1.4.1 Aynalar .....                                                             | 7     |
| 1.4.2 Kapaklar .....                                                            | 7     |
| 1.4.3 Borular .....                                                             | 8     |
| 1.4.4 Kanatlar .....                                                            | 8     |
| 1.4.5 Kurve, Köprü ve Uçlar .....                                               | 9     |
| 1.4.6 Kollektör ve Bağlantılar .....                                            | 10    |
| 1.4.7 Devreleme .....                                                           | 11    |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                                  | 12    |
| 3. SAYISAL YÖNTEMLER VE YÖNETİCİ DENKLEMLER .....                               | 23    |
| 3.1 Yönetici Denklemler .....                                                   | 25    |
| 3.2 Çözüm Ağının Oluşturulması .....                                            | 26    |
| 3.3 Yönetici Denklemlerin Ayrıklaştırılması .....                               | 27    |
| 4. SAYISAL ÇÖZÜMLER .....                                                       | 29    |
| 4.1 Düz Lamel Modelinin Oluşturulması .....                                     | 30    |
| 4.2 Düz Lamel Modelinde Ağ Oluşturma .....                                      | 31    |
| 4.3 Dalgalı Lamel Modelinin Oluşturulması .....                                 | 32    |
| 4.4 Dalgalı Lamel Modelinde Ağ Oluşturma .....                                  | 34    |
| 4.5 Patlatmalı Lamel Modelinin Oluşturulması .....                              | 35    |
| 4.6 Patlatmalı Lamel Modelinde Ağ Oluşturma .....                               | 37    |
| 4.7 Sayısal Çözüm .....                                                         | 38    |
| 4.8 Çözüm Sonuçları .....                                                       | 40    |
| 4.8.1 Düz Lamel Formu Çözümleri .....                                           | 40    |
| 4.8.2 Dalgalı Lamel Formu Çözümleri .....                                       | 44    |
| 4.8.3 Patlatmalı Lamel Formu Çözümleri .....                                    | 48    |

|     |                                    |    |
|-----|------------------------------------|----|
| 4.9 | Çözümlerin Değerlendirilmesi ..... | 52 |
| 5.  | SONUÇLAR .....                     | 59 |
|     | KAYNAKLAR.....                     | 60 |
|     | EK- Deney Sonucu .....             | 62 |
|     | ÖZGEÇMİŞ.....                      | 63 |

## SİMGE LİSTESİ

|               |                   |                       |
|---------------|-------------------|-----------------------|
| A             | mm                | Borular arası mesafe  |
| B             | mm                | Sıralar arası mesafe  |
| d             | mm                | Boru dış çapı         |
| E             | j                 | Toplan enerji         |
| H             | mm                | Lameller arası mesafe |
| K             | W/mK              | Isıl iletkenlik       |
| Nu            |                   | Nusselt sayısı        |
| P             | pascal            | Basınç                |
| Q             | W                 | Isı transferi         |
| Re            |                   | Reynolds sayısı       |
| T             | °C                | Sıcaklık              |
| V             | m/s               | Hız                   |
| $\dot{m}$     | kg/s              | Akışkan debisi        |
| $\rho$        | kg/m <sup>3</sup> | Yoğunluk              |
| $\dot{Q}$     | m <sup>3</sup> /h | Hava debisi           |
| $u_i$         | m/s               | Hız vektörü           |
| $\tau_{ij}$   | N/m <sup>2</sup>  | Gerilme tansörü       |
| $\delta_{ij}$ |                   | Kroneker delta        |
| $\mu$         | kg/ms             | Dinamik viskozite     |
| $\Delta P$    | pascal            | Basınç kaybı          |

## KISALTMA LİSTESİ

|     |                                  |
|-----|----------------------------------|
| CFD | Computational Fluid Dynamics     |
| HAD | Hesaplamaalı Akışkanlar Dinamiğı |
| PIV | Particle Image Velocimetry       |

## ŞEKİL LİSTESİ

|            |                                                                                                     |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1  | Aynı Yönlü Paralel Akım.....                                                                        | 2  |
| Şekil 1.2  | Zıt Yönlü Paralel Akım .....                                                                        | 2  |
| Şekil 1.3  | Çapraz Akım .....                                                                                   | 2  |
| Şekil 1.4  | Karışık Akım .....                                                                                  | 3  |
| Şekil 1.5  | Plakalı Çapraz Akımlı Yüzeyle Isı Değiştirici (Plakalı Eşanjör).....                                | 3  |
| Şekil 1.6  | Kanatlı – Borulu Çapraz Akımlı Yüzeyle Isı Değiştirici .....                                        | 4  |
| Şekil 1.7  | Kanatlı Borulu Bir Isı Değiştiricide Isı Geçiş Şekilleri .....                                      | 5  |
| Şekil 1.8  | Spiral ve Düz Dikdörtgen Kanatlı Borunun Şematik Resmi.....                                         | 6  |
| Şekil 1.9  | Bataryayı Oluşturan Parçalar .....                                                                  | 7  |
| Şekil 1.10 | Lamel Formları Görünüşleri (Düz, Dalgalı ve Patlatmalı Lamel Formları) .....                        | 9  |
| Şekil 1.11 | Bataryaların Devrelenmesinde Bağlantı Parçası Olarak Kullanılan Elemanlar ...                       | 9  |
| Şekil 1.12 | Isı değiştiricisini oluşturan temel malzemeler: boru, lamel ve kurve dizilişleri                    | 10 |
| Şekil 1.13 | Kanatlı borulu ısı değiştiricisinde kullanılan kollektör şematik görünümü .....                     | 10 |
| Şekil 1.14 | Kollektöre Uç Boru Yuvası Açma Yöntemleri .....                                                     | 11 |
| Şekil 1.15 | Devrelemeye ait görünüş.....                                                                        | 11 |
| Şekil 2.1  | Isı değiştiricisi batarya geometrisi genel görünüşü .....                                           | 17 |
| Şekil 2.2  | Yüksek Verimli ve Düşük Verimli Bölgelerin Borular ve Sıralar Arasındaki Mesafelerle Değişimi ..... | 18 |
| Şekil 2.3  | Boru dizisi (şaşırtmalı,düz) .....                                                                  | 18 |
| Şekil 2.4  | Dalgalı lamel formu görünüşü.....                                                                   | 20 |
| Şekil 2.5  | Patlatmalı lamel formu görünüşü .....                                                               | 21 |
| Şekil 2.6  | Çeşitli patlama yüzeyine sahip lamel formları .....                                                 | 21 |
| Şekil 3.1  | Akışkanlar dinamiğinin “Üç Boyutu” Anderson (1995).....                                             | 23 |
| Şekil 3.2  | Sayısal çözüm adımları .....                                                                        | 24 |
| Şekil 3.3  | Yapısız(a) ve Yapılı(b) Ağ Yapıları.....                                                            | 26 |
| Şekil 3.4  | Üç boyutlu ağ yapısı çeşitleri .....                                                                | 27 |
| Şekil 3.5  | Skewness değerinin ölçülendirilmesi .....                                                           | 27 |
| Şekil 4.1  | Lamel formlarına ait genel görünüm.....                                                             | 30 |
| Şekil 4.2  | Düz lamel formuna sahip kontrol hacmi .....                                                         | 30 |
| Şekil 4.3  | Düz lamel formu için oluşturulan ağ yapısı önden görünüşü.....                                      | 32 |
| Şekil 4.4  | Düz lamel formu için oluşturulan ağ yapısı detay görünüşü.....                                      | 32 |
| Şekil 4.5  | Dalgalı lamel formuna sahip kontrol hacmi .....                                                     | 33 |
| Şekil 4.6  | Dalgalı lamel formuna ait genel görünüş .....                                                       | 33 |
| Şekil 4.7  | Dalgalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısı genel görünüşü.....                                  | 35 |
| Şekil 4.8  | Dalgalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısı detay görünüşü.....                                  | 35 |
| Şekil 4.9  | Patlatmalı lamel formuna sahip kontrol hacmi .....                                                  | 36 |
| Şekil 4.10 | Patlatmalı lamel formu genel çizim bilgileri.....                                                   | 36 |
| Şekil 4.11 | Patlatmalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısı önden görünüşü .....                              | 37 |
| Şekil 4.12 | Patlatmalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısı detay görünüşü .....                              | 38 |
| Şekil 4.13 | Düz lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (1 m/s) .                       | 40 |
| Şekil 4.14 | Düz lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (3 m/s) .                       | 41 |
| Şekil 4.15 | Düz lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (1 m/s) .....                                             | 41 |
| Şekil 4.16 | Düz lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (3 m/s) .....                                             | 42 |
| Şekil 4.17 | Düz lamel çözümündeki basınç konturleri (1 m/s) .....                                               | 42 |
| Şekil 4.18 | Düz lamel çözümündeki basınç konturleri (3 m/s) .....                                               | 43 |
| Şekil 4.19 | Düz lamel çözümündeki hız konturleri (1 m/s).....                                                   | 43 |
| Şekil 4.20 | Düz lamel çözümündeki hız konturleri (3 m/s).....                                                   | 44 |
| Şekil 4.21 | Dalgalı lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (1 m/s) .....               | 44 |

|            |                                                                                      |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.22 | Dalgalı lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (3 m/s)      | 45 |
| Şekil 4.23 | Dalgalı lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (1 m/s)                                | 45 |
| Şekil 4.24 | Dalgalı lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (3 m/s)                                | 46 |
| Şekil 4.25 | Dalgalı lamel çözümündeki basınç konturleri (1 m/s)                                  | 46 |
| Şekil 4.26 | Dalgalı lamel çözümündeki basınç konturleri (3 m/s)                                  | 47 |
| Şekil 4.27 | Dalgalı lamel çözümündeki hız konturleri (1 m/s)                                     | 47 |
| Şekil 4.28 | Dalgalı lamel çözümündeki hız konturleri (3 m/s)                                     | 48 |
| Şekil 4.29 | Patlatmalı lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (1 m/s)   | 48 |
| Şekil 4.30 | Patlatmalı lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (3 m/s)   | 49 |
| Şekil 4.31 | Patlatmalı lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (1 m/s)                             | 49 |
| Şekil 4.32 | Patlatmalı lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (3 m/s)                             | 50 |
| Şekil 4.33 | Patlatmalı lamel çözümündeki basınç konturleri (1 m/s)                               | 50 |
| Şekil 4.34 | Patlatmalı lamel çözümündeki basınç konturleri (3 m/s)                               | 51 |
| Şekil 4.35 | Patlatmalı lamel çözümündeki hız konturleri (1 m/s)                                  | 51 |
| Şekil 4.36 | Patlatmalı lamel çözümündeki hız konturleri (3 m/s)                                  | 52 |
| Şekil 4.37 | Düz, dalgalı ve patlatmalı lamel formlarında oluşan sıcaklık konturleri(3 m/s)       | 53 |
| Şekil 4.38 | Düz, dalgalı ve patlatmalı lamel formlarında oluşan hız konturleri(3 m/s)            | 54 |
| Şekil 4.39 | Üç farklı lamel formunda basınç kaybının giriş hava hızına bağlı değişimi            | 56 |
| Şekil 4.40 | Üç farklı lamel formunda ısı transfer kapasitesinin giriş hava hızına bağlı değişimi | 56 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|             |                                                                                |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1 | Deneysel çalışmalarda kullanılan batarya özellikleri.....                      | 14 |
| Çizelge 2.4 | Yaygın olarak kullanılan şaşırtmalı batarya geometrileri .....                 | 19 |
| Çizelge 4.1 | Düz lamel formunun genel ölçü ve parametreleri.....                            | 31 |
| Çizelge 4.2 | Düz lamel formu için oluşturulan ağ yapısına ait bilgiler .....                | 31 |
| Çizelge 4.3 | Dalgalı lamel formunun genel ölçü ve parametreleri.....                        | 34 |
| Çizelge 4.4 | Dalgalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısına ait bilgiler.....             | 34 |
| Çizelge 4.5 | Patlatmalı lamel formunun genel ölçü ve parametreleri .....                    | 37 |
| Çizelge 4.6 | Patlatmalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısına ait bilgiler .....         | 37 |
| Çizelge 4.7 | Lamel formların sayısal çözümünde kullanılan sınır koşulları .....             | 39 |
| Çizelge 4.8 | Lamel formları sayısal çözüm değerleri: düz, dalgalı ve patlatmalı lamel ..... | 55 |
| Çizelge 4.9 | Test edilen ısı değiştirici ve sayısal çözüm modeli tasarım bilgileri.....     | 57 |

## ÖNSÖZ

Günümüz bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler ve sağladığı kolaylıklar, sayısal yöntemler kullanarak analiz yapan bilgisayar yazılımlarının kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Gün geçtikçe önemi artan araştırma ve geliştirme çalışmalarında güvenilirliğine inanılan bilgiye hızlı ulaşmak çalışmalarda en önemli faktör olmaya başlamıştır. Bu çerçevede ticari ve akademik çalışmalarda yaşanan zaman ve kaynak sıkıntısını güvenilirliğini her geçen gün artan paket programlarının kullanımıyla çözmek olanaklı hale gelmektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) yazılımları özellikle akışkan ve ısı transferi ile ilgili olan ticari ve akademik çalışmalarda sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bu programlar kullanılarak, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri bilgisayar ortamında sayısal olarak çözülebilmektedir. Program sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği, modelin gerçeğe uygunluğu, problemin ve sınır şartlarının doğru tanımlanması ve sonuçların doğru yorumlanması ile doğrudan ilişkilidir. Bu tez çalışmasında sayısal yöntem kullanarak akışkan ve ısı transferi çözümü yapan ve kullanımı en yaygın olan program ANSYS FLUENT ile çözüm yapılacaktır.

Yaklaşık bir yıl süren bu tez çalışmasında, yardımlarını tüm içtenliğiyle sunan sayın hocam Prof.Dr. Oktay ÖZCAN başta olmak üzere, çalışmalarında bana destek olan Friterm Termik Cihazlar A.Ş.'ye, Fluent eğitimi konusunda destek veren FİGES A.Ş.'ye ve bana her konuda maddi ve manevi destek olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

.

## ÖZET

Kanatlı borulu ısı değıştiricisinde ısı geçişi, borular içerisinde konveksiyon, boru-kanat temas yüzeylerinde kondüksiyon ve kanat ile üzerinden geçen hava arasında konveksiyon ile gerçekleşmektedir. Bu tez çalışmasında, kanatlı borulu ısı değıştiricisinde meydana gelen karmaşık ısı transferi mekanizmasının sayısal özömlemesi gerçekleştirilmiştir.

Sayısal modelleme sırasında FLUENT hesaplamalı akışkanlar dinamiğı (HAD) paket programı kullanılmıştır. Literatürde kanatlı borulu ısı değıştiricileri için verilen farklı sınır koşulları yaklaşımları değeriendirilmiş ve en uygun sınır koşulu kabulünde sayısal özömler yapılmıştır. Yapılacak sayısal özömlerde ısı değıştiricisi kanadının bir kısmı modellenmiş ve 3 farklı lamel formunun ısı transferi ve basınç kaybına olan etkisi ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Test düzeneğinde yapılacak olan çalışmadan elde edilen sonuçlarla sayısal modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kanatlı borulu ısı değıştiricisi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğı (HAD), Konjuge ısı transferi

## **ABSTRACT**

The heat transfer of finned and tube heat exchanger is tubes conductive heat transfer, the tubes to fin convection heat transfer and fin to air convective heat transfer. The present numerical study has been carried out to investigate conjugate heat transfer mechanism in finned and tube heat exchanger.

In the numerical application, the available computational fluid dynamics (CFD) package FLUENT has been used. In literature investigation has been evaluated which boundary condition is more useful in finned and tube heat exchanger, and that condition has been used in numerical application. The model of heat exchanger is only a small part fin and three different fin type were studied for heat transfer and pressure drop effect. The test result has been compared present numerical results.

**Keywords:** Finned and tube heat exchanger, Computational Fluid Dynamics (CFD), Conjugated heat transfer

## 1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarının en önemli ve en çok karşılaşılan işlemlerinden birisi, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı değişimidir. Bu değişimin yapıldığı cihazlar, genelde ısı değiştirici olarak adlandırılmakta olup, pratikte termik santrallerde, kimya endüstrilerinde, ısıtma, iklimlendirme, soğutma tesisatlarında, taşıt araçlarında, elektronik cihazlarda, alternatif enerji kaynaklarının kullanımında, ısı depolanması vb. birçok yerde bulunabilmektedir. Pratikte, kullanılan bu ısı değiştiricilerine en basit örnek birbirinden katı bir cidar ile ayrılan iki akışkan arasındaki ısı geçişidir.

Isı değiştiricileri, kullanım amacına, ısı geçiş türüne, akışkan sayısına, akışkanın faz değişimlerine, akış türüne ve konstrüksiyon yapısına göre sınıflandırılabilirler. Mühendislik uygulamalarında çok değişik tiplerde bulunabilen ısı değiştiricilerinin, kullanıldığı alana göre dizaynı ve optimizasyonu büyük önem taşımaktadır. Isı değiştiricilerinin dizaynı ve optimizasyonunda pek çok parametre etkilidir. Isı değiştiricinin konstrüksiyonu, performans parametreleri (sıcaklıklar, debiler, basınç düşümleri), akışkanların tipleri, fazları, ekonomik faktörleri, ısı geçiş mekanizması, ısı değiştiricilerinin tasarımında ve verimli bir şekilde kullanılmasında etkilidir.

Isı değiştiricileri endüstrinin en önemli ısı tekniği cihazları olup buharlaştırıcı, yoğusturucu, ısıtıcı, soğutucu gibi değişik adlar altında kullanılmaktadırlar. Isı değiştiricileri, malzeme, mukavemet, termodinamik, akışkanlar mekaniği ve ısı geçişi bilim dallarının hepsini içeren çok iyi bir uygulamadır.

Isı değiştiricileri ısı transfer prosesine göre temel olarak yüzeyli ısı değiştiricileri, karışımli ısı değiştiricileri ve rejeneratif ısı değiştiriciler olmak üzere 3 ana başlıkta toplanabilir.

1. Yüzeyli Isı Değiştiricilerinde, akışkanlar, değiştiricinin birbirinden ayrılmış (sınırlandırılmış) bölgelerinden aynı anda geçerek ısı alışverişi yaparlar.
2. Karışımli Isı Değiştiricilerinde, akışkanların değiştirici içinde karışarak ısı alışverişi yaparlar.
3. Rejeneratörlerde, akışkanlar sıra ile kanallardan geçerken sıcak olan akışkanın bıraktığı ısıyı soğuk olan alır.

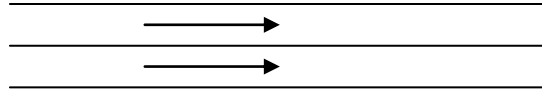
Bu tezin konusu kapsamında incelenecek kanatlı borulu ısı değiştiricileri yüzeyli ısı değiştiricisidir. Kanatlı borulu ısı değiştiricileri otomatik olarak hazırlanmış bakır veya alüminyum kanat bloğu içine düz veya “u” şeklinde kıvrılmış boru yerleştirilmesi ile imal

edilirler. Boru çapları mekanik olarak genişletilerek boru ve kanatların birbirine sıkı temas etmesi sağlanır. Boru şişirme işlemi olarak adlandırılan bu işlem ısı akışının gerçekleşmesi ve ısı değiştircisinin verimliliği açısından onemlidir. şişirme işlemi ardından borular devreleme şeması gereğince kurve ve kr adı verilen kıvrımlı borularla birbirine sert lehimlenir. Boruların içinde yol alacak akışkanın ısı değiştircisine girişinde ve boru devrelerine ayrılmasında kullanılan genel adlandırılması manifold olmakla birlikte bu tip ısı değiştircilerinde kollektör olarak adlandırılan giriş ve çıkış kollektörleri boru devre giriş ve çıkışlarına sert lehimlenir. Bu tip ısı değiştircilerinde akışkanlardan birisi kanatlar arasından geçerken, diğer akışkan borulardan geçer ve ısı geçişi sağlanmış olur.

Yüzeyli ısı değiştircilerinde, ısı geçişinin miktarı akışların yönlerine de bağlı olup, yüzeyli ısı değiştircileri yönlerine göre 4 bölüme ayrılırlar.

- Aynı Yönlü Paralel Akım

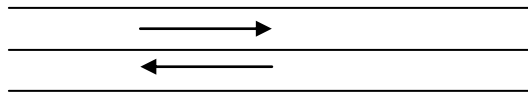
Sıcak ve soğuk akışkanların aynı yönde paralel akmaları sonucu ısı geçişi halidir.



şekil 1.1 Aynı Yönlü Paralel Akım

- Zıt Yönlü Paralel Akım

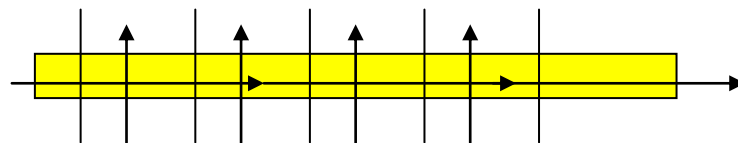
Sıcak ve soğuk akışkanların zıt yönlerde paralel akmaları sonucu ısı geçişi halidir.



şekil 1.2 Zıt Yönlü Paralel Akım

- Çapraz Akım

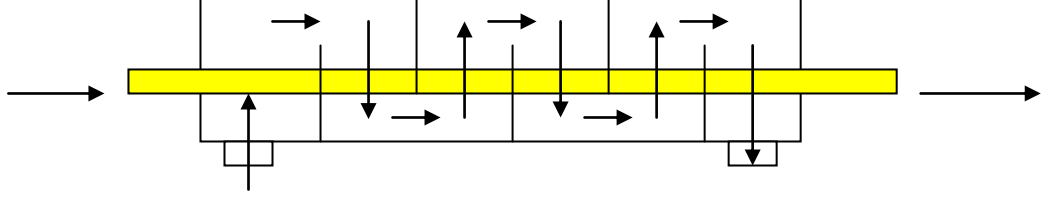
Sıcak ve soğuk akışkanların birbirlerine dik açılarda akmaları sonucu ısı geçişi halidir.



şekil 1.3 apraz Akım

- Karışık Akım

Sıcak ve soğuk akışkanların birbirlerine paralel (aynı veya zıt) yönde ve çapraz akımları sonucu ısı geçişi halidir.



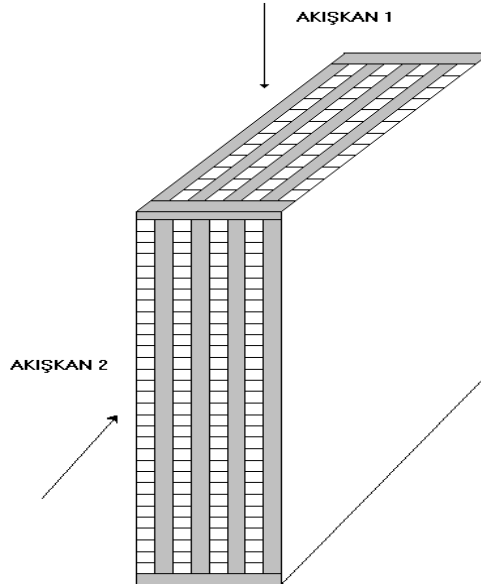
Şekil 1.4 Karışık Akım

### 1.1 Plakalı Çapraz Akımlı Yüzeyli Isı Değiştiriciler (Plakalı Eşanjörler)

Bu tip ısı değiştiricilerde akışkanlar, birbirlerine eksenel olarak dik yerleştirilmiş plakaların içinden geçerek, ısı geçişini gerçekleştirir. Her yatay plakanın arasında bir dik plaka bulunarak, ısı geçişinin artırılması amaçlanmıştır. Burada plakalar arasındaki mesafe, plaka genişliği ve uzunluğu, akışı ve dolayısı ile ısı geçişini etkileyen faktörlerdir.

Bu tip ısı değiştiricilerinde akışkanlar gaz ve sıvı fazında olabilir; katı maddeler kullanılamaz. Uygulama kombinasyonları:

- a) Gaz-Gaz, b) Gaz-Sıvı, c) Sıvı-Sıvı



Şekil 1.5 Plakalı Çapraz Akımlı Yüzeyli Isı Değiştirici (Plakalı Eşanjör)

## 1.2 Kanatlı – Borulu Çapraz Akımlı Yüzeyli Isı Değiştiriciler

Bu tip ısı değiştiricilerinde akışkanlardan birisi kanatlar arasından geçerken, diğer akışkan borulardan geçer ve ısı geçişi sağlanmış olur. Kanat genişliği ve boru grubu ayarlanarak, birden fazla akışkanın birbirlerine ısı geçişi sağlaması sağlanabilir.

Kanatlı–borulu çapraz akımlı yüzeyli ısı değiştiricilerinde akışkanlar gaz ve sıvı olabilir. Belirli şartta katılar da kullanılabilir; örnek olarak buz pateni pisti gösterilebilir. Uygulama kombinasyonları:

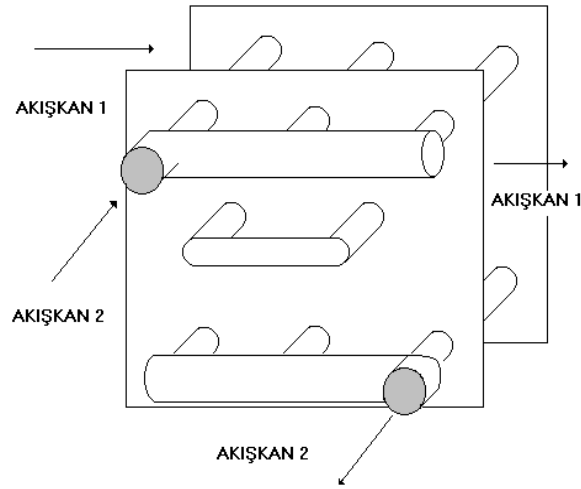
Gaz – Gaz

Gaz – Sıvı

Sıvı – Sıvı

Gaz – Katı

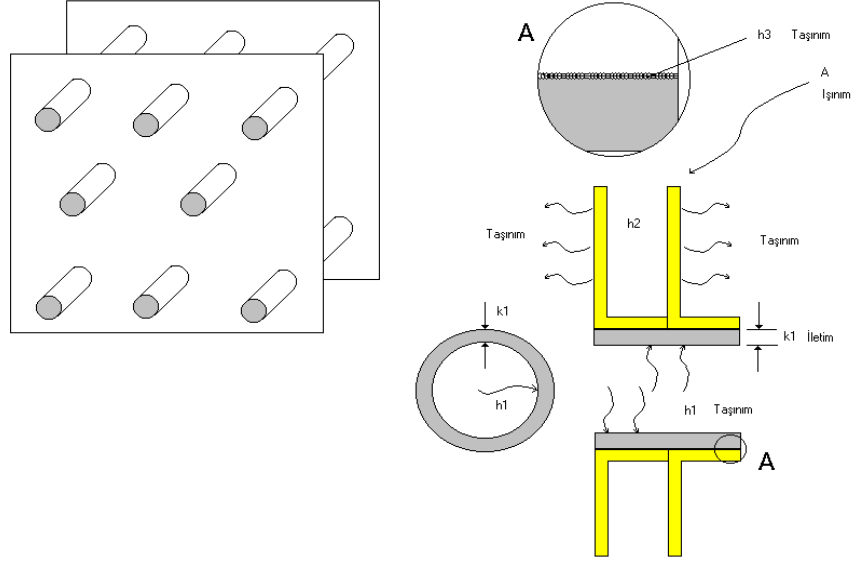
Sıvı – Katı



Şekil 1.6 Kanatlı – Borulu Çapraz Akımlı Yüzeyli Isı Değiştirici

Şekil 1.7’de kanatlı borulu bir ısı değiştiricisinde ısı geçişi şekillerinin şematik gösterimi verilmiştir. Burada boru içindeki akışkanın (sıvı veya gaz) ısı enerjisi, ısı taşınımı vasıtası ile boru iç çeperine geçmektedir. Isı boru iç çeperinden boru dış çeperine ısı iletimi vasıtası ile geçmektedir. Bu aşamada, boru dış çeperinden kanat yüzeyine temas noktalarından ısı iletimi, temas olmayan noktalardan ısı taşınımı ile ısı geçişi sağlanır. Kanat içinde ısı geçişi ısı iletimi vasıtası ile olurken, kanat dış yüzeyi boyunca kanat yüzeyinde hareket eden akışkana ısı

taşınımı ve ısı ışıınımı ile ısı geçişı sağlanır. Tüm bu geçişlerin toplamında, enerjinin korunumu gereği, alınan ve verilen toplam ısılar birbirine eşittir.



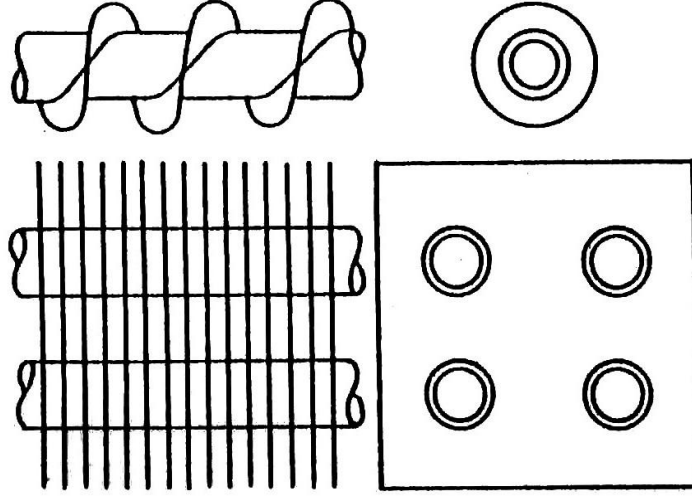
şekil 1.7 Kanatlı Borulu Bir Isı Değiştiricide Isı Geçişi şekilleri

### 1.3 Kanatlı Borulu Isı Değiştiricilerin zellikleri

Havanın şartlandırılması amaçlı olarak ister ısıtma, ister soğutma ve nem alma maksatlı olsun çıplak borulu ya da kanatlı borulu ısı değiştiriciler kullanılabilir; ancak artık uygulamada hemen her eşanjör kanatlı borulu olarak yapılmaktadır.

Çıplak borulu ısı değiştiricilere kıyasla aynı kapasiteyi sağlayan kanatlı borulu ısı değiştiriciler çok daha küçük hacim işgal ederler, daha hafiftirler ve genellikle daha ekonomiktirler. Kanatlı borulu bir ısı değiştiricinin dış yüzey (lamel yüzeyi) i yüzeyin (boru iç yüzeyi) 8-50 misli olabilir.

şekil 1.8’de birisi spiral kanatlı, diğeri düz dikdörtgen kanatlı 2 adet kanatlı boru tipi görülmektedir. Isıtıcı ya da soğutucu akışkan boru içinden geçerken, hava dış yüzeyden kanatlar arasından geçer.



Şekil 1.8 Spiral ve Düz Dikdörtgen Kanatlı Borunun Şematik Resmi

Borular genellikle bakır, alüminyum, çelik, paslanmaz çelik, kızıl pirinç; kanatlar ise genellikle alüminyum, bakır, çelik veya paslanmaz çeliktir. Boruların kanatlara teması genellikle mekanik usullerle sağlanır. Tanımlanan tüm çalışma şartlarında kanat ile boru arasında mükemmel bir mekanik bağ sağlanmış olmalıdır.

Kanatlı borulu ısı değiştiricilerde ısı transferi karmaşıktır. Bu nedenle çıplak borulu bataryaların hesaplarında kullanılan formüller modifiye edilerek kullanılabilirler. Soğutma bataryalarının analizinde ısı transferine ek olarak kütle transferi de hesaba girdiğinden konu daha karmaşık hale gelir.

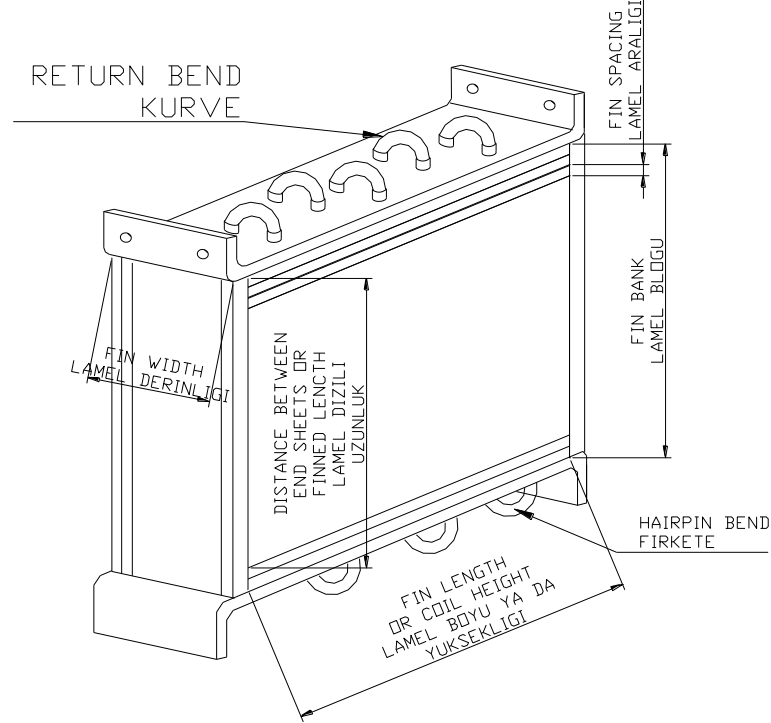
#### 1.4 Bataryayı Oluşturan Parçalar ve İşlemler

Tipik bir kanatlı borulu ısı değiştiricinin yapısı Şekil 1.9’da şematik olarak gösterilmektedir. Şekilde de detaylıca gösterilen her bileşenin ısı değiştiricisindeki işlevi kısaca aktarılacaktır.

- 1) Aynalar
- 2) Kapaklar
- 3) Borular
- 4) Kanatlar
- 5) Kurve, köprü, uç parçaları
- 6) Kollektörler
- 7) Bağlantılar

8) Diğer aksesuarlar

9) Devreleme



Şekil 1.9 Bataryayı Oluşturan Parçalar

#### 1.4.1 Aynalar

Genellikle galvanizli sac veya alüminyumdan, özel hallerde bakır, pirinç veya paslanmaz çelikten yapılır. Kendi içinde 3 bölüme ayırmak mümkündür: Ön ayna, giriş ve çıkış bağlantılarının bulunduğu taraftaki aynadır. Arka ayna, curve ya da köprü bağlantılarının bulunduğu taraftaki aynadır. Ara aynalar, boyu uzun olan bataryalarda sağlamlığı temin için ya da fan v.b. nedenlerle bölümlenme yapmak amacıyla aralara konan bir ya da birden fazla sayıda olan aynalardır.

#### 1.4.2 Kapaklar

Kapaklar batarya alın kesitini alt ve üstten sınırlayarak tariflerler. Böylece hava by-pass'ını önleyerek bataryadan verim alınmasını sağlarlar. Ancak, teknik olarak yapmakta oldukları bu işlevin yanında çoğunlukla konstrüksiyona yönelik görev alırlar. Bataryanın sağlamlığını arttırmak; davlumbaz, fan v.b. elemanları monte etmek amacıyla kullanılırlar. Kapakların, en alt ve üst boruların ayna bükümüne yakınlık nedeniyle iptal edilmemesi için aynalar arasına monte edilmesi tercih edilir. Malzeme olarak ağırlıklı galvanizli sac kullanmakla birlikte,

paslanmaz sac, boyalı - galvaniz sac ya da alüminyum kullanılabilir. Kullanılan malzeme kalınlığı, minimum 0,50 mm, maksimum 3,0 mm'dir.

### **1.4.3 Borular**

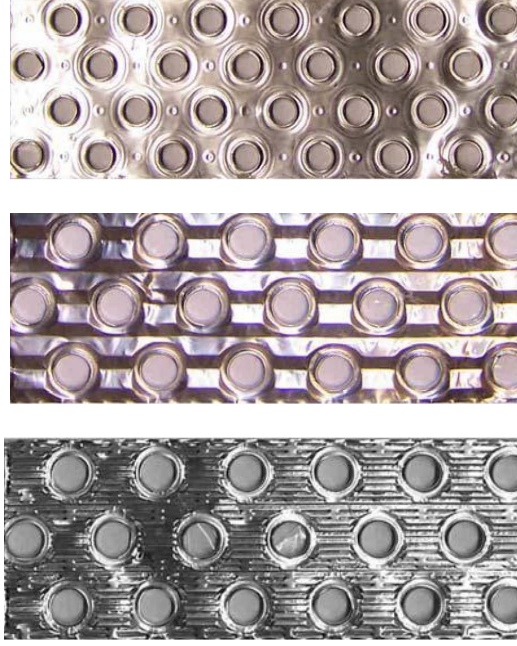
Boru malzemesi; bakır, alüminyum, paslanmaz çelik, çelik ya da kızıl pirinç olabilir. En yaygın kullanım bakır borudur. Bakır borular içten yivli ya da düz yüzeyli olarak kullanılabilir. Boru ısı transfer yüzey alanını artırmak ve boru içindeki akışkanda türbülans oluşturup ısı taşınımını artırmak amacıyla oluşturulan yivler bu yönü ile avantaj sağlamaktadır. Sağladıkları avantaj ısı değiştirici kullanımının buharlaştırıcı ve ya yoğunlaştırıcı olması yönüyle farklılık göstermektedir. Bunun yanında akışkan basınç kaybında yarattıkları artışında göz önüne alınması ve optimum devrelemenin oluşturulması gerekmektedir.

Kullanılan boruların çaplarına bağlı et kalınlıklarının hesaplanması, borular içinde kullanılacak akışkanın çalışma basıncına, kullanılacak borunun özelliklerine bağlı olup, boru et kalınlıkları hesaplamalarına yönelik oluşturulan standartlar yardımıyla hesaplanabilmektedir.

### **1.4.4 Kanatlar**

Malzeme olarak saf alüminyum, epoksi kaplı alüminyum, hidrofilik kaplı alüminyum ve bakır kullanılabilir. En büyük kullanım alüminyum ve kaplamalı alüminyumdur.

Endüstride yaygın olarak kullanılan lamel yüzeyleri düz (plain/flat), dalgalı (wavy) ve patlatmalı (louvered) olmak üzere 3 ana tipte sınıflandırılabilir. Yaygın olmamakla birlikte endüstride farklı lamel formlarının kullanımı ile de karşılaşılabilir. Bu tez çalışmasının inceleme konusu düz, dalgalı ve patlatmalı formlu lamellerin modellenmesi ve FLUENT programında incelenmesi olacaktır. Şekil 1.10'de 3 farklı lamel formunun görüntüsünü yer almaktadır.

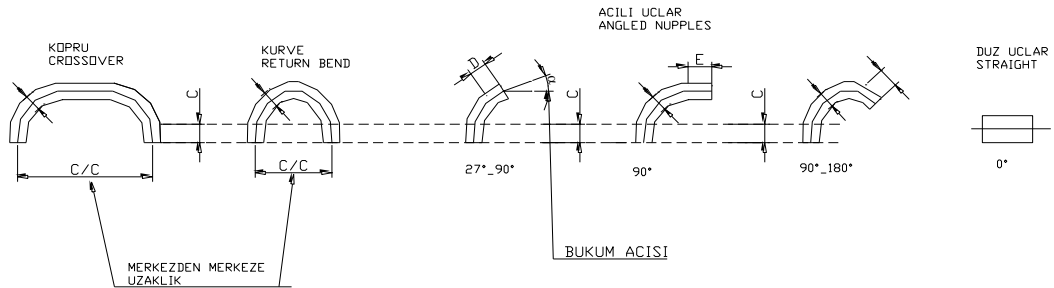


Şekil 1.10 Lamel Formları Görünüşleri (Düz, Dalgalı ve Patlatmalı Lamel Formları)

Lamel aralıkları ısı değiştiricisinin kullanım amacına bağlı olarak 1,2-12,0 mm aralığında değişmektedir. Kullanım alanlarına örnek olarak klima santrallerinde kullanılan kanat aralıkları 1,6-3,2 mm aralığında iken soğutma ve şok dondurucu uygulamalarında 4-12 mm gibi daha büyük kanat aralıkları tercih edilir. Kanat kalınlıkları, ısı değiştiricinin kullanıldığı sıcaklıklara ve kanat aralığına bağlı olmakla birlikte özel taleplere bağlı olarak 0,10-0,40 mm aralığında değişmektedir.

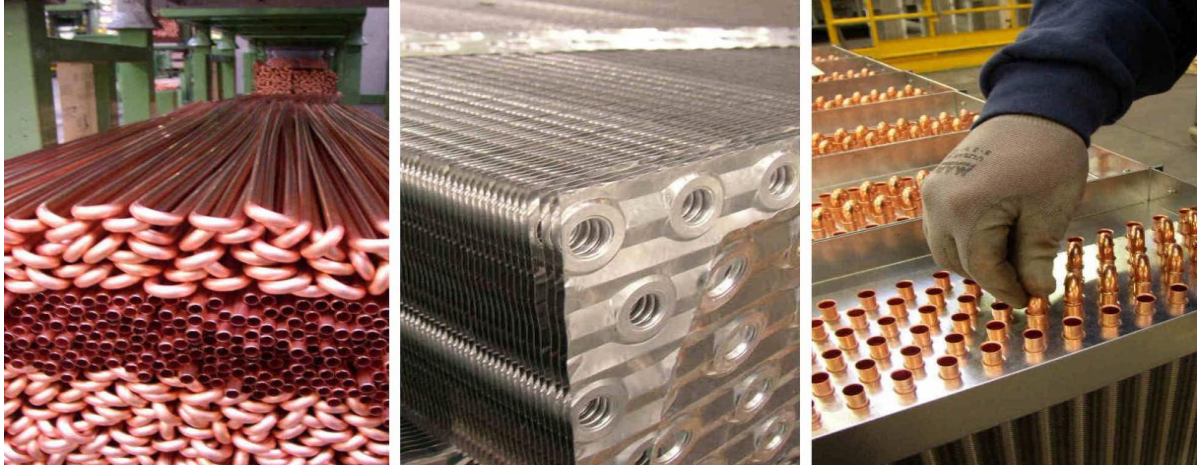
#### 1.4.5 Kurve, Köprü ve Uçlar

Bataryaların devrelenmesinde bağlantı parçası olarak kullanılan elemanlar kurve (return bend); köprü (crossover); düz ve açılı uçlar olarak tanımlanırlar. Bu elemanların tanınması amacıyla oluşturulan Şekil 1.11 aşağıdaki gibidir.



Şekil 1.11 Bataryaların Devrelenmesinde Bağlantı Parçası Olarak Kullanılan Elemanlar

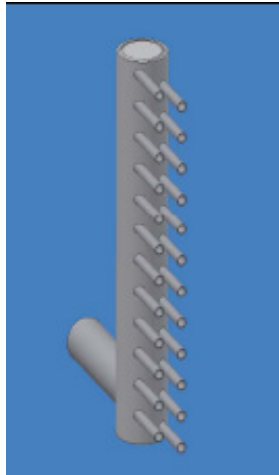
Bir ısı değiştiricisinde boru ve kanatlar ile kurve, köprü, u gibi elemanların montaj aşamaları şekil 1.12’de gösterilmektedir.



şekil 1.12 Isı değiştiricisini oluşturan temel malzemeler: boru, lamel ve kurve dizilişleri

#### 1.4.6 Kollektör ve Bağlantılar

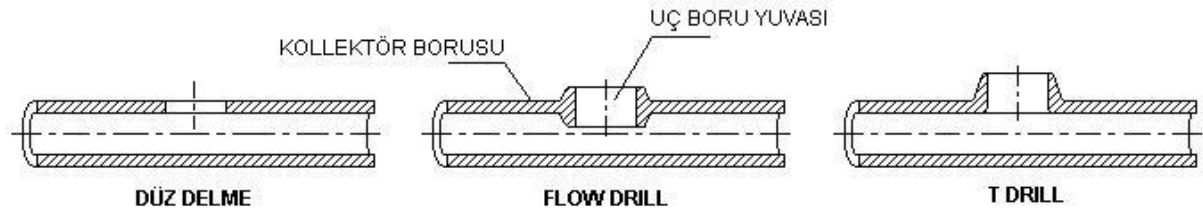
Kollektörler genellikle elik ve bakır borudan yapılmaktadır. Bataryalarda akışkanın dağıtım ve toplama işlevini grrleri. Su bataryalarında elik, buhar ve freon bataryalarında ise bakır boru kollektör olarak tercih edilir. Kollektörler batarya borularına bağlantı uçları ile irtibatlandırılırlar.



şekil 1.13 Kanatlı borulu ısı değiştiricisinde kullanılan kollektör şematik görünümü

Uçların kollektöre girdiği delikler düz delme, Flow Drill ve T Drill yöntemleriyle yapılabilmekte olup bunlardan sağlıklı olanı yaka oluşturan ve birleştirmede daha büyük sağamlık temin eden T Drill ve Flow Drill yöntemleridir. Ancak bu yöntemlerin elik boru

için değil bakır boru için kullanılması elverişli olmaktadır. Her üç yöntemle açılmış deliklerin şematik resmi aşağıya çıkarılmıştır (Şekil 1.14).

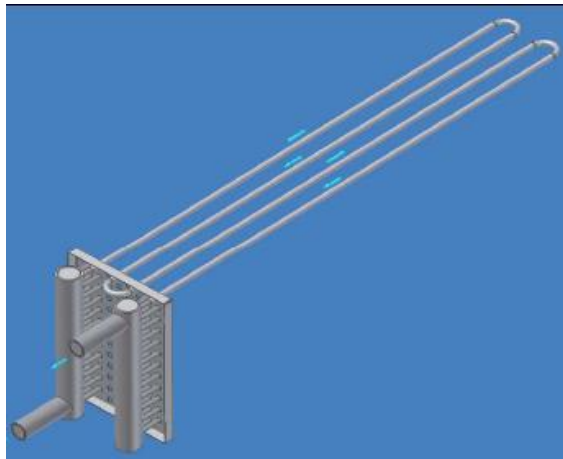


Şekil 1.14 Kollektöre Uç Boru Yuvası Açma Yöntemleri

Kollektöre kaynatılan uçlar bu form sayesinde sağlamlık kazanır. Çelik borularda ise düz delme işlemi uygulanır.

#### 1.4.7 Devreleme

Devre sayısı akışkanın kollektörden sonra kaç boruya dağıtıldığını ifade eder. Bu sayı akışkan hızını belirler. Geçiş sayısı ise her devrenin kaç boruyu dolaşarak bataryayı terk ettiğini belirler. Hız ve kat edilen yol ve dönüşler toplamda bataryada iç akışkandaki basınç kaybını belirler. Ayrıca bataryanın devrelenmesi borular içindeki akışkanın boşaltılmasına ve havasının alınmasına izin verir tarzda olmalıdır. Buhar bataryaları çok daha özel olarak yoğun buharın bataryayı kolayca terk edeceği şekilde bir akış verilerek devrelenir. Freon ya da diğer soğutucu akışkan bataryalarında her devredeki boru sayısının eşitliği faz değişiminin eşit dağılması gerekliliğinden dolayı sulu bataryalara nazaran çok daha büyük öneme sahiptir.



Şekil 1.15 Devrelemeye ait görünüş

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kanatlı borulu ısı değıştiricilerinde ısı ve kütle geçişı, batarya geometrisi parametreleri, çalışma koşulları ve kullanılan akışkanların özellikleri gibi birçok faktörle değışkenlik göstermektedir. Kanatlı borulu ısı değıştiricisi uygulamalarında, gazın düşük ısıl iletkenliğı, dolayısıyla da düşük taşınım katsayısı nedeniyle, genel olarak gaz akışı kanatlı yüzey tarafında gerçekleşir. Böylece, dış taraftaki ısıl direnç kanatlar vasıtasıyla azaltılmaktadır. Amaç, batarya hacmini aynı tutmak şartı ile kanat yüzey alanını dolayısıyla da ısı transferini artırmaktır, bu nedenle birçok araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak verimli kanat formları üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarla geliştirilen kanat formları ile ısı transferi değerlerini iyileştirmek amaçlanırken, çalışmalarda basınç düşümü de dikkate alınarak optimum kanat yüzeyi oluşturulmak istenmektedir. Endüstride yaygın olarak kullanılan kanat formları düz, dalgalı ve patlatmalı olarak adlandırılan lamel formları şeklindedir. Literatürde de yaygın olarak çalışmalar bu kanat formları üzerine yapılmaktadır.

Bu tip ısı değıştiricilerinde hava ile akışkan arasındaki ısı transferi konjuge ısı transferi olması yönü ile çözümü kompleks bir ısı transfer mekanizmasıdır. Bununla birlikte boru tarafında oluşan ısı transferi ve basınç kaybı hesaplamaları, hava tarafında gerçekleşen ısı transferi ve basınç kaybı hesaplamalarına oranla daha az komplekstir ve yapılan birçok araştırma çalışmasıyla daha çok aydınlığa kavuşmuş noktadadır. Bu noktada belirtilmesi gereken bir diğer noktada boru tarafında gerçekleşen akışın iki fazlı olması, akışın tek fazlı olması durumuna oranla daha karmaşık olmasıdır.

Birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarla farklı batarya geometri parametreleri, kanat formları ve çalışma koşullarında hava tarafı ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiğı anlaşılmaya çalışılmaktadır.

Son zamanlarda giderek yaygınlaşan, araştırmacıların ve endüstrinin dizaynları bilgisayar ortamında modellediğı tasarımları ve yapılacak analizin türüne bağılı olarak kullanıma sunulan paket programlar yardımıyla yapabilmesi çalışmalara farklı bir boyut kazandırmıştır. Kanatlı borulu ısı değıştiricileri içinde literatürde karşılaşılan modellemeler ve analizler ısı transferi ve basınç kayıpları üzerine ciddi fikirler verebilecek düzeydedir. Analizlerde bilgisayar programlarının kullanılması zamandan, test düzeneğı ve prototip için harcanacak bütçeden tasarruf etmeyi sağlamaktadır.

Literatür çalışmaları kapsamında bu tezin konusu olan kanatlı borulu ısı değıştiricileri üzerine yapılan çalışmalardan özellikle farklı kanat formlarının hava tarafı ısı transfer katsayısına ve

basınç düşümüne olan etkisi üzerine yapılmış deneysel ve numerik çalışmalar üzerine durulacaktır. Bu tez çalışmasında da kullanılacak olan FLUENT paket programı ile yapılmış çalışmaların tecrübelerinden yararlanılmaya çalışılacaktır. Ancak sayıca daha az olan paket programı kullanılarak yapılan çalışmalardan önce yapılan deneysel çalışmalar aktarılacaktır.

Webb ve Gray (1986), yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda ısı transferi ve lamel sürtünme katsayısı üzerine korelasyon geliştirmişlerdir. Isı transferi korelasyonu için 16 farklı batarya, sürtünme katsayısı korelasyonu için de 18 farklı ısı değiştiricisi test etmişlerdir. Elde edilen korelasyonlarla test edilen bataryalardaki Colburn j faktöründe % 7,3, sürtünme faktöründe ise %7,8 sapma elde etmişlerdir. Bu çalışmanın kapsamında test edilen bataryalara ait özellikler Çizelge 2.1’de yer almaktadır.

Wang (1999), düz lamel formu üzerine korelasyon geliştirme çalışmalarını deneysel olarak yapmıştır. Bu çalışma sırasında 74 batarya konfigürasyonu kullanmıştır. Isı transferi için oluşturulan korelasyonlarla yapılan hesaplamalarda  $\% \pm 15$  database içinde %88,6 oranında, sürtünme katsayısında ise % 85,1 oranında doğrulanan sonuçlar elde etmiştir. Test edilen bataryalara ait parametreler Çizelge 2.1’deki gibi özetlenebilir.

Wang (1998), çalışmalarını 49 farklı batarya konfigürasyonu üzerinde deneysel olarak yapmıştır. Yapılan deneylerle patlatmalı lamel üzerine korelasyon geliştirmiştir. Wang yaptığı bu çalışmalarda elde ettiği korelasyonlarla ısı transferi için yapılan hesaplamalarda  $\% \pm 15$  database içinde %95,5 oranında, sürtünme katsayısında ise % 90,85 oranında uygun sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmalara ait parametrik veriler Çizelge 2.1’de yer almaktadır.

Çizelge 2.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan batarya özellikleri

| Webb ve Gray (1986) |             | Wang (1999) |                | Wang (1998)         |               |
|---------------------|-------------|-------------|----------------|---------------------|---------------|
| Lamel Formu         | Düz         | Lamel Formu | Düz            | Lamel Formu         | Patlatmalı    |
| Sıra Sayısı         | 1 – 8       | Sıra Sayısı | 1 – 6          | Sıra Sayısı         | 1 – 6         |
| A/d                 | 1,97 – 2,55 | d           | 0,635–12,7 mm  | d                   | 6,93–10,42 mm |
| B/d                 | 1,7 – 2,58  | h           | 1,19 – 8,7 mm  | h                   | 1,25–2,49 mm  |
| h/d                 | 0,08 – 0,64 | A           | 17,7– 31,75 mm | A                   | 17,7–25,4 mm  |
|                     |             | B           | 12,4 – 27,5 mm | B                   | 12,7–22 mm    |
|                     |             |             |                | Patlatma Yüksekliği | 0,9–1,4 mm    |
|                     |             |             |                | Patlatma Aralığı    | 1,7–3,75 mm   |

Bu çalışmalarda hava tarafı ısı transferi ve sürtünme için McQuiston'un korelasyonları kullanılmıştır, akışkan tarafı ısı transferi için de Gnielinski'nin Nusselt sayısı korelasyonu kullanılmıştır.

Şahin vd., (2006) kanat yüksekliğinin boru çapına oranı 0,365 olan 2 düz lamel arasında modellenmiş tek borulu ısı değiştiricisinde Reynolds sayısı 4000-7500 aralığında akış yapısını deneysel olarak incelenmişlerdir. Çalışmada PIV (particle image velocimetry) tekniği kullanılarak anlık türbülanslı akış karakteristiği zaman ortalamalı ve faz ortalamalı olarak elde edilmiştir. Ana akış ve ikincil akış arasındaki etkileşim yatay ve dikey düzlemde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Erek vd., (2005) tarafından yapılan çalışmada, eliptik borulu düz kanatlı borulu bir ısı değiştiricisinde kanat geometrisi değişimlerinin ısı transferi ve basınç düşümü üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalar hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) programı Fluent yardımıyla yapılmıştır. Modellemede kanadın 10'da 1'i çizilmiş ve simetri koşulu kullanılmıştır. Giriş koşullarında kütle  $1,904 \times 10^{-5}$  kg/s ve sıcaklık 1500 K olarak tanımlanmıştır. Geometrik özelliklerdeki değişiklik modele yansıtılmış ve 10 farklı model oluşturulmuştur. Modeller üzerinde yapılan analizler sonrasında sıcaklık ve hız dağılımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar arasında kanatlar arasındaki mesafenin basınç düşümüne önemli derecede etki ettiği, boruların eliptiklik oranının artmasının ısı transferini arttırdığı gibi basınç düşümünde de önemli bir azalmaya neden olduğudur.

Lozza ve Merlo (2001), yaptıkları çalışmalarda lamel konfigürasyonunun değişiminin hava soğutmalı kondenser ve sıvı soğutuculardaki ısı transfer kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Aynı lamel geometrisi, boru çapı ve hatveye sahip (25x21,65 mm, şaşırtmalı, 5/8" boru çapında, 2 mm lamel aralığında) 15 prototipte lamel yüzey geometrisi değiştirilmek suretiyle yapılmıştır. Lamel yüzeyleri düz, dalgalı ve değişik konfigürasyonlardaki patlatmalı yüzeylerdir. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda ısı transfer katsayısı verimlilikleri; hava ile lamel arasındaki konveksiyon, lamel verimliliği, boru ile lamel arasındaki direnç ve bakır boru kondüksiyon direnci verimlilikleri içerdiği üzerinde durulmuştur. Hava ile lamel arasındaki ısı transfer katsayısının belirlenmesinde izlenen adımlarla ilgili kısaca bilgi verilmiştir. Boru iletim direnci literatürde yer alan basit formüllerle hesaplanmaktadır, boru-lamel arasındaki direnç ihmal edilmiştir, kanat verimi de yine literatürde yer alan incelenen örneğe uygun korelasyonla hesaplanabilmektedir. Hava ile kanat arasındaki ısı transfer katsayısı boyutsuz  $j=j(Re)$ ,  $j= Nu.Pr^{-1/3}.Re^{-1}$  sürtünme katsayısı  $f$  basınç kaybı, Reynolds sayısı hidrolik çap ve sıra sayısı aynı olarak alınıp değerlendirilmiştir. Sabit olarak alınan batarya özellikleri; boru dizilimi 25x21,65 mm, boru çapı 9,52 mm, lamel aralığı 2 mm, lamel kalınlığı 0,11 mm şeklindedir. Bu çalışmanın sonuçları arasında aynı özelliklere sahip olacak şekilde üretilen 2 bataryanın testinde, deneysel belirsizliğin ötesinde farklı sonuçların elde edilebileceği yer almaktadır. Bu farklılıkların nedenleri arasında da en önemli olanın boruların genişletilerek lamel ile temasının sağlanması işleminde yeterli hassasiyetin sağlanama ve patlatmalı lamellerde patlatma yüzeylerini oluşturulması esnasında lamel kalınlıklarının ve köşe detaylarının hassasiyetle elde edilememesi dolayısıyla kanat verimliliğinin beklenenden daha az sağlanmasıdır.

Kim ve Bullard (2002), multi-louvered fin ve düz borulu ısı değiştiricilerinde hava tarafı ısı transferini ve basınç kaybını incelemiştir. 45 farklı ısı değiştiricisinde louvered açısı (15°-29°), lamel aralığı (1, 1,2, 1,4 mm) ve akış derinliği (16,20,24 mm) olarak değişen bataryalarda testler yapılmıştır. Hava tarafı Reynolds sayısı 100-600 arasında değişirken, boru tarafı akışı sabit 0,32 m<sup>3</sup>/h olarak alınmıştır. Hava tarafı 21°C, akışkan (su) tarafı 45°C sıcaklığındaki giriş koşullarına sahiptir. Farklı kombinasyondaki ısı değiştiricilerinde Colburn  $j$ -factor ve sürtünme katsayısı  $f$  Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Genel korelasyonlar geliştirilen korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Sürtünme faktörü için oluşturulan korelasyon basınç kaybında en önemli parametrenin akış derinliği olduğunu göstermiştir.

Hsieh ve Jang (2006), çalışmasında louvered açısının akışkan debisine ve ısı transferine olan etkisi 3 boyutlu numerik analizle saptanmaya çalışılmıştır. 5 farklı louvered açısı kullanılarak oluşturulan A, B, C, D ve E formlarında incelemeler yapılmıştır ve B formunda oluşturulan açı ile Colburn j-faktör oranı ve sürtünme faktör oranında düz lamel yüzeyine göre % 25,5 fark gözlenmiştir. Bu çalışma göstermiştir ki değişik louvered açılarının ısı transferine etkileri farklı oranlarda olmaktadır.

Mon ve Gross (2004), kanatlı borulu ısı değiştiricisinde çapraz akışın sıcaklık ve hız profilleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalardan yerel taşınım karakteristiği ile ilgili korelasyonlar elde edilmiştir. Çalışmalarda borular sabit sıcaklıkta, hava ise kuru şartta kabulü yapılır. Geometrik parametrelerin etkisi numerik olarak incelenmiş ve hangi boru dizilim konfigürasyonunun daha etkin olduğu üzerine çalışmalar yapmıştır. Geniş bir Reynolds sayısı aralığında yapılan numerik çalışmalarla ısı transferi ve basınç kaybı ile ilgili birçok korelasyon çalışması yapılmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalardan ve genel ısı transferi bilgilerinden yararlanılarak ısı değiştiricisinde gerçekleşen ısı transferine etkiyen parametreler ve etki yönlerini ifade etmek üzere aşağıdaki çalışma yapılmıştır.

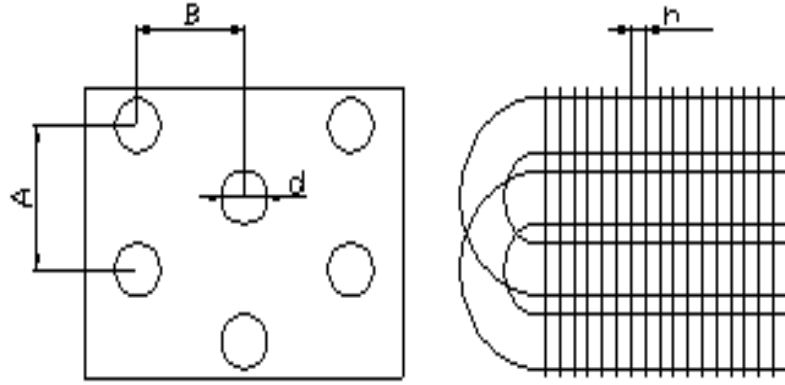
Kanatlı borulu ısı değiştiricisindeki ısı transfer kapasitesini etkileyen parametreler, akışkan tarafı ve hava tarafı dirençlerini etkileyen parametreler olarak birbirinden ayrılabilir. Hava tarafı olarak adlandırılan dış yüzey ısı transfer katsayısı boru yüzeyinden (birincil yüzey) ve kanat yüzeyinden (ikincil yüzey) gerçekleşen ısı transferinin toplamını kapsar ve aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

1. Isı değiştiricisi batarya geometrisi
  - Borular ve sıralar arası mesafe ( $A \times B$ )
  - Boru dizilişi ( Şaşırtmalı / Düz)
  - Boru çapı ve et kalınlığı
  - Lamel aralığı ve kalınlığı
  - Lamel formu (Düz / Dalgalı / Patlatmalı)
2. Hava hızı
3. Lamel malzemesi (Alüminyum / Bakır)
4. Üretim prosesi (boru ve lamelin sıkı teması)

5. Duyulur ve gizli ısı oranı
6. Dış yüzey kirlenme faktörü

### 1. Isı Değiştiricisi Batarya Geometrisi

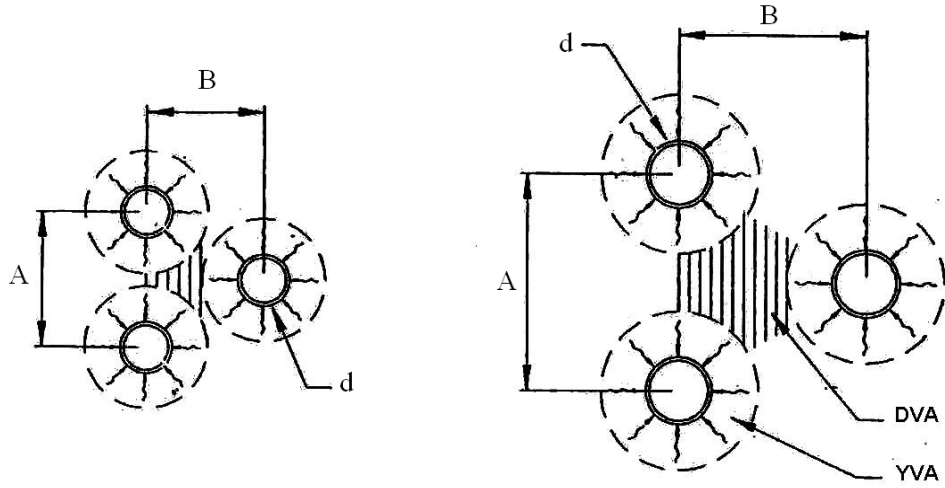
- Borular ve Sıralar Arası Mesafe ( $A \times B$ )



Şekil 2.1 Isı değiştiricisi batarya geometrisi genel görünüşü

Toplam ısı transfer katsayısı bataryanın ve çalışma şartlarının diğer özellikleri aynı tutulduğunda eşanjör geometrisine bağlı olarak değişir. Batarya tasarımında boru çapı ve borular arasındaki mesafeleri tanımlayan lamel geometrisi, kapasite ve basınç kayıpları üzerinde etkilidir. Lamel geometrisi, tasarım şartlarında ihtiyaç duyulan soğutma kapasitesinin uygun basınç kayıpları dâhilinde sağlanacağı şekilde seçim yapılmalıdır. Borular ve sıralar arası mesafe küçüldükçe, yani boru yoğunluğu arttıkça ısı transfer katsayısı artar. Borular ve sıralar arası mesafe arttıkça, yani boru yoğunluğu azaldıkça ısı transfer katsayısı küçülür. Bir başka deyişle boru yoğunluğu fazla olan eşanjörde birim ısı transfer yüzeyinden alınan kapasite yüksek, boru yoğunluğu az olanda ise düşüktür.

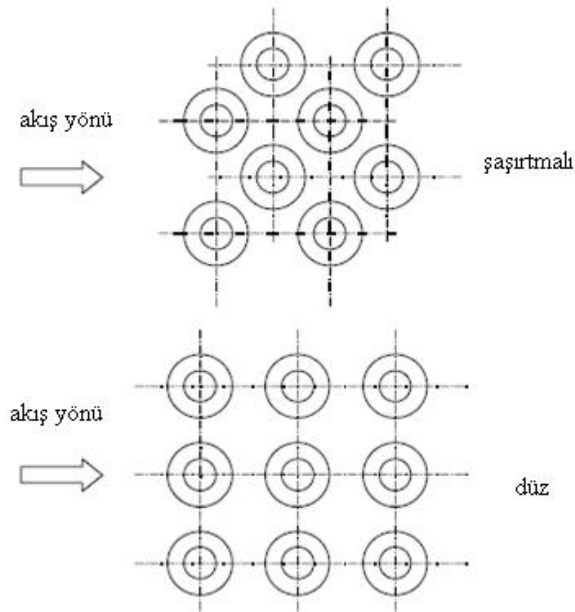
Aşağıda iki eşanjör bataryası geometrisi için borular ve sıralar arası mesafeler (geometri) ve dış/iç yüzey oranı verilmektedir (Şekil 2.2). Şemada bir düşük verimli alan DVA ve bir de yüksek verimli alan YVA tarifi yapılmıştır. Şemadan görülebileceği gibi boru yoğunluğu arttıkça DVA (düşük verimli alan) azalmaktadır; boru yoğunluğu düştükçe DVA (düşük verimli alan) artmakta, bu da toplamda eşanjörün birim yüzey verimliliğini düşürmektedir. Aynı zamanda yoğun borulu eşanjör bataryasından aynı kapasiteyi daha düşük yüzeyle alma imkanı yüksek verimi nedeniyle mümkündür.



Şekil 2.2 Yüksek Verimli ve Düşük Verimli Bölgelerin Borular ve Sıralar Arasındaki Mesafelerle Değişimi

- Boru Dizilişi ( Şaşırtmalı / Düz)

Lamel geometrisinde ısı transferi ve basınç kaybını etkileyen bir diğer parametre boruları düz ve ya şaşırtmalı olarak dizilimidir. Şaşırtmalı boru dizilişi, düz boru dizilişine göre daha verimlidir. Sıra sayısı arttıkça dizilişler arası verim farkı giderek azalır.



Şekil 2.3 Boru dizilişi (şaşırtmalı, düz)

Yaygın olarak kullanılan şaşırtmalı lamel geometrileri aşağıda yer alan çizelgede özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 Yaygın olarak kullanılan şaşırtmalı batarya geometrileri

| Borular arası<br>mesafe<br>(A, mm) | Sıralar arası<br>mesafe<br>(B, mm) | Boru Çapı<br>(d, inç) |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| 25                                 | 19                                 | 3/8"                  |
| 25,4                               | 22                                 | 5/16" – 3/8"          |
| 25                                 | 12,5                               | 3/8"                  |
| 31,75                              | 27,5                               | 3/8" – 1/2"           |
| 38,1                               | 33                                 | 1/2" – 5/8"           |
| 40                                 | 34,64                              | 1/2" – 5/8"           |
| 50                                 | 25                                 | 1/2" – 5/8"           |

- Boru Çapı ve Et Kalınlığı

Boru dizilişinin aynı kaldığı durumlarda boru çapının artması ile dış yüzey ısı transfer katsayısı artar. Isı değıştiricilerde boru çaplarının seçiminde iç akışkan hızı, oluşacak basınç kaybı ve verim faktörleri irdelenerek karar verilir.

Boru et kalınlığı, kanat ile boru iç yüzeyi arasında bir ısı direnç yarattığı için et kalınlığı arttıkça ısı transfer katsayısı düşer; ancak bu etkinin göreceli olarak küçük bir etki olması nedeniyle boru et kalınlığının seçimi daha ziyade akışkan çalışma basınçlarına dayanıklılık parametreleri irdelenerek yapılır.

- Lamel Aralığı ve Kalınlığı

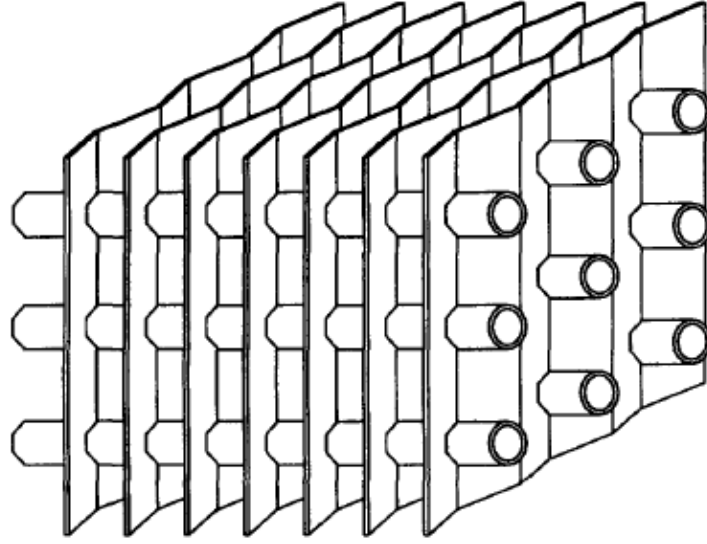
Lamel aralığı özellikle basınç düşümü yönünden performansı ciddi oranda etkileyen bir parametredir. Yapılan çalışmalarda lamel aralığının az olmasının ısı transferini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bunun nedeni yakın kanatlar arasında sınır tabaka kalınlığının etkisinin fazla olmasıdır. Biri hacim yönünden karşılaştırılan ısı değıştiricilerinde lamel aralığının az olması ısı transferinin artmasına neden olsa da basınç düşümünü ve kirlenmeyi artırdığından seçiminin dikkatli yapılması gerekmektedir.

Lamel kalınlığı arttıkça verim artar; ancak artışın yüksek olmaması lamel kalınlığı seçiminin kapasite artımından daha çok çalışılan ortam sıcaklığı ve dayanıklılığına bağlı olarak yapılması gerekliliğini gösterir. Lamel kalınlığının iki katına çıkarılması kapasiteyi yaklaşık olarak %10 oranında artırmaktadır.

- Lamel Formu ( Düz / Dalgalı / Patlatmalı)

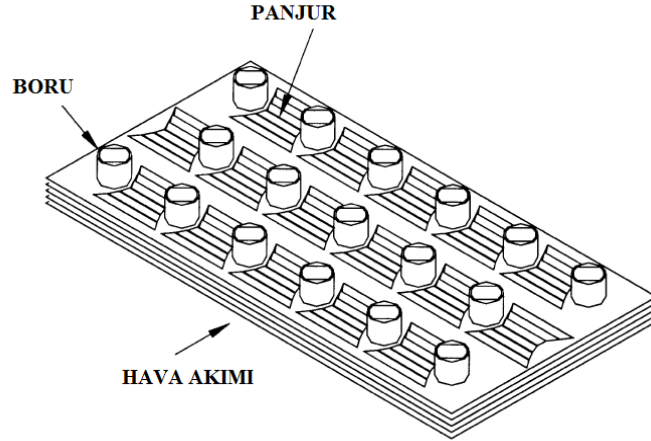
Lamele verilen formlar türbülans yaratıcı etkileri nedeniyle düz formlara göre daha yüksek transfer katsayısı sağlarlar. Buna karşılık, daha yüksek bir hava tarafı direnci ile karşılaşılır. Bu tez çalışmasının konusu olan farklı lamel formlarının ısı transferi ve basınç düşümüne etkisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla çözülmesi de lamel formları üzerine yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların değerlendirilmesi noktasında önem taşımaktadır.

Literatür çalışmalarında düz, dalgalı ve patlatmalı olarak karşımıza çıkan lamel formlarının genel mantığı aynı olmakla birlikte geniş boyutsal farklılıklara sahip olduğu gözlenmiştir. Genel dalgalı lamel formu görünüşü Şekil 2.4'deki gibidir.

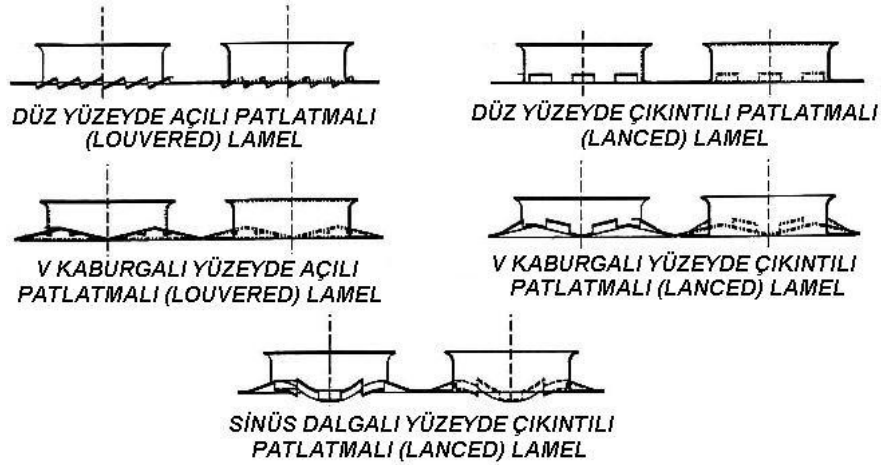


Şekil 2.4 Dalgalı lamel formu görünüşü

Wang (1999) tarafından yapılan çalışmada kullanılan patlatmalı lamel formuna ait genel görünüşte Şekil 2.5'de yer aldığı gibidir. Ancak yapılan çalışmalarda çok farklı patlatmalı lamel formu yüzeyleri ile karşılaşılmıştır. Şekil 2.6'da ise çeşitli patlatma yüzeylerine sahip lameller örneklendirilmiştir.



Şekil 2.5 Patlatmalı lamel formu görünüşü



Şekil 2.6 Çeşitli patlama yüzeyine sahip lamel formları

## 2. Hava Hızı

Lamel ve boru üzerinden geçen havanın hızı dış yüzey ısı transfer katsayısını doğrudan ve büyük oranda etkiler. Hava hızının artırılması elbette ki güç harcamasını da önemli ölçüde artıracaktır. Dolayısıyla değerlendirme yapılırken elde edilen kapasite artışı ile fanların çektiği güç artışı birlikte değerlendirilmeli ve optimum bir seçim yapılmalıdır.

## 3. Kanat Malzemesi (Alüminyum-Bakır)

Isıl yük ve kanat malzemesindeki ısı direnç nedeniyle kanattaki dış sıcaklık sabit değildir. Isı, borudan lamel tabanına ve sonra da dışa doğru akar. Kanat sıcaklığı tabanda boru sıcaklığına yakinken, borudan uzaklaştıkça kanatla boru arasındaki sıcaklık farkı da artar. Isıl direnci az olan malzemelerde bu fark daha az olacak, dolayısıyla dış yüzey ısı transfer katsayısı artacaktır. Ancak kanat malzemesi seçiminde de ortaya çıkan ısıl fayda sınırlı olduğundan, daha ziyade ekonomik kriterler ve kullanım yerinin özellikleri dikkate alınmaktadır. Örneğin;

aynı kalınlıkta bakır kanatlı bir eşanjör, alüminyuma göre 2-2,5 misli bir fiyata mal olurken, kapasite artışı ortalama bir bataryada %5 gibi son derece sınırlı kalmaktadır.

#### 4. Üretim Prosesi (Boru ve Lamelin Sıkı Teması)

Üretim prosesi boru ve kanat arasında kusursuz ısı transferini temin için maksimum sıkılıkta teması temin edecek şekilde gerçekleşmelidir. Bu konu son derece kritiktir; yeterli temas sağlanmamış bir ısı değiştiricisinde kabul edilemez büyüklükte kapasite düşüşleri olmaktadır.

#### 5. Duyulur ve Gizli Isı Oranı

Soğutma bataryalarında ısıtmadan farklı olarak ısı değiştirici kapasitesi duyulur ve gizli ısı kapasiteleri toplamından oluşur. Duyulur ısı eşanjör boyunca dış akışkanda oluşan sıcaklık farkı dolayısıyla ortaya çıkan ısıdır. Gizli ısı ise hava içindeki su buharının yoğuşmasından ortaya çıkar. Bu ısı, bir akışın gösterildiği Mollier Diyagramı kullanılarak hesaplanabilir. Havanın sıcaklığı ve sıcaklık farkı arttığında, toplam ısı içindeki gizli ısının oranı artar. Duyulur ısı oranı, duyulur ısının toplam ısıya oranı olarak tanımlanır. Burada nem ve sıcaklık amacına uygun seçimler yapılmalıdır. Genel olarak aynı şartlarda bağıl nemi yüksek havadan daha fazla toplam ısı transfer edilir.

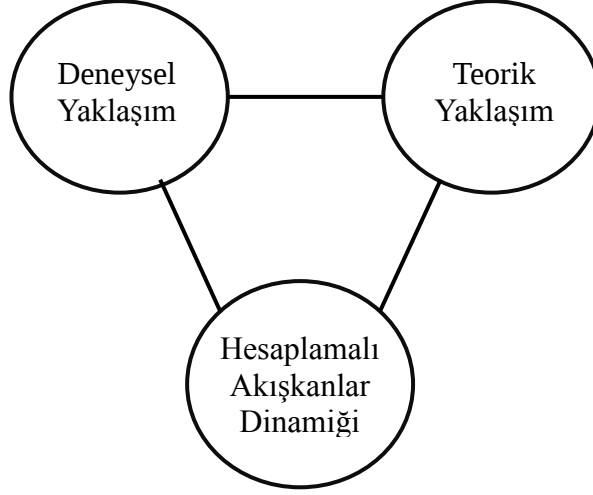
Su buharının kanatlar üzerindeki yoğuşması yüzeyi ıslak hale getirir. Yoğuşan suyun rahatlıkla kanadı terk etmesi; damlacıklar halinde birikerek kesiti daraltıp basınç kaybını artırarak hava debisini ve dolayısıyla kapasiteyi düşürmemesi gerekir. Bu nedenle kanat malzemesinin suyun kolaylıkla süzülmesine olanak tanıyan özellikte olması gerekmektedir. Bu amaçla alüminyum kanatlara hidrofilik kaplamalar yapılmaktadır. Hidrofilik kaplama sayesinde, su süzüldüğünde ek direnç oluşmamakta ve sistemden normal kapasitesi alınabilmektedir. Ayrıca su birikmesi hijyen yönünden de sakıncalar arz etmektedir. Bu nedenle hidrofilik kaplı alüminyum uygulamaları yaygınlaşmaktadır.

#### 6. Dış Yüzey Kirlenme Faktörü

Dış yüzey kirlenme faktörü arttıkça verim düşmektedir. Isı değiştiricinin yeni ve temiz haline göre yapılmış sınır hesaplar sonradan genellikle işletme sırasında kapasite yetmezliği sorunlarına yol açmaktadır. Bunun önlenmesi için mutlaka dış yüzey kirlenme faktörü hesaba katılmalı ve ısı değiştirici o oranda büyük tutulmalıdır. Bu oran %10-20 seviyesinde olabilir, ya da 1 sıra büyük ısı değiştirici kullanılabilir.

### 3. SAYISAL YÖNTEMLER VE YÖNETİCİ DENKLEMLER

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, deneysel ve teorik akışkanlar mekaniğinden yararlanılarak çözülmeye çalışılan akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümü için oluşturulan numerik algoritmaların yüksek hızlı bilgisayarlarda çözümüne imkân sağlayan akışkanlar mekaniği yaklaşımıdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), deneysel akışkanlar mekaniği ve teorik akışkanlar mekaniğine alternatif olarak düşünülmekten öte üçüncü bir bakış açısı olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.1 Akışkanlar dinamiğinin “Üç Boyutu” (Anderson, 1995)

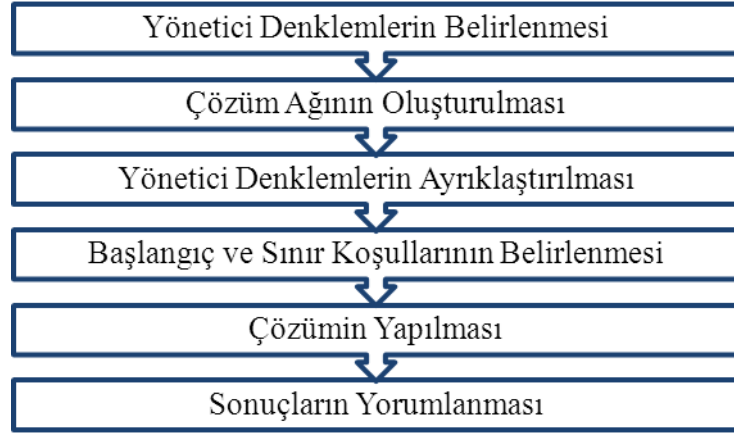
Özellikle son yıllarda bilgisayar teknolojisinde yaşanan gelişmelerle gün geçtikçe dikkat çekici çalışmalara çözüm sunan hesaplamalı akışkanlar dinamiği klasik yöntemlerle çözümü zor ve zahmetli problemlerin çözümüne imkan sağlar hale gelmektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin hızlı gelişmesi ve başarılı analizlerin elde edilmeye başlanmasıyla, teknik alanda bu konu bir çalışma alanı haline gelmiştir. Bu alanda profesyonel olarak çalışan uzmanlara ve kuruluşlara ulaşma imkanı doğmuştur. Günümüzde akışkanlar dinamiği araştırma-geliştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak yaşam alanlarındaki hava akımı dağılımı, otomobil içindeki ve hareket halinde iken etrafındaki hava akışları, uçak kanadı üzerinde gerçekleşen basınç ve hız dağılımlarının çözümü gibi birçok karmaşık çalışmaya imkan sağlar hale gelmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin uygulanması, çözümü yapılacak bölgenin sonlu sayıda yüzeylere (hacimlere) ayrılmasını gerektirir. Çözümün oluşturulması incelenmek istenen akışın yapısına bağlı olarak tanımlanan korunum denklemlerinin belirlenmesiyle başlar. Bu

denklemler yönetici denklemler olarak adlandırılır. Yönetici denklemlerin çeşitli yöntemlerle ayrıklaştırılarak cebirsel denklemlere dönüştürülmesi ve bu denklemlerin oluşturulan sonlu sayıda ağ boyunca çözülmesi esasına dayanır. Çözümü yapılacak problemin sınır şartları ve başlangıç koşullarının tanımlanmasından sonra ayrıklaştırılmış korunum denklemlerinde istenen yakınsama sağlanan kadar iteratif çözüm yapılır. Doğru seçildiğine ve tanımlandığına emin olunan tüm diğer parametrelerin yanında sonuçların güvenilirliği anlamına gelen yakınsama, yönetici denklem sonuçlarının bir iterasyondan diğer iterasyona değişmeyecek duruma gelmesi anlamına gelmektedir.

Yukarıda anlatılmaya çalışılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği adımları özetle aşağıdaki şekilde olduğu ifade edilebilir.



Şekil 3.2 Sayısal çözüm adımları

Piyasada sıklıkla kullanılır hale gelen paket programları sayesinde karmaşık ve zor ısı transferi ve akış problemlerin çözümüne ulaşmak daha hızlı hale gelmiştir. Giderek artan çözüm modülleri sayesinde çözümü zor problemler çözülebilir hale gelmiştir. Gerçek hayatta karşılaşılan tüm modellerin doğru yaklaşımlarla çözümünün imkanı hale gelebilmesi için programlamalarda çalışmalar devam etmektedir. Örneğin tek fazlı akışkanlarda güvenilirliği ve çözümü imkanı olan bir akış probleminin yanı sıra iki fazlı akışı da doğru şekilde çözümleyebilecek modeller oluşturmak bu programların gelişmesinde üzerinde durulan konulardandır. Paket programlar kullanıcının problemi belirlemesi ve modeli oluşturmasının ardından, seçilen çözüm modellerine göre yönetici denklemlerin ayrıklaştırılması ve çözümü içerdiğinden kullanıcıya kolaylıklar sağlamaktadır.

Günümüzde paket programlarının yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra, bu programların çözümünün deneysel olarak teyit edilmesi bir diğer doğrulama yaklaşımıdır. Her ne kadar zamandan ve deneysel masraflardan tasarruf etmeyi sağlasa da bu tip programlarda çözümü

istenen problemin belirlenmesinden başlayıp çözümünün elde edilmesine kadar olan aşamalarda oluşacak bir hatanın ve ya yanlış bir bakış açısının sonuca olan etkisinin farkındalığı güç bir işlemdir. Eğer mümkünse öncelikle üzerinde çalışılan modelin deneysel çalışmalar ile doğrulanması ve ardından modelde yapılması istenen değişiklikler ve iyileştirmelerin sayısal çözüm modeline yansıtılması doğru ve sağlıklı sonuçlar alınmasında faydalı olacaktır. Böylece hızlı çözüm elde etmek için başvurulmuş bu programların sonuçlarının doğruluğundan emin olunamaması gibi bir durum ile karşılaşılmamış olur.

### 3.1 Yönetici Denklemler

Temel olarak bir akışın incelenmesi için süreklilik, momentum (Navier Stokes denklemleri) ve enerji denklemlerinin, uygun başlangıç ve sınır koşulları ile çözülmesi gerekir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği de bu üç temel denklemin sayısal çözümüne dayanır. Sayısal çözümlerde kullanılacak denklemlerin genel kartezyen koordinatlarındaki şekilleri aşağıda yer aldığı gibidir.

$$\text{Süreklilik denklemi : } \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{Momentum denklemi : } \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.2)$$

$$\text{Burada : } \tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.3)$$

$$\text{Enerji denklemi : } \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3.4)$$

şeklinde verilir. Bu denklemlerde  $\rho$  yoğunluk,  $p$  basınç,  $\mu$  dinamik viskozite,  $u_i$  hız vektörü,  $\tau_{ij}$  gerilme tansörü,  $\delta_{ij}$  kroneker delta,  $T$  sıcaklık,  $k$  ısı iletkenlik ve  $E$  toplam enerjidir.

Yukarıdaki denklemler yardımıyla bir modelin çözümünde evrensel olarak kullanılan tek bir çözüm olmadığı gibi, modeldeki akışın fiziği, çözümde istenen doğruluk ve hassasiyet derecesi, kullanılan bilgisayar kaynağı ve çözüm süresi gibi parametrelere göre belirlenir.

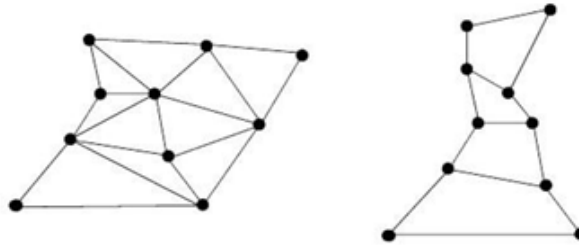
Akışın türbülanslı ya da laminar oluşu atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranı olan Reynolds sayısı ile tanımlanır. Atalet kuvvetinin sürtünme kuvvetine oranının büyük olduğu akışlar türbülanslı akış olarak tanımlanır, bu tip akışlarda akışın içindeki düzensiz değişimlerin atalet kuvvetlerinin etkisi ile çalkantılar haline dönüşür ve akış türbülanslı bir karakter gösterir. Laminar akışta ise atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranı küçüktür

ve akış içindeki çalkantılar dağılır ve akış laminar kalır. Gerçek mühendislik uygulamalarında karşılaşılan çoğu akış türbülanslıdır.

Fluent programında tüm akış problemleri için kütle ve momentum korunum denklemleri çözülür, eğer bu tez çalışmasında olduğu gibi akışta ısı transferi de varsa ayrıca enerji denklemi de çözülmemektedir. Bu tez çalışmasında yapılacak sayısal çözümler üç boyutlu, laminar, sıkışamaz, daimi akış uygulamasıdır.

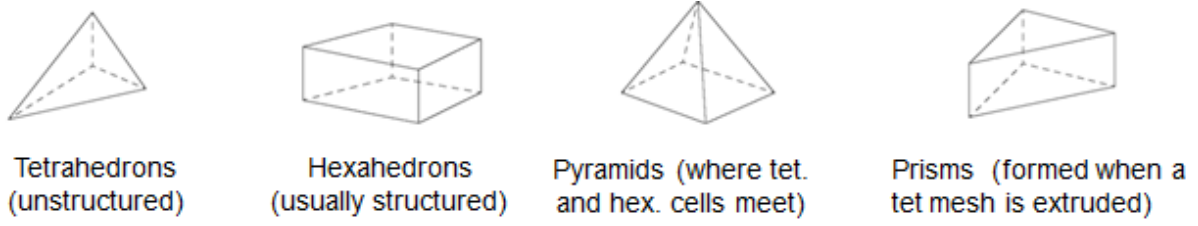
### 3.2 Çözüm Ağının Oluşturulması

Sayısal çözüm uygulamalarında en önemli adımlardan biri çözümü yapılacak modelin sayısal denklem çözümlerinin yapılacağı sonlu sayıdaki yüzeylere (hacimlere) ayrılmasıdır. Oluşturulan ağ yapısına bağlı olarak korunum denklemlerinin her bir eleman için ardışık olarak çözülmesiyle toplam çözüm alanı için genel çözüme ulaşılır. İki boyutlu geometrilerde en küçük eleman yüzeyler olurken, üç boyutlu geometrilerde ise hacimlerdir. Yüzeylerin veya hacimlerin ortak birleşim noktaları ise düğüm noktalarıdır. Çözüm ağları geometri özelliklerine bağlı olarak yapılı ve yapısız diye adlandırılan iki şekilde oluşturulurlar.



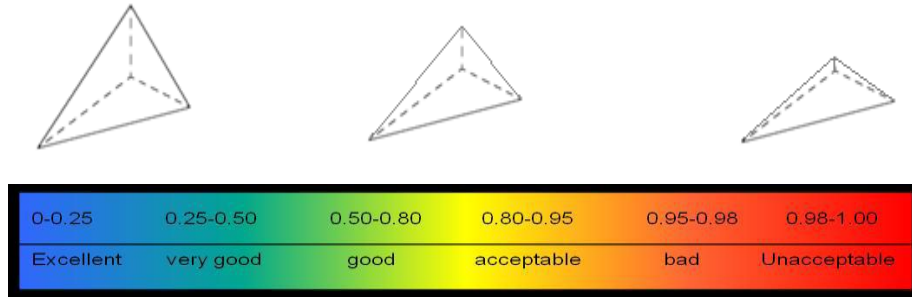
Şekil 3.3 Yapısız(a) ve Yapılı(b) Ağ Yapıları

Tez çalışmasında kullanılan Ansys programı kendi içinde mesh modülü içermektedir. Daha önceki yıllarda yaygın olarak kullanılan Gambit programına muadil olan bu modül kullanıcı dostu olması yönüyle kullanıcıları Gambit programının zorluğundan kurtarmaktadır. Mesh modülünde yüzeylerde quad/tri/map gibi alternatifler mevcut iken hacimsel ağlar oluşturmak için tetra, hexa, pyramid gibi meshleme çeşitleri mevcuttur. 3 boyutlu mesh yapıları temel olarak aşağıda yer aldığı gibi gruplandırılmaktadır.



Şekil 3.4 Üç boyutlu ağ yapısı çeşitleri

Oluşturulan ağ, sayısal çözümün doğruluğu açısından çok önemlidir. Ansys programında mesh metrics bölümünde mesh yapısının kalitesini gösteren birçok parametre bulunmaktadır. Mesh yapısının değerlendirilmesindeki en önemli kriter olan çarpıklık ölçüsünü temsil eden skewness değeri 0 (mükemmel) ile 1 (kabul edilemez) arasında ölçülendirilmiştir. Skewness değerinin ölçülendirilmesine dair şekil aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.5 Skewness değerinin ölçülendirilmesi

Oluşturulan mesh yapısındaki skewness değeri önemli bir kriterdir. Bunun yanı sıra mesh yapısı oluşturulurken eleman sayısının çözüm zamanına olan etkisi göz önüne alınmalı ve çözümde gerekmeyen bölümlerde hassas mesh yapıları oluşturulmamaya özen gösterilmelidir.

### 3.3 Yönetici Denklemlerin Ayırıklaştırılması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde yönetici denklemlerde yer alan integral ve ya diferansiyel denklemler cebirsel denklemlere dönüştürülerek çözüme ulaşılır. Diferansiyel denklemlerin ayırıklaştırılmasında uygulanan yöntemler sonlu fark, sonlu eleman ve sonlu hacimlerdir. Bu yöntemlerin kullandığı kabul ve yaklaşımlarla diferansiyel denklemler cebirsel denklemlere dönüştürülür.

Sonlu farklar yöntemi diferansiyel denklemleri Taylor serisi açılımıyla cebirsel denklemlere dönüştürür. Bu yöntem diferansiyel denklemlerin ayırıklaştırılmasında net olarak korunum prensiplerini koruyamaz. Mesh yapısının yeterince ince olması gerçekçi çözüme yaklaşırsa da kaba meshlerde enerji dengesinin sağlanması mümkün olmamaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi lineer ve nonlinear diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılmasında kullanılabilecek bir yöntemdir. Bu yöntemde küçük alanlara bölünen çözüm alanı için cebirsel tahminler yapılarak çözüme başlanır, ardından iterasyonlar yapılarak hata azaltılır.

Sonlu hacimler yöntemi ise çözüm alanını sonlu sayıda kontrol hacmine böler ve değişken değerlerinin hesaplandığı kontrol noktaları kontrol hücrelerinin merkezinde bulunur. Fluent programı tarafından da kullanılan yöntem sonlu hacimler yöntemidir. Bu yöntemde korunum denklemleri her kontrol hacmi için integre edilerek her hacim için korunum kanununu sağlayan bir ayrıklaştırılmış denklem oluşturur. Kontrol hacmi sınır bölgelerindeki değerler ise interpolasyon yöntemi ile hesaplanır.

#### 4. SAYISAL ÇÖZÜMLER

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programları kullanılarak yapılan sayısal çözümlerde sayısal çözüme doğru bir şekilde ulaşmak için izlenmesi gereken adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- PROBLEMİN TANIMLANMASI
  - Sayısal çözümün hedeflerinin belirlenmesi
  - Çözümü yapılacak modelin tanımlanması
- ÖN İŞLEMCİ
  - Katı modelin oluşturulması
  - Çözüm ağının oluşturulması
  - Modellemedeki fiziksel ve kimyasal karakteristiklerin tanımlanması
  - Çözüm yöntemlerinin belirlenmesi
  - Çözümün yapılması
- SON İŞLEMCİ
  - Sonuçların fiziksel anlamının değerlendirilmesi
  - Gerekirse modelin revize edilmesi ve çözümün tekrarlanması

Bu tez çalışmasında kanatlı borulu ısı değiştiricisindeki 3 farklı lamel formunun modellenmesi ve FLUENT programında çözümlenmesi sonucu değişik lamel formlarının ısı transfer katsayısına ve basınç kaybına olan etkisi araştırılmıştır.

Sayısal çözümlemede analizi yapıp karşılaştırılacak üç farklı lamel formunun model ve ağ oluşturma işlemlerinde izlenen adımlar aşağıda sırasıyla aktarılacaktır.

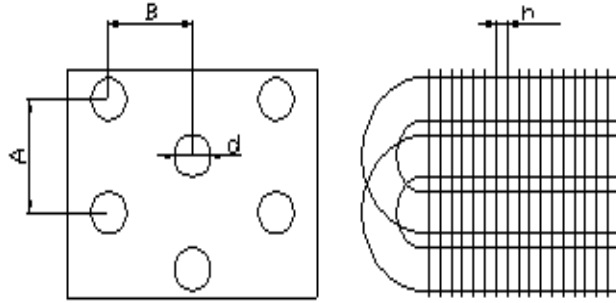
Yeşil (2007), tarafından yapılan tez çalışmasında kanatlı borulu ısı değiştiricisi modellenmesinde simetrik sınır koşulu yerine periyodiklik sınır koşulunun kullanılmasının daha doğru sonuçlar verdiği üzerine çalışmıştır. Literatür bölümünde aktarılan ve bu tip sayısal çözümlemelerde yaygın olarak kullanılan simetrik sınır koşulu yerine çözümlerde daha doğru sonuçlar vereceğine inanılan periyodik sınır koşulu kullanılmıştır.

Bu çözümleme esnasında katı modelin ve meshin oluşturulması, sayısal çözümün yapılmasının hepsine aynı anda imkân sunan ANSYS programı kullanılmıştır. Sayısal çözümlemesi yapılacak lamel formlarının üç boyutlu modellenmesi Ansys Workbench

Geometri modülünde yapılmıştır. Oluşturulan model daha sonra Ansys Workbench Mesh modülüne aktarılarak sayısal çözümlemenin yapılacağı ağ oluşturma işlemi yapılmıştır.

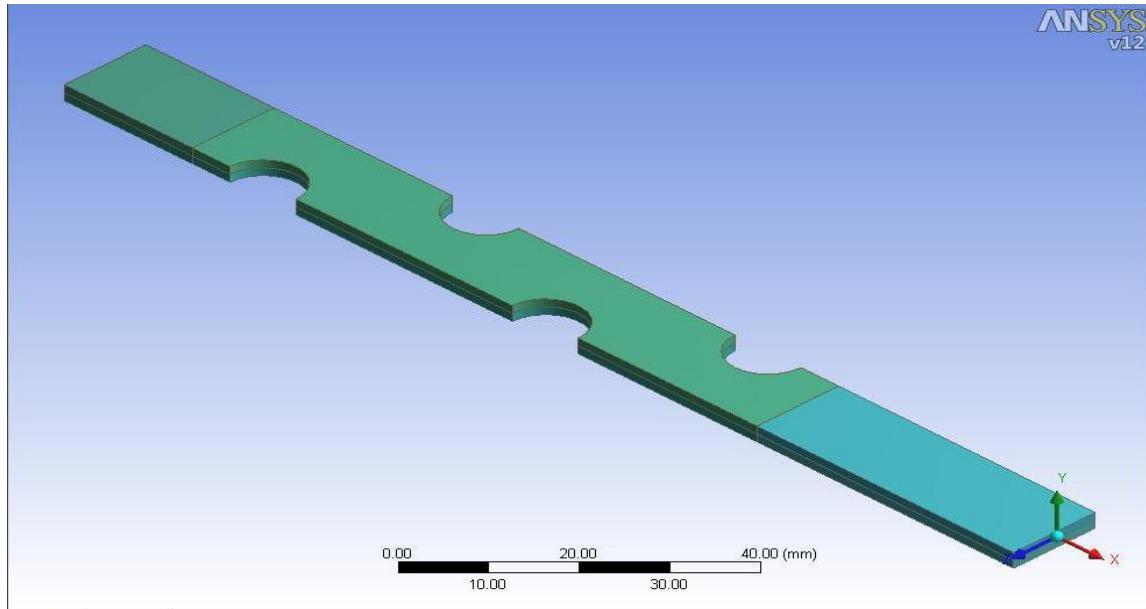
#### 4.1 Düz Lamel Modelinin Oluşturulması

Sayısal çözümlemenin ilk bölümünde düz lamel formu ısı değiştiricisinde, lamel üzerinde gerçekleşen hava akışı incelenmiştir. Genel görüntüsü Şekil 4.1’de yer aldığı gibi olan lamel formunun modeli bir sonraki aşamada aktarılmış ve çizime ait detay bilgiler verilmiştir.



Şekil 4.1 Lamel formlarına ait genel görünüm

Isı transfer katsayısı ve basınç kaybı incelemesi yapılacak olan düz lamel formunun Ansys model modülünde oluşturulan geometrisi Şekil 4.2’de yer almaktadır.



Şekil 4.2 Düz lamel formuna sahip kontrol hacmi

Modelde akış şartlarının düzelmesi amacı ile giriş ve çıkış formu bir miktar uzatılmıştır. Modelleme sırasında lamelin iki yüzeyinde hava akışının gerçekleşeceği hacimler modellenmiştir Kanatlar ve boruların et kalınlıkları geometrik olarak modellenmemiştir, bu kalınlıklar analiz sırasında tanımlanacaktır. Boruların yerleşeceği yüzeyler modelde

tanımlanmış ancak boruların çizimine gerek duyulmamıştır çünkü ısı değiştiricisinin tamamı modellenmemiştir ve boruların yüzeyleri değişken sıcaklık tanımı yerine sabit sıcaklık koşulu kullanılacaktır ve çözüm esnasında iletimle ısı transferi tanımı yapılacaktır. Sabit sıcaklıklı boru yaklaşımı gerçek model düşünüldüğünde uzak bir yaklaşımdır ancak gerçek modelde analizin zorluğu ve bilgisayar gereksinimi düşünüldüğünde bu yaklaşımla çözüm yapmak ve farklı lamel formlarının sonuçlarının incelenmesinde fikir vermesi amacıyla kullanılabilir bir yaklaşımdır. Düz lamel formu modele ait ölçü ve parametreler Çizelge 4.1’de yer almaktadır.

Çizelge 4.1 Düz lamel formunun genel ölçü ve parametreleri

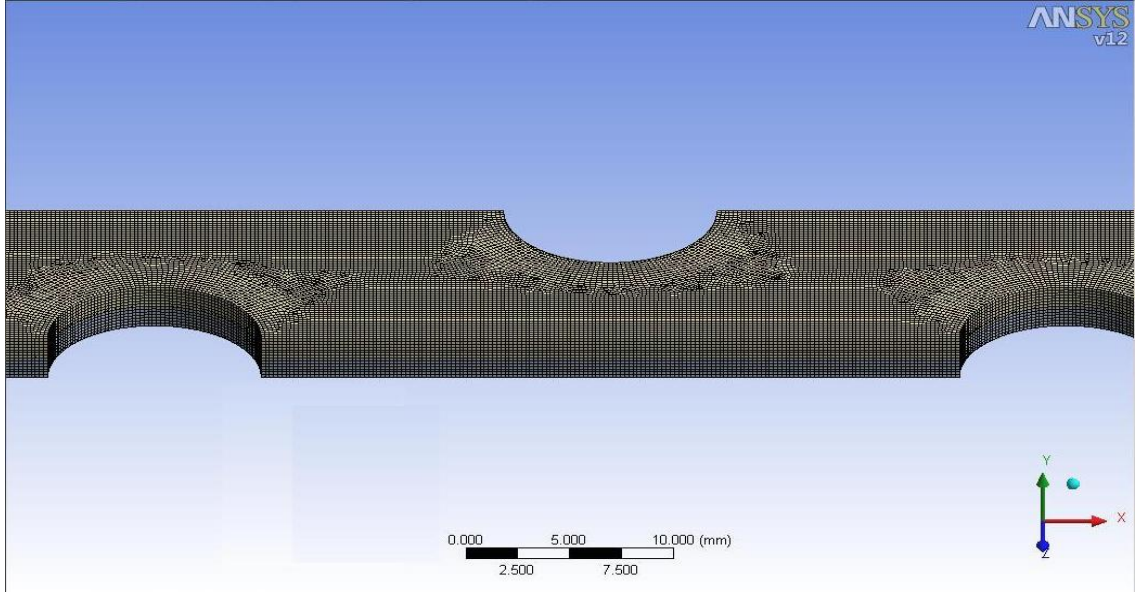
|                           |      |      |
|---------------------------|------|------|
| Lamel formu               |      | Düz  |
| Borular arası mesafe (A)  | mm   | 25,4 |
| Sıralar arası mesafe (B)  | mm   | 22   |
| Lamel kalınlığı           | mm   | 0,12 |
| Lameller arası mesafe (h) | mm   | 2,5  |
| Boru dış çapı (d)         | mm   | 10,3 |
| Boru kalınlığı            | mm   | 0,35 |
| Boru sayısı               | adet | 1/2  |
| Sıra sayısı               | adet | 4    |

#### 4.2 Düz Lamel Modelinde Ağ Oluşturma

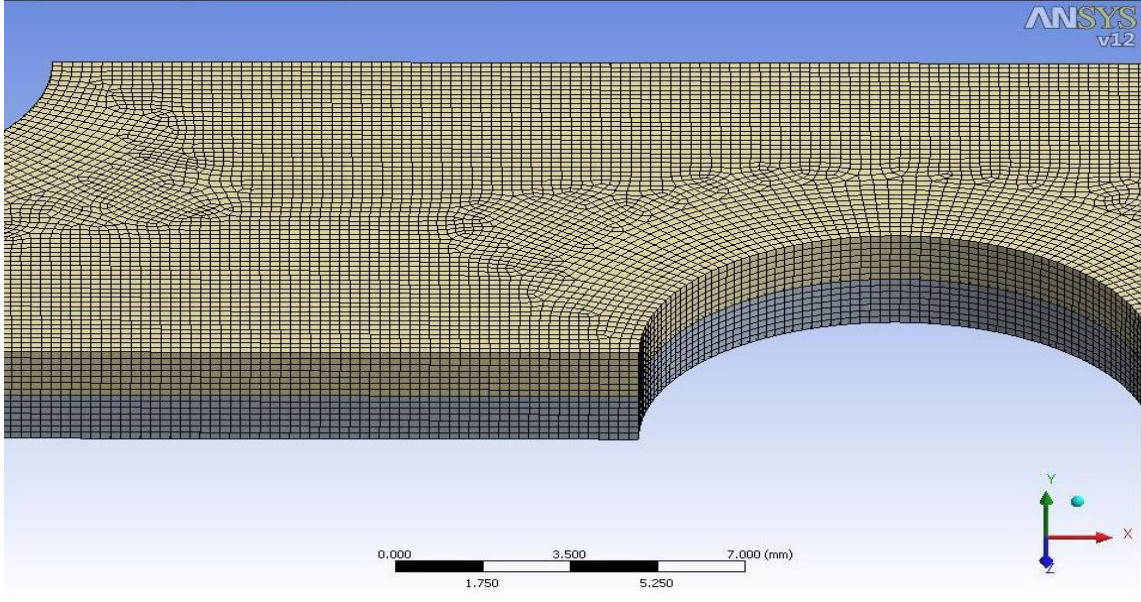
Düz lamel formuna sahip modelde sweep mesh kullanılmıştır. Modele ait ağ görüntüsü Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Oluşturulan ağ yapısına ait düğüm noktası sayısı, eleman sayısı, minimum ve maksimum skewness değerine ait bilgiler ise Çizelge 4.2’de yer almaktadır.

Çizelge 4.2 Düz lamel formu için oluşturulan ağ yapısına ait bilgiler

|                                    |             |                         |
|------------------------------------|-------------|-------------------------|
| <b>Node (Düğüm Noktası) Sayısı</b> |             | 652695                  |
| <b>Eleman Sayısı</b>               |             | 1597744                 |
| <b>Skewness</b>                    | <b>Min.</b> | $1,306 \times 10^{-10}$ |
|                                    | <b>Max.</b> | 0,654                   |



Şekil 4.3 Düz lamel formu için oluşturulan ağ yapısı önden görünüşü



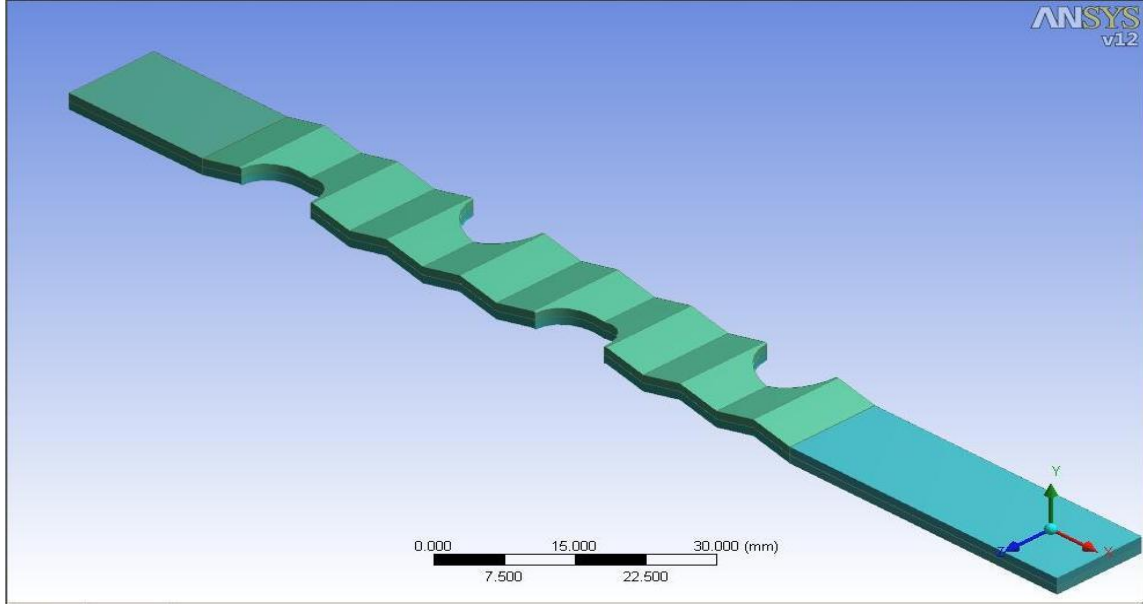
Şekil 4.4 Düz lamel formu için oluşturulan ağ yapısı detay görünüşü

Meshleme (ağ oluşturma) işlemi tamamlandıktan sonra modelde tanımlanması gereken ve çözümleme de sınır koşullarının tanımlanacağı giriş, çıkış, boru yüzeyi, lamel yüzeyi, interior bölgeleri ve çözüm esnasında periyodiklik sınır koşulları tanımlanacak olan yüzeyler adlandırıldı. Oluşturulan Ansys Workbench Mesh dosyası Ansys Fluent programına aktarılır. Mesh verilerinin Fluent'e aktarılması için Mesh dosyasının update edilmesi de gerekmektedir.

#### 4.3 Dalgalı Lamel Modelinin Oluşturulması

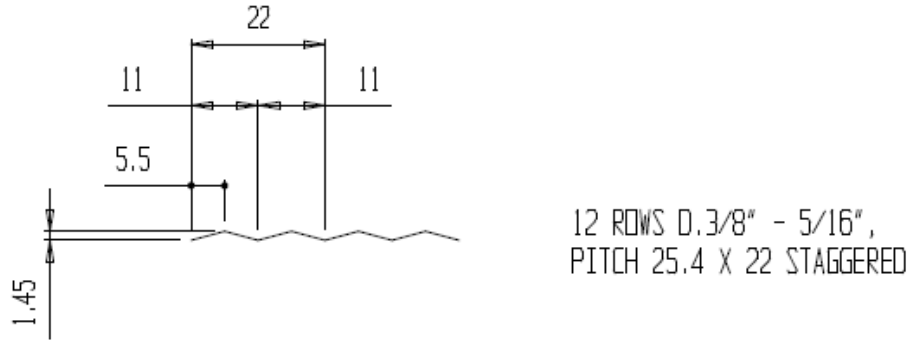
Modellemenin ikinci bölümünde sayısal çözümü yapılacak olan dalgalı lamel formuna sahip ısı değiştiricisi modelinin oluşturulması yer almaktadır.

Düz lamel formuna benzer şekilde oluşturulan dalgalı lamel formuna ait çizim modeli görüntüsü Şekil 4.5’de yer aldığı gibidir.



Şekil 4.5 Dalgalı lamel formuna sahip kontrol hacmi

Modelde düz lamel formunda olduğu gibi akış şartlarının düzelmesi amacı ile giriş ve çıkış formu bir miktar uzatılmıştır. Lamel ve boru özelliklerini tanımlama işlemi de düz lamel formunda izlenen adımlarla aynıdır. Çözüm için oluşturulan dalgalı lamel formunda dalga (kaburga) olarak adlandırılan formun ölçülerini içeren görünüş Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 Dalgalı lamel formuna ait genel görünüş

Çözüm için modellenen dalgalı lamel formuna ait çizimin oluşturulmasında kullanılan diğer ölçü ve parametreleri Çizelge 4.3’de mevcuttur.

Çizelge 4.3 Dalgalı lamel formunun genel ölçü ve parametreleri

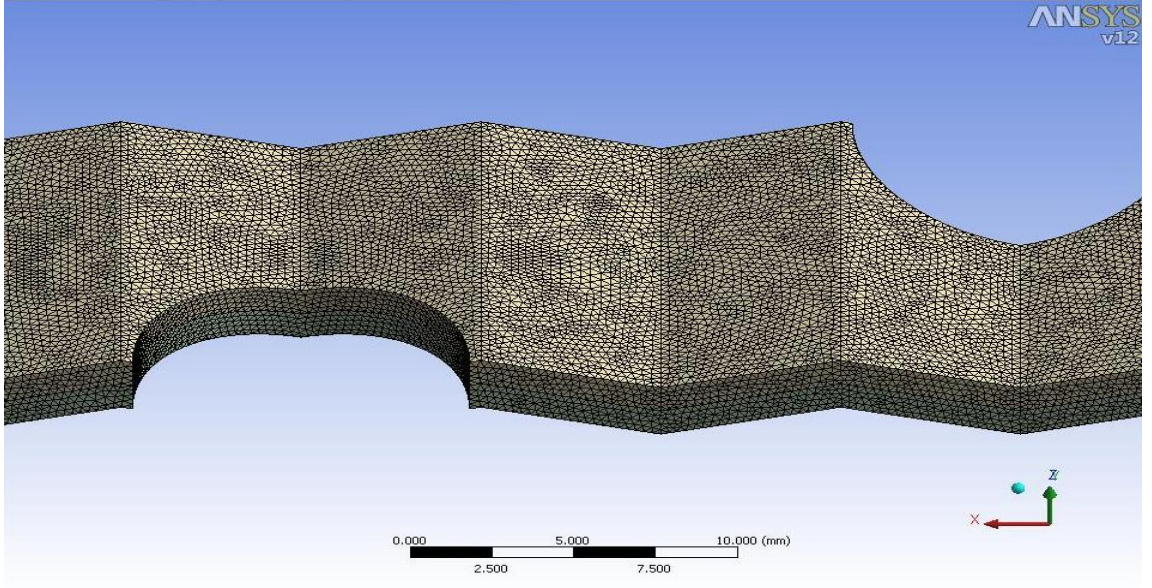
|                           |      |         |
|---------------------------|------|---------|
| Lamel formu               |      | Dalgalı |
| Borular arası mesafe (A)  | mm   | 25,4    |
| Sıralar arası mesafe (B)  | mm   | 22      |
| Lamel kalınlığı           | mm   | 0,12    |
| Lameller arası mesafe (h) | mm   | 2,5     |
| Boru dış çapı (d)         | mm   | 10,3    |
| Boru kalınlığı            | mm   | 0,35    |
| Boru sayısı               | adet | 1/2     |
| Sıra sayısı               | adet | 4       |

#### 4.4 Dalgalı Lamel Modelinde Ağ Oluşturma

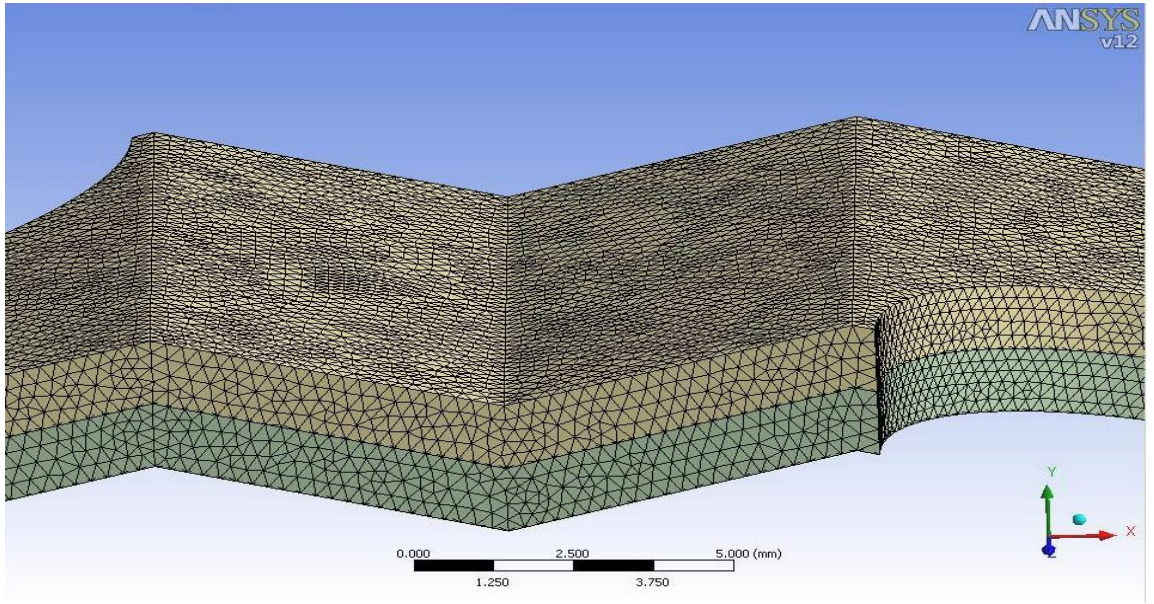
Dalgalı forma sahip lamel modeli için oluşturulan ağ görüntüsü Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Modeldeki mesh yapısını oluşturulmasında tetra elemanlar kullanılmıştır. Oluşturulan ağ yapısına ait düğüm noktası sayısı, eleman sayısı, minimum ve maksimum skewness değerine ait bilgiler ise Çizelge 4.4’de yer almaktadır. Elde edilen skewness değeri kabul edilebilir mertebededir, oluşan eleman sayısı da dikkate alındığında mesh yapısının çözüm için yeterli özellikte olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.4 Dalgalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısına ait bilgiler

|                                    |             |                         |
|------------------------------------|-------------|-------------------------|
| <b>Node (Düğüm Noktası) Sayısı</b> |             | 330109                  |
| <b>Eleman Sayısı</b>               |             | 1217005                 |
| <b>Skewness</b>                    | <b>Min.</b> | $1,305 \times 10^{-10}$ |
|                                    | <b>Max.</b> | 0,846                   |



Şekil 4.7 Dalgalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısı genel görünüşü

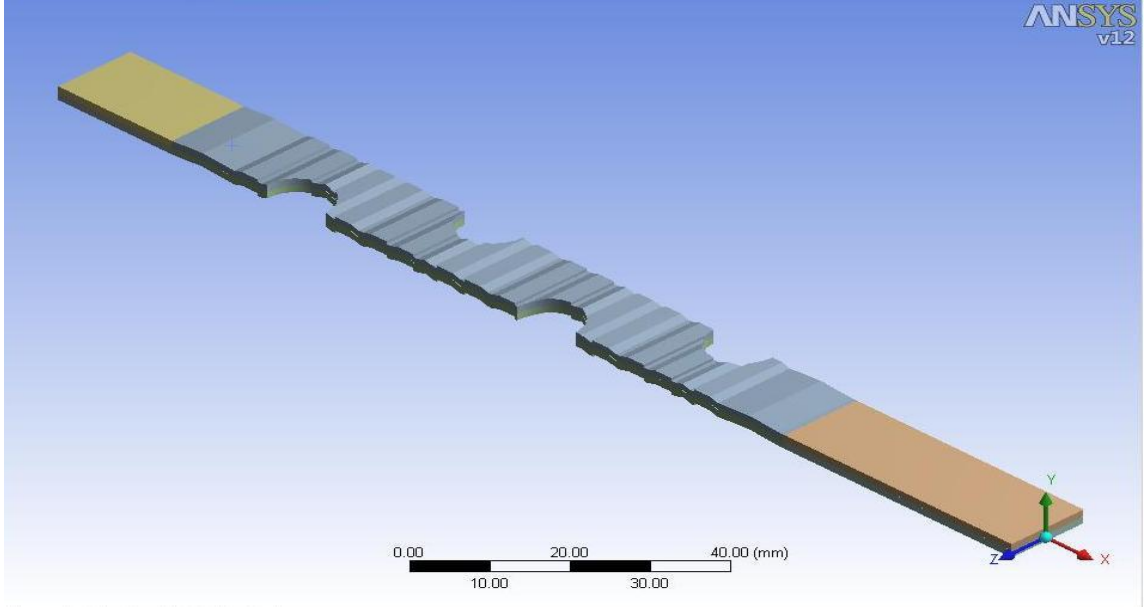


Şekil 4.8 Dalgalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısı detay görünüşü

#### 4.5 Patlatmalı Lamel Modelinin Oluşturulması

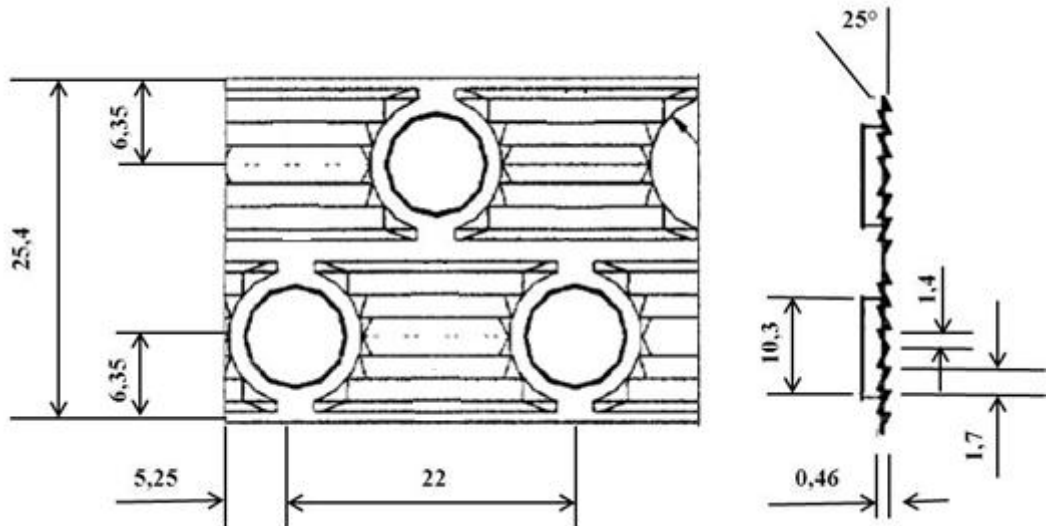
Sayısal çözümlemenin son bölümünde analiz edilecek patlatmalı lamel formu model oluşturulmuştur. Bu çözümleme esnasında katı modelin ve meshin oluşturulması, düz ve dalgalı lamel formu çözümünde izlenen adımlara benzerdir. Model ve ağ oluşturma işlemleri Ansys programı içinde yer alan modüller yardımıyla yapılmıştır.

Çözümleme de kullanılacak patlatmalı lamel formunun Ansys programında oluşturulan modelinin görüntüsü Şekil 4.9’de yer almaktadır.



Şekil 4.9 Patlatmalı lamel formuna sahip kontrol hacmi

Modelde düz ve dalgalı lamel formunda olduğu gibi akış şartlarının düzelmesi amacı ile giriş ve çıkış formu bir miktar uzatılmıştır. Lamel ve boru özelliklerini tanımlama işlemi de diğer lamel formlarında izlenen adımlarla aynıdır. Patlatmalı lamel formunda yer alan patlatma olarak adlandırılan formların çiziminde kullanılan parametreler Şekil 4.10'da yer alan modeldeki gibidir.



Şekil 4.10 Patlatmalı lamel formu genel çizim bilgileri

Model çiziminin oluşturulmasında kullanılan diğer ölçü ve parametreler de Çizelge 4.5'de mevcuttur.

Çizelge 4.5 Patlatmalı lamel formunun genel ölçü ve parametreleri

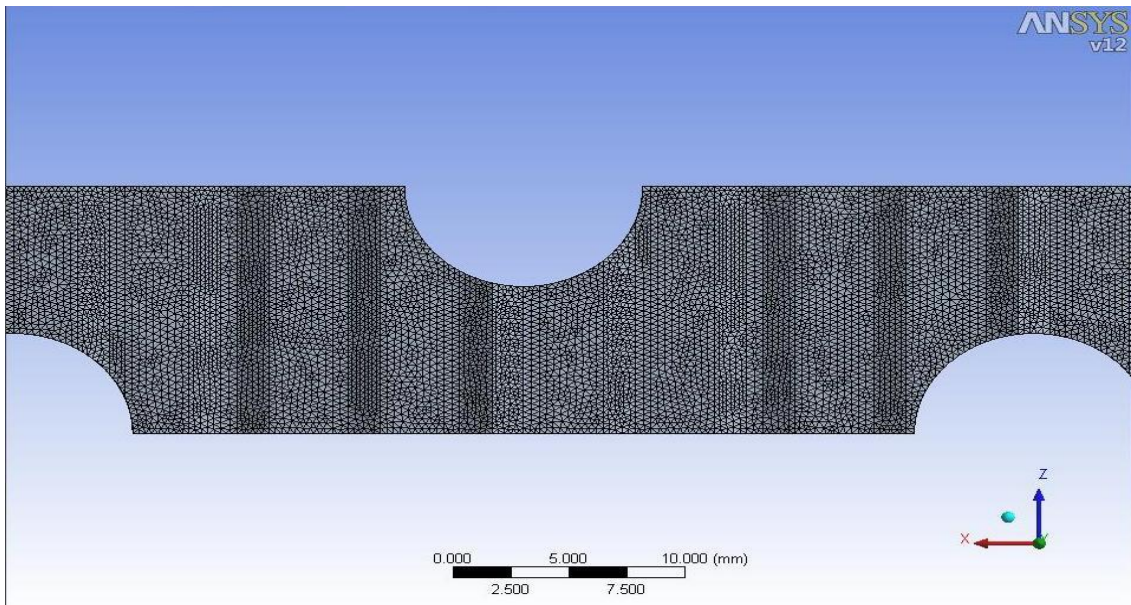
|                           |      |            |
|---------------------------|------|------------|
| Lamel formu               |      | Patlatmalı |
| Borular arası mesafe (A)  | mm   | 25,4       |
| Sıralar arası mesafe (B)  | mm   | 22         |
| Lamel kalınlığı           | mm   | 0,12       |
| Lameller arası mesafe (h) | mm   | 2,5        |
| Boru dış çapı (d)         | mm   | 10,3       |
| Boru kalınlığı            | mm   | 0,35       |
| Boru sayısı               | adet | 1/2        |
| Sıra sayısı               | adet | 4          |

#### 4.6 Patlatmalı Lamel Modelinde Ağ Oluşturma

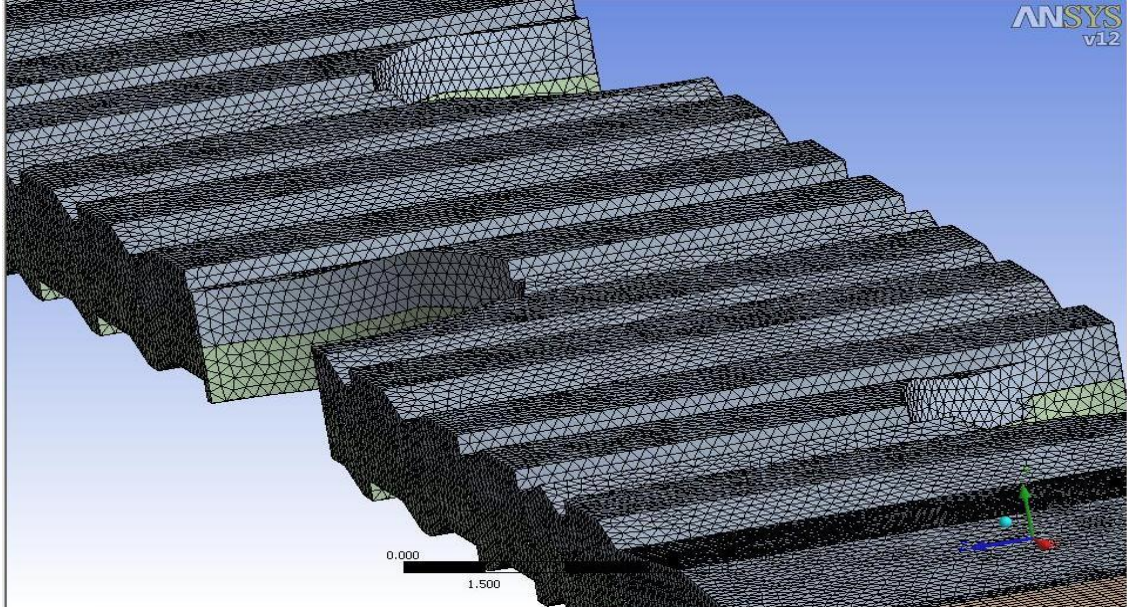
Modele ait ağ görüntüsü Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Oluşturulan ağ yapısına ait düğüm noktası sayısı, eleman sayısı, minimum ve maksimum skewness değerine ait bilgiler ise Çizelge 4.6’de yer almaktadır.

Çizelge 4.6 Patlatmalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısına ait bilgiler

|                                    |             |                         |
|------------------------------------|-------------|-------------------------|
| <b>Node (Düğüm Noktası) Sayısı</b> |             | 319895                  |
| <b>Eleman Sayısı</b>               |             | 1223802                 |
| <b>Skewness</b>                    | <b>Min.</b> | $1,305 \times 10^{-10}$ |
|                                    | <b>Max.</b> | 0,861                   |



Şekil 4.11 Patlatmalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısı önden görünüşü



Şekil 4.12 Patlatmalı lamel formu için oluşturulan ağ yapısı detay görünüşü

Meshleme (ağ oluşturma) işlemi tamamlandıktan sonra modelde tanımlanması gereken ve çözümleme de sınır koşullarının tanımlanacağı giriş, çıkış, boru yüzeyi, lamel yüzeyi, interior bölgeleri ve çözüm esnasında periyodiklik sınır koşulları tanımlanacak olan yüzeyler adlandırıldı. Oluşturulan Ansys Workbench Mesh dosyası Ansys Fluent programına aktarılır. Mesh verilerinin Fluent'e aktarılması için Mesh dosyasının update edilmesi de gerekmektedir.

#### 4.7 Sayısal Çözüm

Sayısal çözümün yapılması için ANSYS Workbench Mesh modülündeki mesh dosyası Fluent çözücü modülüne aktarılır. Sonrasında yapılan işlemler aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır.

- FLUENT programı 3ddp (3 dimensions, double precision) olarak başlatılır.
- “Check” butonuna basılarak ağ yapısı bilgileri kontrol edilir.
- “Scale” butonundan mesh dosyasının mm ölçeğinde yaratıldığı tanımlanır.
- **Çözüm Modelinin Seçilmesi:**

Çözümde kullanılacak olan giriş akış hızlarından hesaplanan Reynolds sayısı değerleri dikkate alındığında akışın girişte laminar olduğu görülmektedir, bu nedenle akış tipi laminar seçilmiştir. Kanatlı borulu ısı değiştiricisinin sınırlı bir kısmının modellendiği çözümde konjuge ısı transferinin incelenebilmesi için enerji denklemi aktifleştirildi.

- **Malzeme Seçilmesi:**

Boru malzemesi olan bakır ve lamel malzemesi olan alüminyum fluent kütüphanesinden yararlanılarak tanımlandı. Lamel yüzeylerinden akışı gerçekleşecek olan hava için de malzeme tanımında, giriş sıcaklığı 25°C ve boru sıcaklığı 40°C olacak çözümde yakın sıcaklık değerleri olması dolayısıyla, sabit değerler alınmış 25°C – 40°C arasında değişecek olan hava sıcaklığı değerleri ihmal edilmiştir.

- **Sınır koşullarının seçilmesi:**

Giriş koşulu olarak *velocity inlet* şartı, çıkış koşulu *pressure outlet* sınır şartı için ise gauge basıncı tanımlanır. Girişteki havanın sıcaklığı 25°C olarak tanımlanırken boru yüzeylerinin sıcaklığı 40°C sabit sıcaklık olarak tanımlanmıştır. Periyodiklik sınır koşulu kabulü yapılacak yüzeyler için de; Ansys Fluent programında periyodiklik tanımlaması yapılmıştır. Her bir lamel formunun karşılaştırılmasında kullanılacak 4 farklı giriş hızı için debi ve Reynolds sayısı hesaplamaları ve diğer sınır koşulları bilgileri Çizelge 3.6’da sunulmuştur.

Çizelge 4.7 Lamel formların sayısal çözümünde kullanılan sınır koşulları

| İnlet (velocity inlet) |             |                 |                      | Outlet (pressure outlet) |
|------------------------|-------------|-----------------|----------------------|--------------------------|
| Hız (m/s)              | Debi (kg/s) | Reynolds Sayısı | Giriş Sıcaklığı (°C) | Çıkış Basıncı (Pa)       |
| 1                      | 3,68E-05    | 268             | 25                   | 0                        |
| 2                      | 7,37E-05    | 536             | 25                   | 0                        |
| 3                      | 1,10E-04    | 804             | 25                   | 0                        |
| 4                      | 1,47E-04    | 1072            | 25                   | 0                        |

- **Çözüm methodunun seçilmesi:**

Çözüm methodlarının seçiminde basınç-hız bileşimi ve basınç için default değer olan *SIMPLE* ve *Standard* olarak bırakılırken, momentum ve enerji çözümünde *Second Order Upwind* seçimi yapılmıştır.

- **Yakınsama mertebesinin seçilmesi:**

Yakınsama değerleri hız değişkenleri için  $10^{-4}$ , enerji için ise  $10^{-7}$  olarak seçilmiştir. Çözümlerde yakınsama kriterleri yakalansa da iterasyonlar belli bir sayıdaki iterasyona kadar devam ettirilmiştir yani çözümler yakınsama kriterlerinden daha çok iterasyon sayısına bağlı olarak elde edilmiştir.

- **Referans değerlerin atanması:**

Giriş sınır koşulundaki değerler referans alınmıştır. İterasyonların başlatılacağı tahmini değerler *compute from inlet* seçeneği ile girişteki değerlerden alınmıştır ve iterasyonlar başlatılmıştır.

- **İterasyonu başlat:**

Referans değerlerinin atanmasının ardından iterasyon sayısı 800 olarak girilir ve *calculate* tuşuna basılarak iterasyon başlatılır.

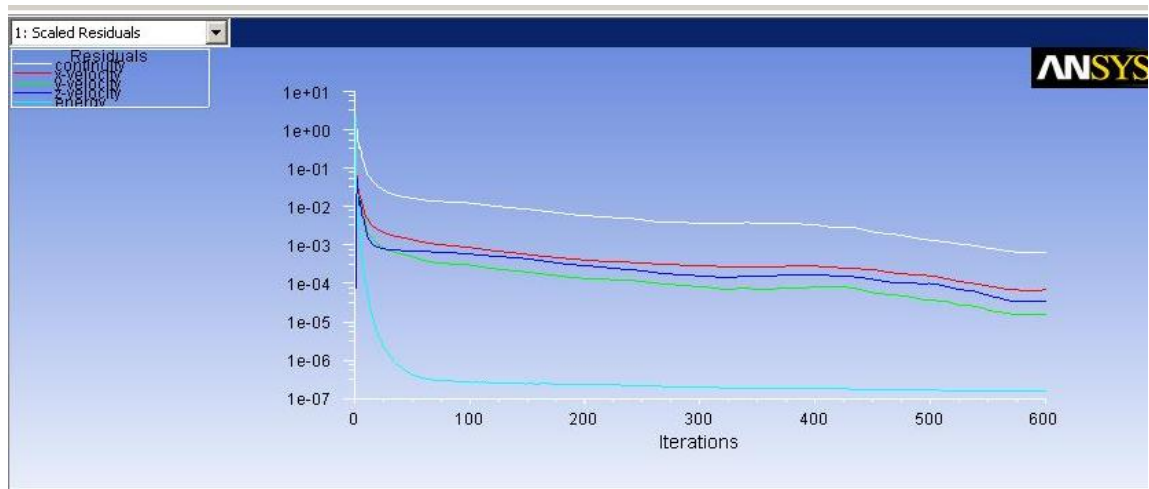
- **Sonuçları kaydet:**

Çözümler yapılmış ve residuallerin iterasyona bağlı grafiklerinin çözüme uygunluğunun kontrol edilmesinin ardından çözüm kaydedilmiştir.

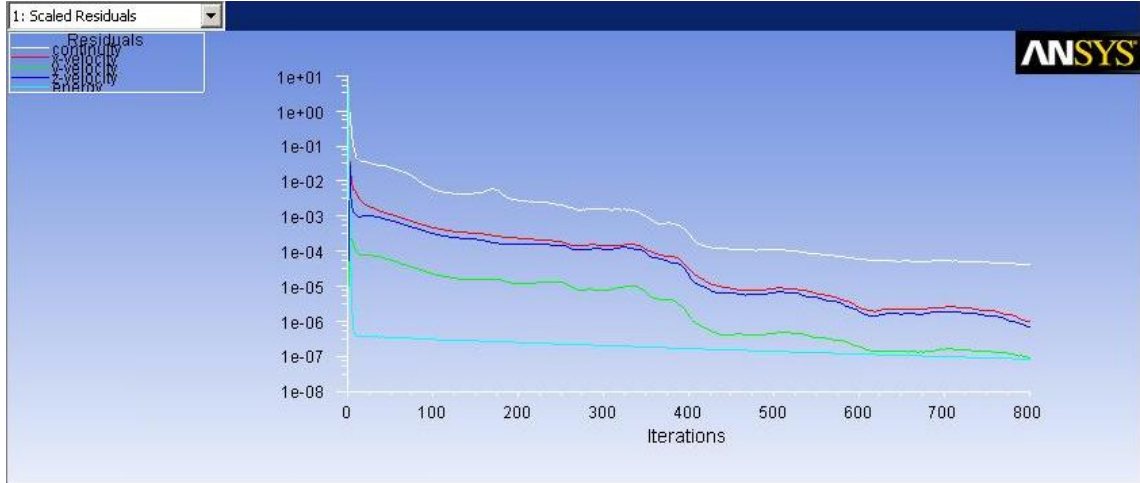
## 4.8 Çözüm Sonuçları

### 4.8.1 Düz Lamel Formu Çözümleri

Çözümler modelden modele farklılık göstermekle birlikte 1.73 GHz işlemciye ve 1 GB RAM'e sahip bilgisayarda ortalama 16-20 saat sürmüştür.

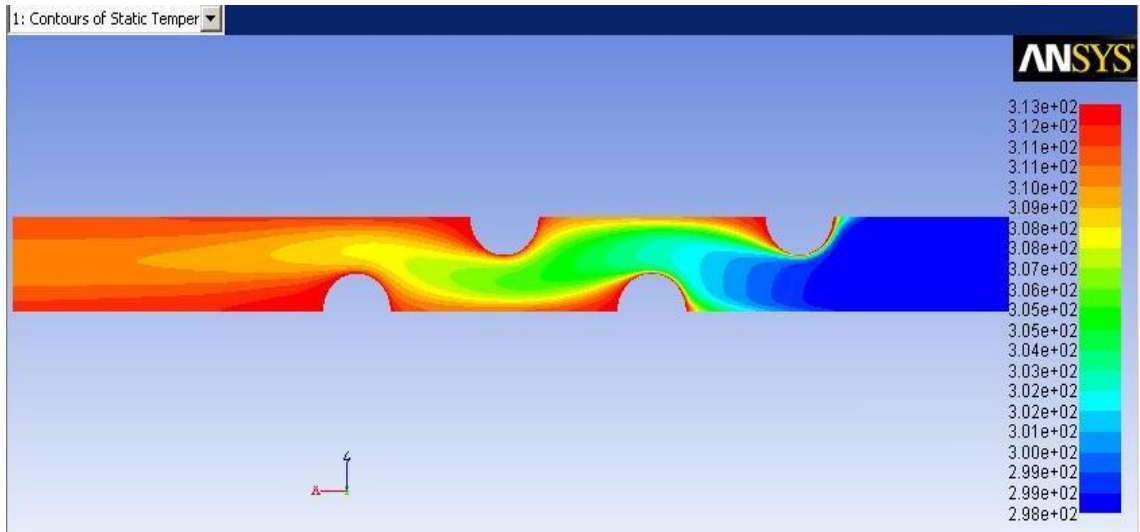


Şekil 4.13 Düz lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (1 m/s)

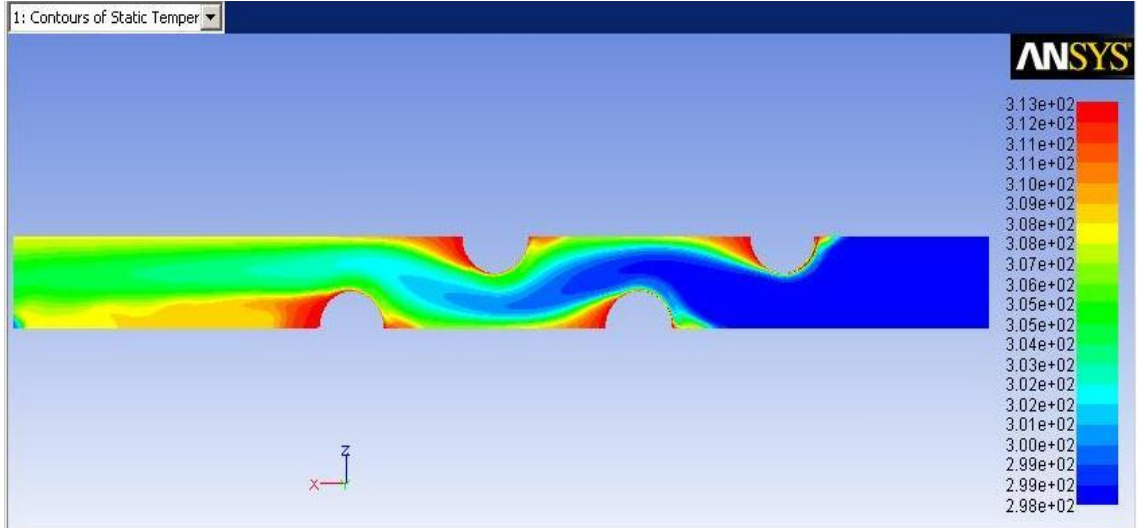


Şekil 4.14 Düz lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (3 m/s)

Düz lamel formunda residuallerin çözüme bağlı grafikleri yukarıda yer alan şekillerdeki gibidir. Bu çözümlerin elde edilmesinin ardından düz lamel formunda gerçekleşen lamel yakınında oluşan hız, sıcaklık ve basınç konturleri aşağıdaki gibi oluşturulmuştur. Çözümler 1, 2, 3 ve 4 m/s giriş hızları için yapılmıştır ancak oluşan çözüm karakteristikleri benzer olduğundan sadece 1 ve 3 m/s hız değerleri için oluşturulan şekillere yer verilecektir.

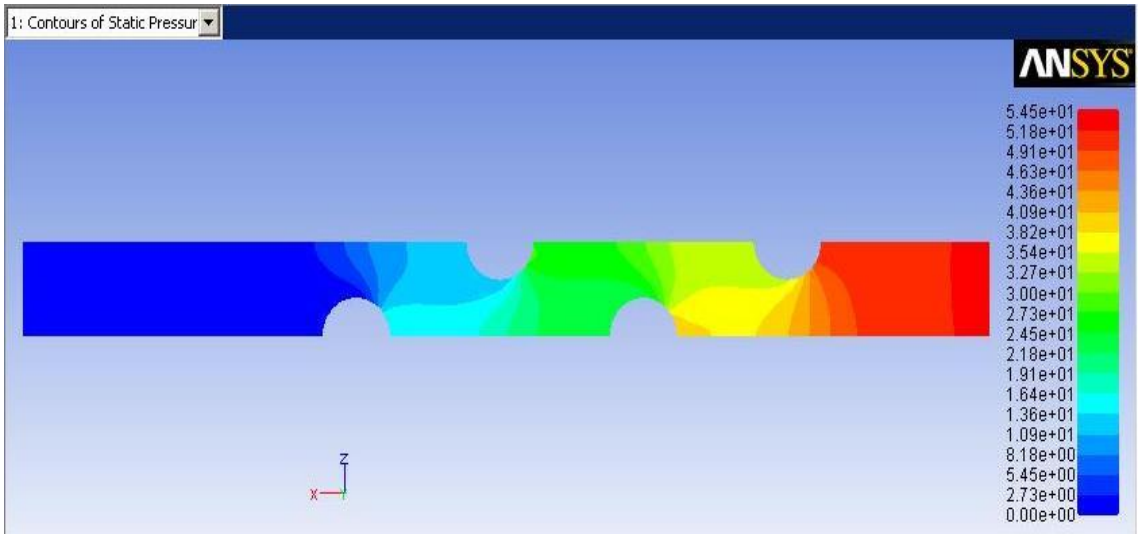


Şekil 4.15 Düz lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (1 m/s)

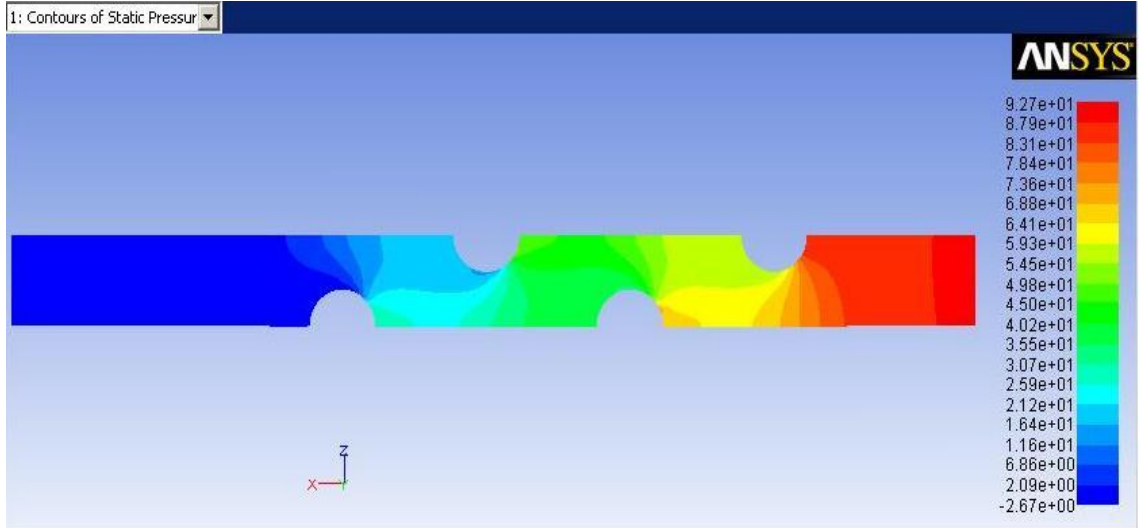


Şekil 4.16 Düz lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (3 m/s)

Havanın bataryaya giriş hızı arttıkça çıkış sıcaklık değerinin boru sıcaklık değerinden uzaklaştığı görülmektedir. Bu durum akışın hızının ve debisinin yüksek olması dolayısıyla havanın boruların sıcaklığına yaklaşmadan bataryadan çıkış yaptığını ortaya koymaktadır. Bu bilinen ve beklenen bir durumdur. Ancak hava hızının artması hava debisinin artması anlamına geldiğinden bataryadan elde edilen ısı transferi miktarını artmaktadır.

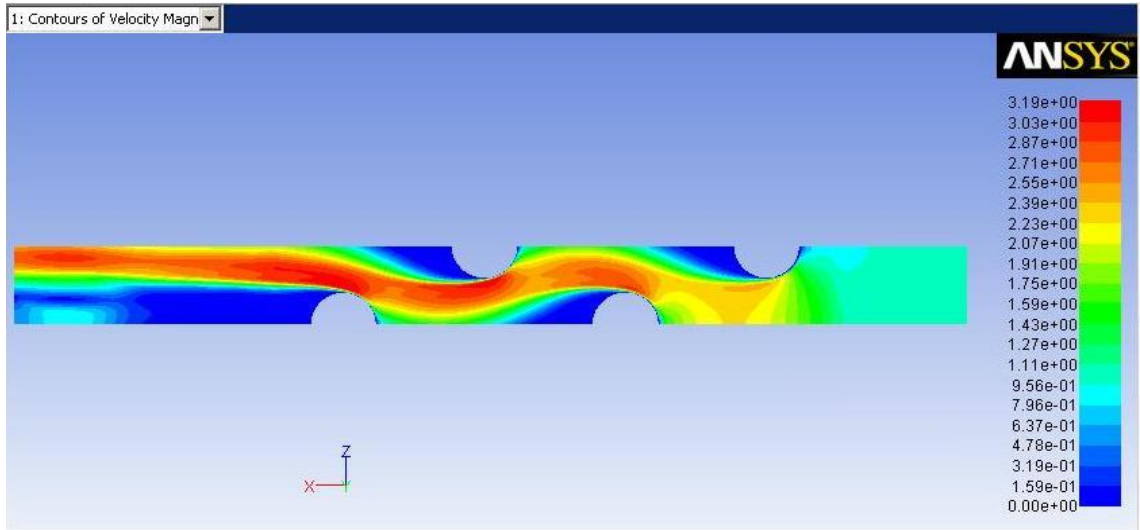


Şekil 4.17 Düz lamel çözümündeki basınç konturleri (1 m/s)

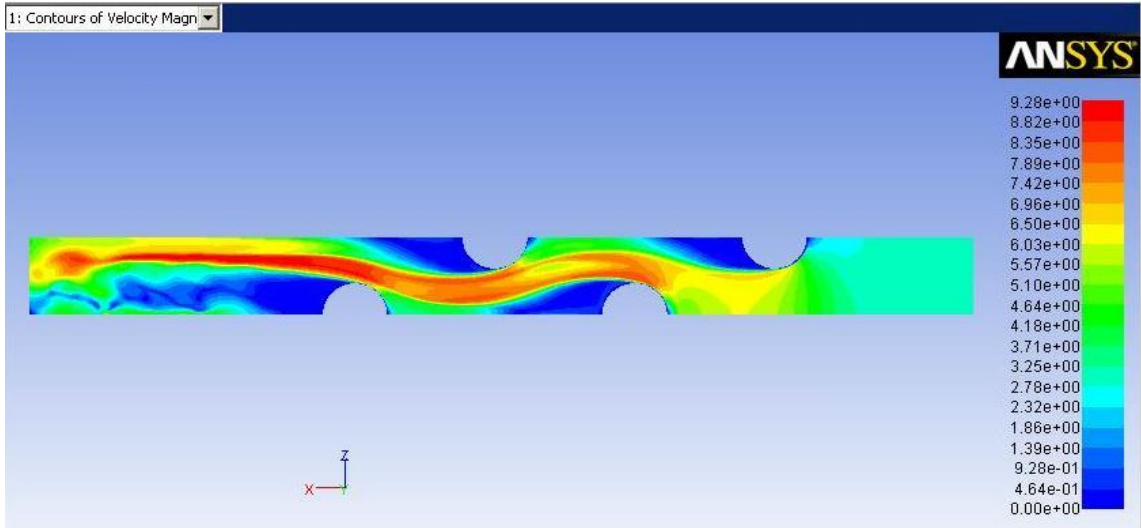


Şekil 4.18 Düz lamel çözümündeki basınç konturleri (3 m/s)

Laminar çözüm yapılan düz lamel formu için elde edilen basınç kontürleri yukarıdaki şekillerde elde edildiği gibidir. Basınç kontürleri girişte maksimum olacak şekilde oluşmaktadır. Hava lameller arasında yol alırken karşılaştığı boru yüzeylerinde şekildeki karakterisiği göstermekte ve kayıplara uğrayarak bataryayı terk etmektedir.



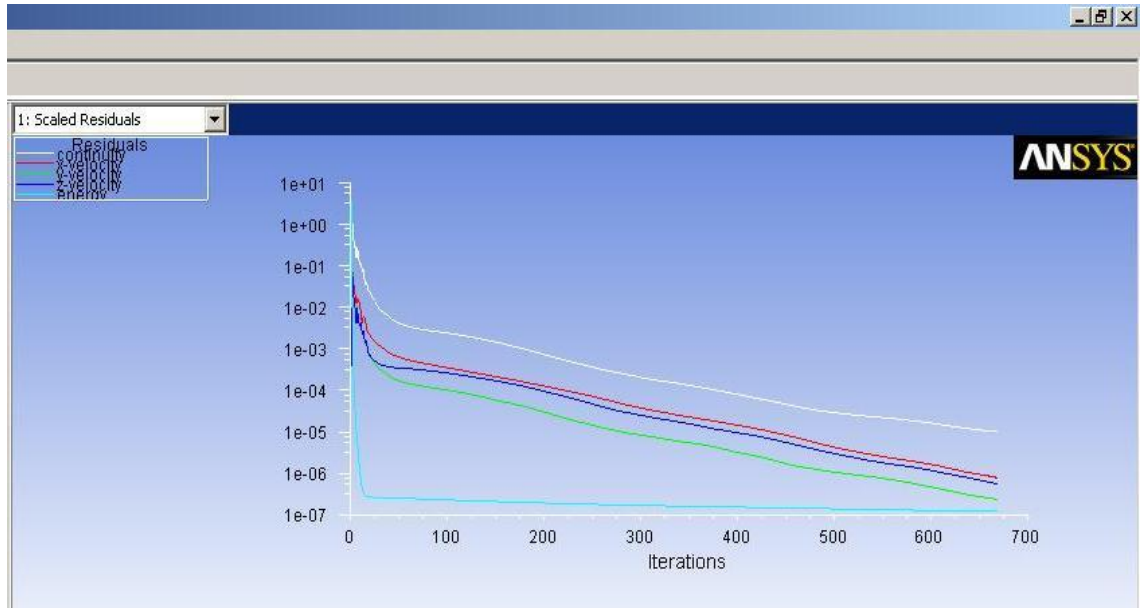
Şekil 4.19 Düz lamel çözümündeki hız konturleri (1 m/s)



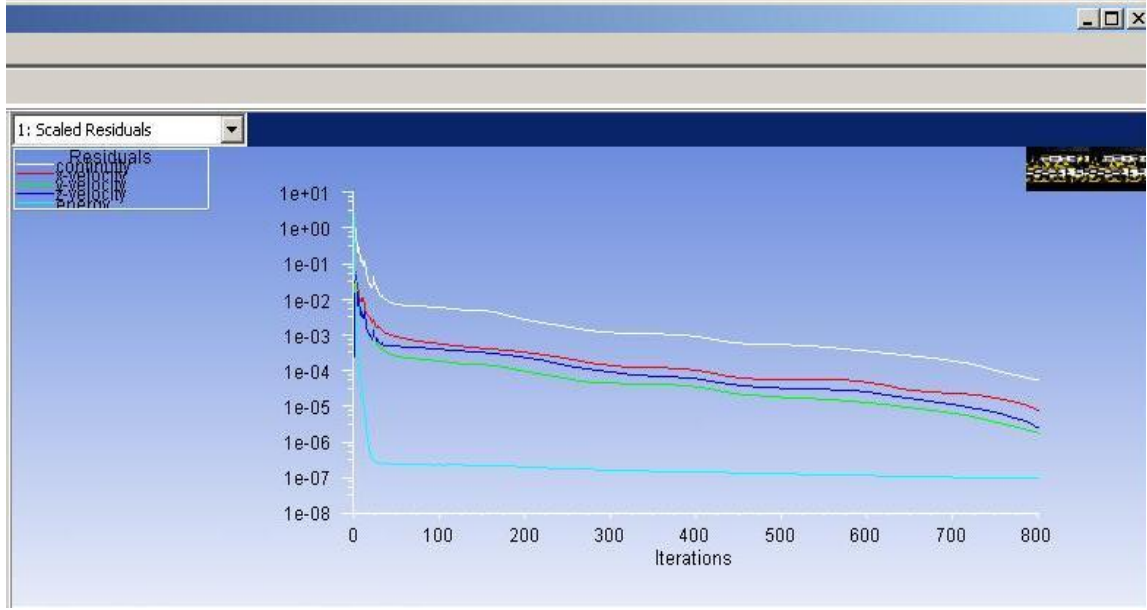
Şekil 4.20 Düz lamel çözümündeki hız konturleri (3 m/s)

#### 4.8.2 Dalgalı Lamel Formu Çözümleri

Dalgalı lamel formuna ait çözümlerde elde edilen iterasyona bağlı residualler aşağıda yer aldığı gibidir. Çözümler istenen iterasyon sayısında yapılmıştır ve yakınsama kriterlerini sağlamıştır.

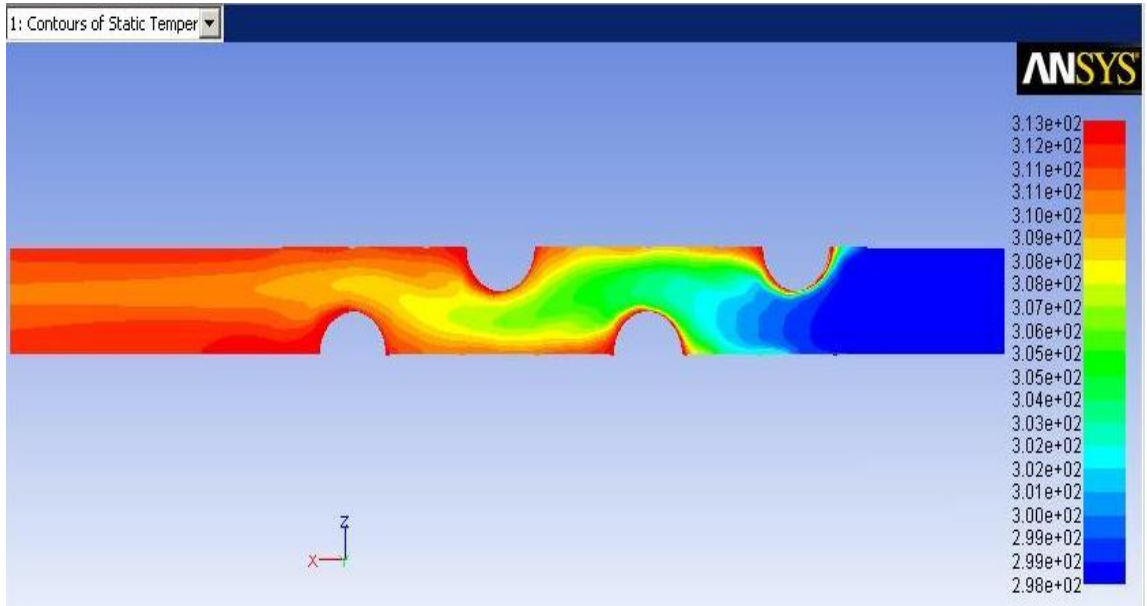


Şekil 4.21 Dalgalı lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (1 m/s)

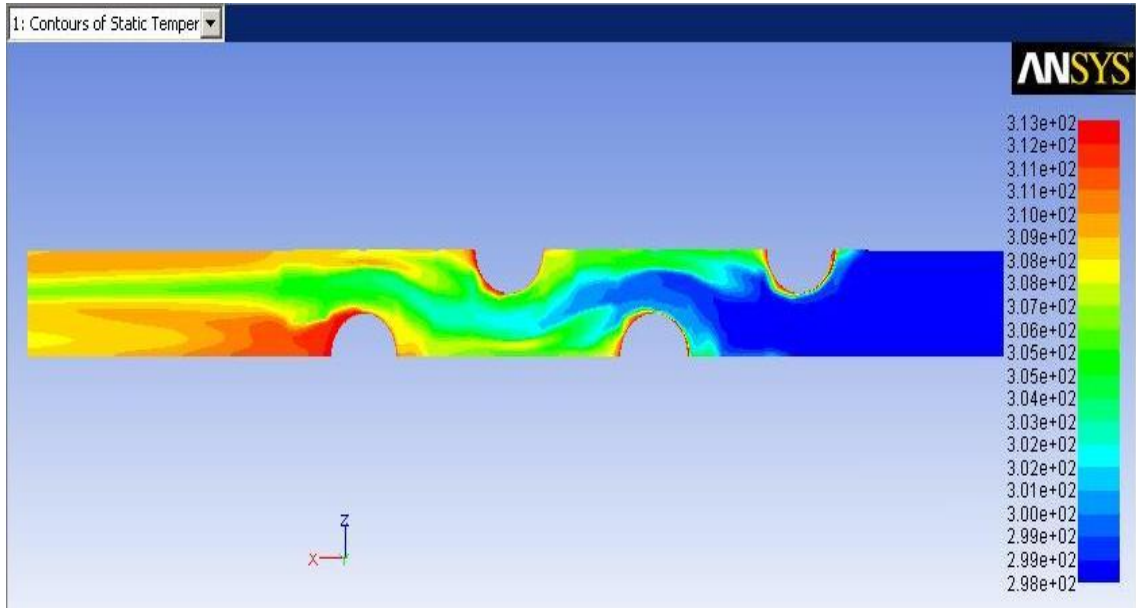


Şekil 4.22 Dalgalı lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (3 m/s)

Dalgalı lamel formunda da 1, 2, 3 ve 4 m/s hızlar için çözümler yapılmıştır. Dalgalı lamel formunda lamel yakınında oluşan hız, sıcaklık ve basınç konturleri 1 ve 3 m/s hızlarda aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.

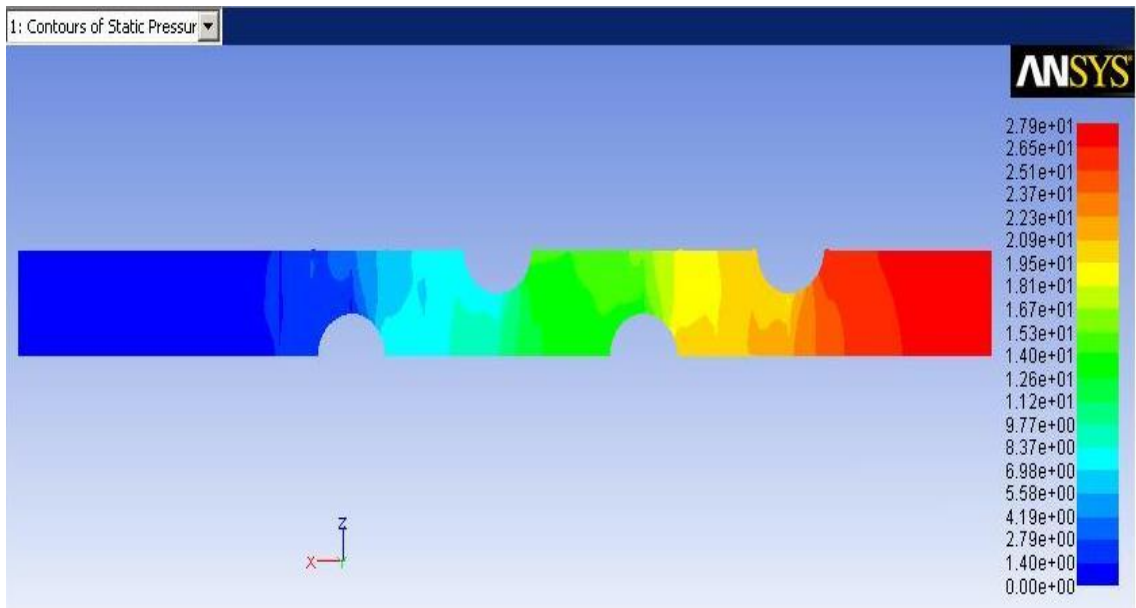


Şekil 4.23 Dalgalı lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (1 m/s)

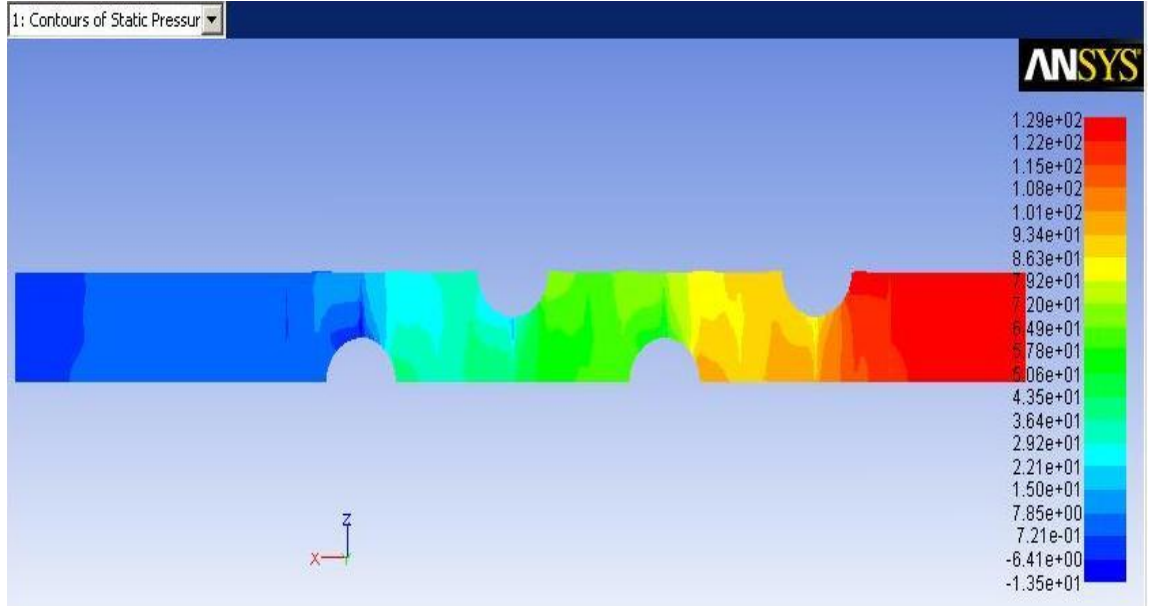


Şekil 4.24 Dalgalı lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (3 m/s)

Dalgalı lamel formunda da düz lamel formuna benzer karakterde sıcaklık kontürleri elde edilmiştir.

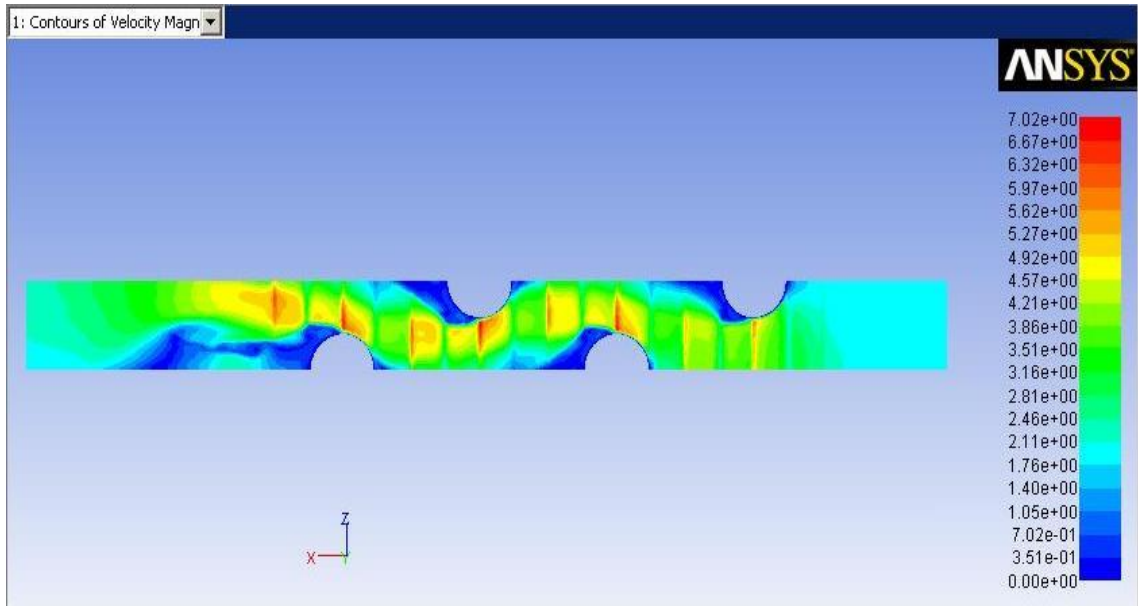


Şekil 4.25 Dalgalı lamel çözümündeki basınç konturleri (1 m/s)

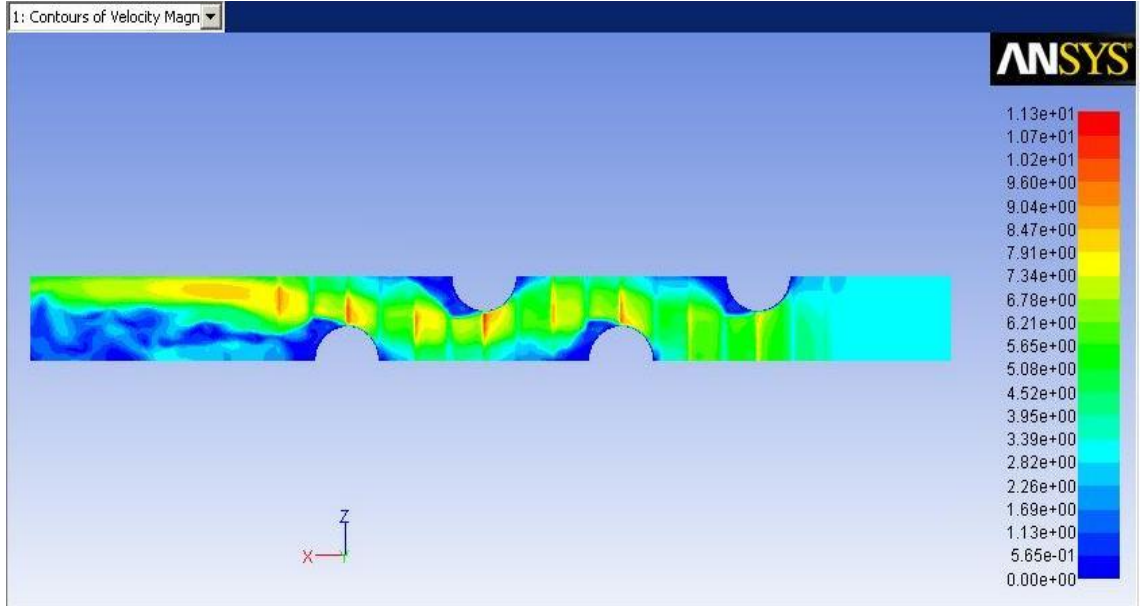


Şekil 4.26 Dalgalı lamel çözümündeki basınç konturleri (3 m/s)

Düz lamel formunda olduğu gibi laminar çözüm yapılan dalgalı lamel formu için elde edilen basınç konturleri yukarıdaki şekillerde elde edildiği gibidir. Girişteki kesite ve hıza bağlı basınç değerinin aynı olduğu düşünüldüğünde dalgalı lamel formunda oluşan basınç kayıpları düz lamel formuna göre daha yüksek olmuştur.



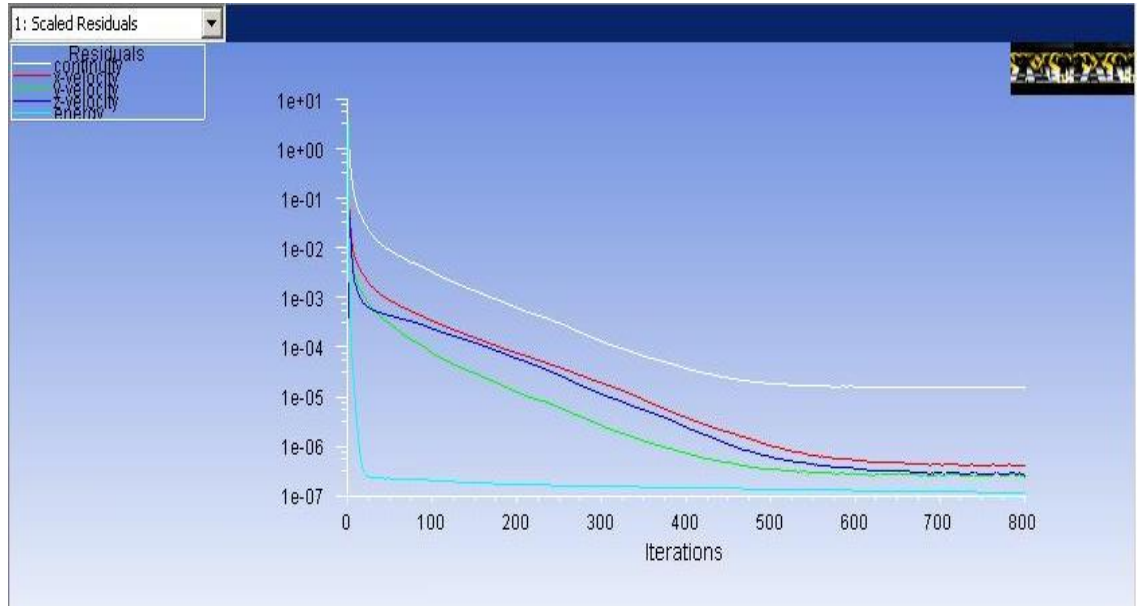
Şekil 4.27 Dalgalı lamel çözümündeki hız konturleri (1 m/s)



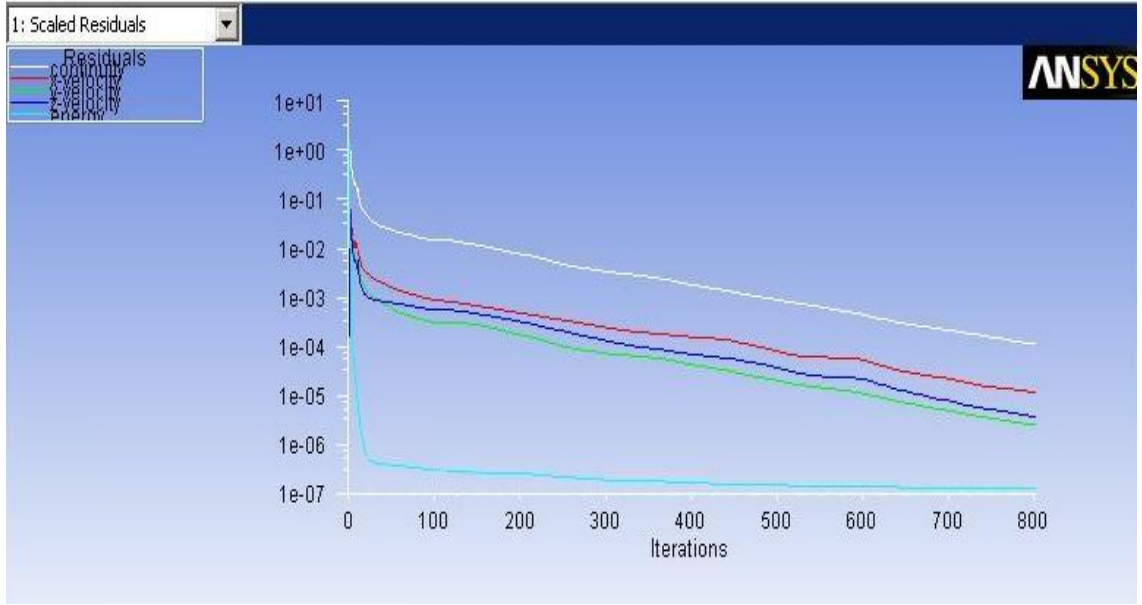
Şekil 4.28 Dalgalı lamel çözümündeki hız konturleri (3 m/s)

#### 4.8.3 Patlatmalı Lamel Formu Çözümleri

Patlatmalı lamel formunda da istenen hassasiyette çözümler elde edilmiştir, bu çözümlere ait residualler aşağıdaki şekillerde yer almaktadır.

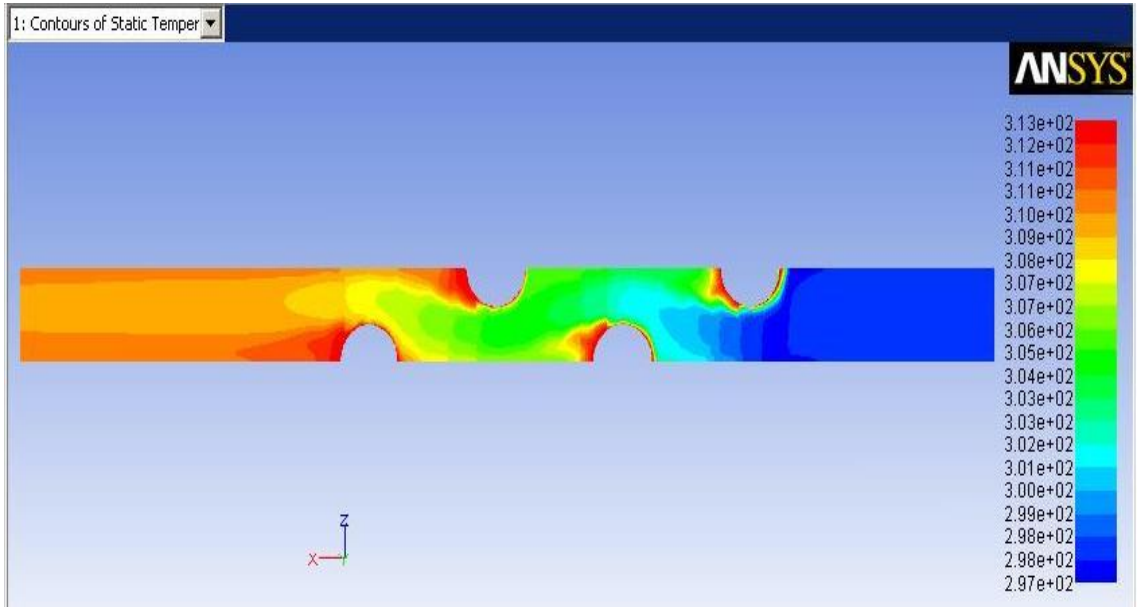


Şekil 4.29 Patlatmalı lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (1 m/s)

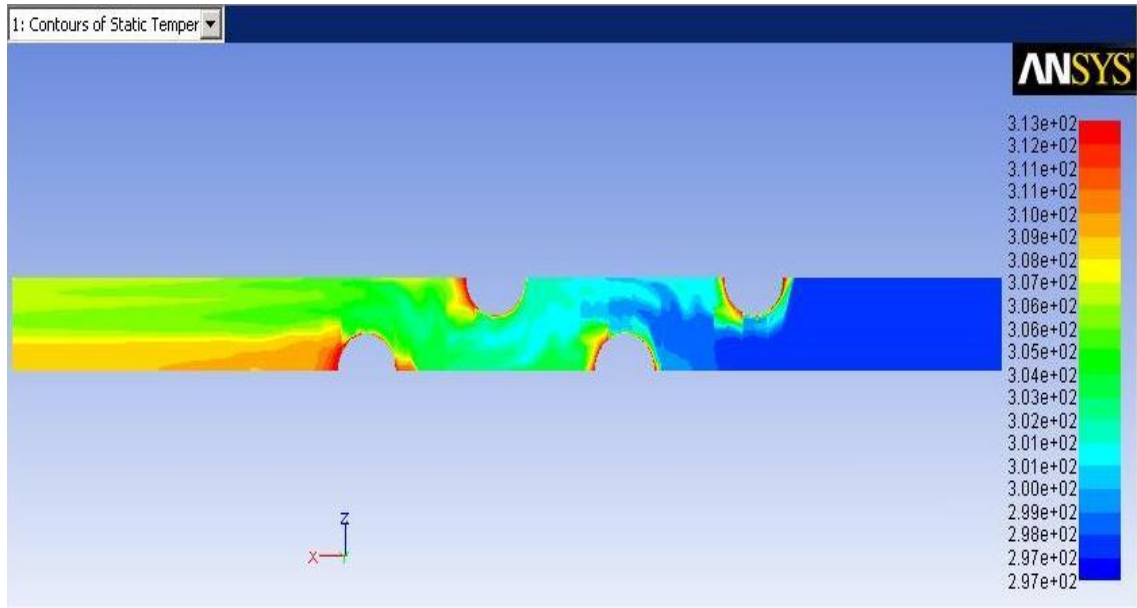


Şekil 4.30 Patlatmalı lamel çözümünde residuallerin iterasyon sayısına bağlı değişimi (3 m/s)

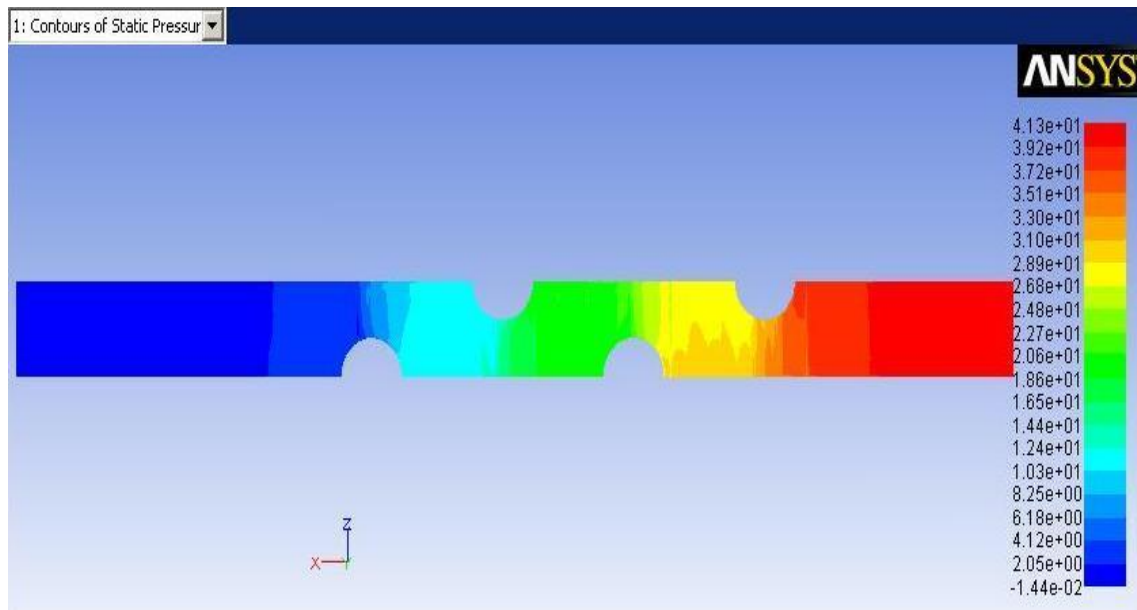
Patlatmalı lamel formunda da 4 farklı hız için yapılan çözümlerde oluşan hız, sıcaklık ve basınç konturleri 1 ve 3 m/s hızlarda aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



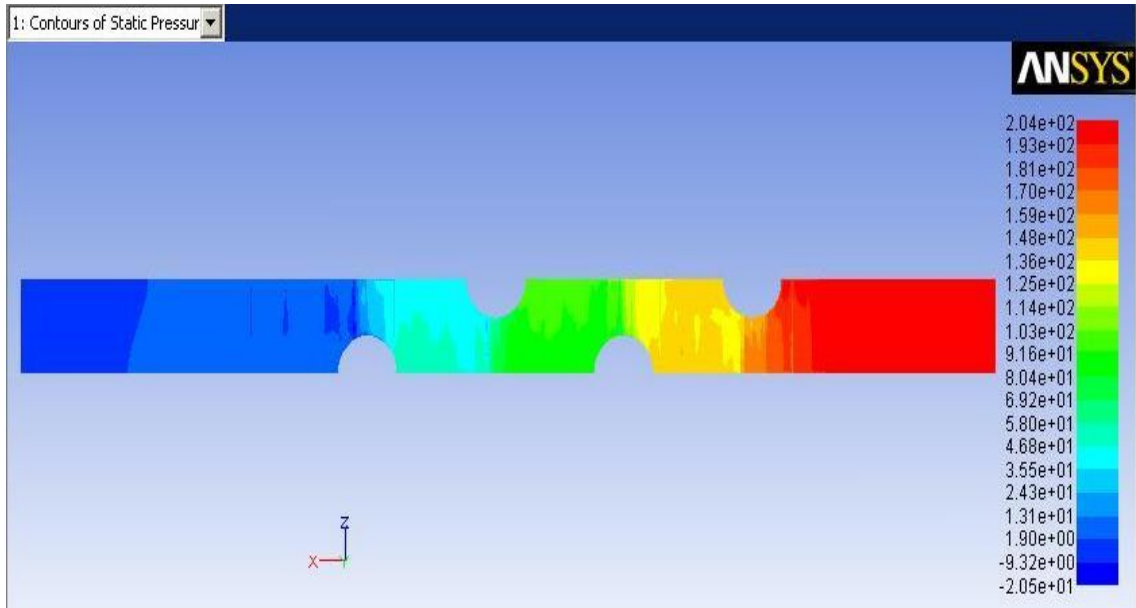
Şekil 4.31 Patlatmalı lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (1 m/s)



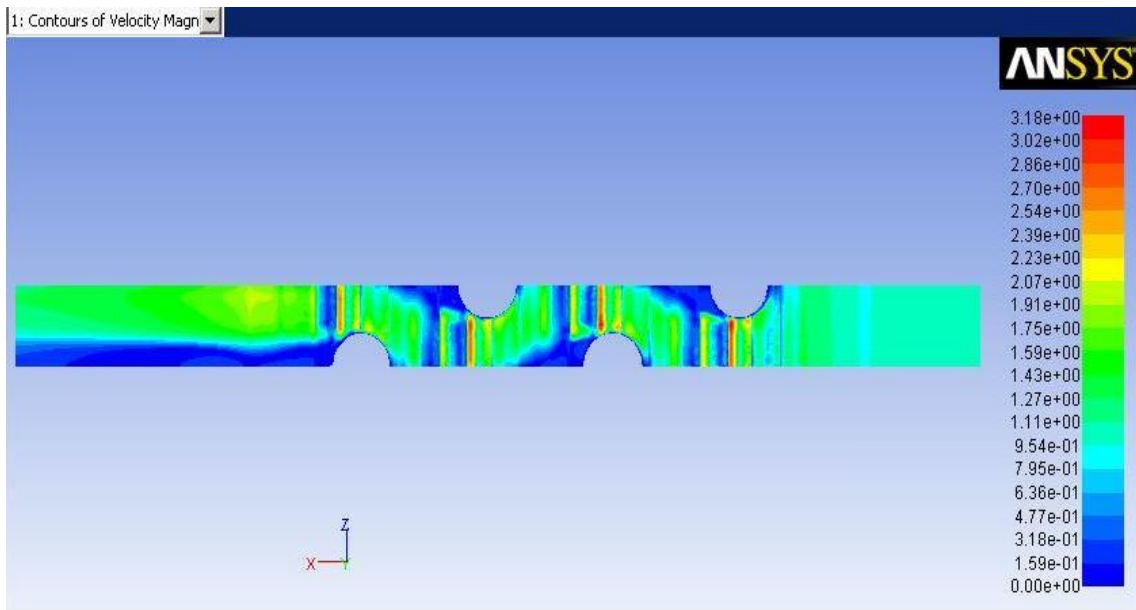
Şekil 4.32 Patlamalı lamel çözümündeki sıcaklık konturleri (3 m/s)



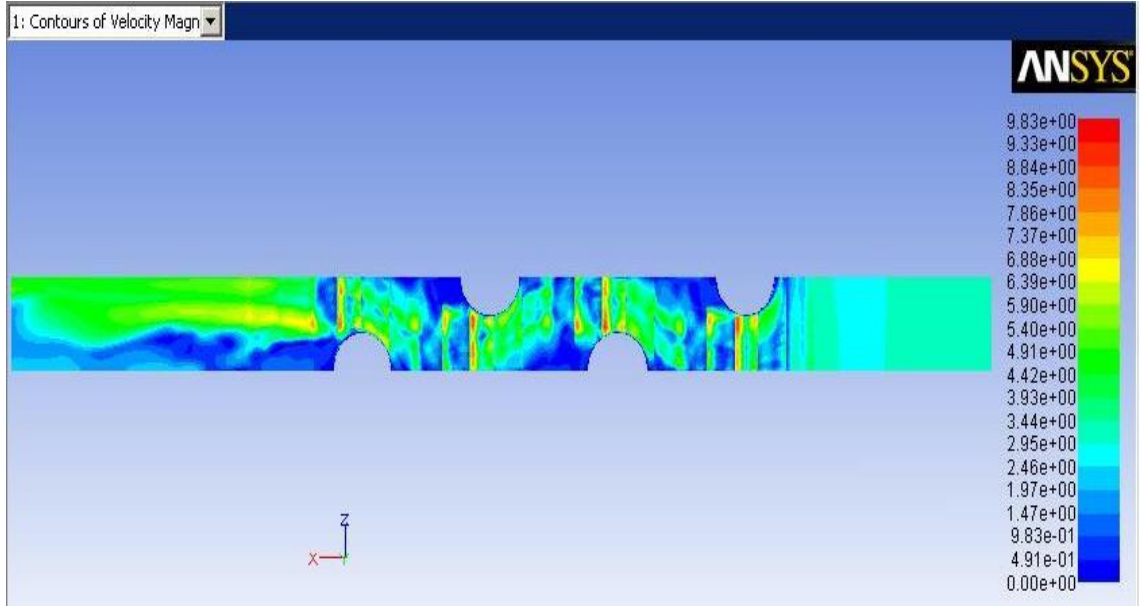
Şekil 4.33 Patlatmalı lamel çözümündeki basınç konturleri (1 m/s)



Şekil 4.34 Patlatmalı lamel çözümündeki basınç konturleri (3 m/s)



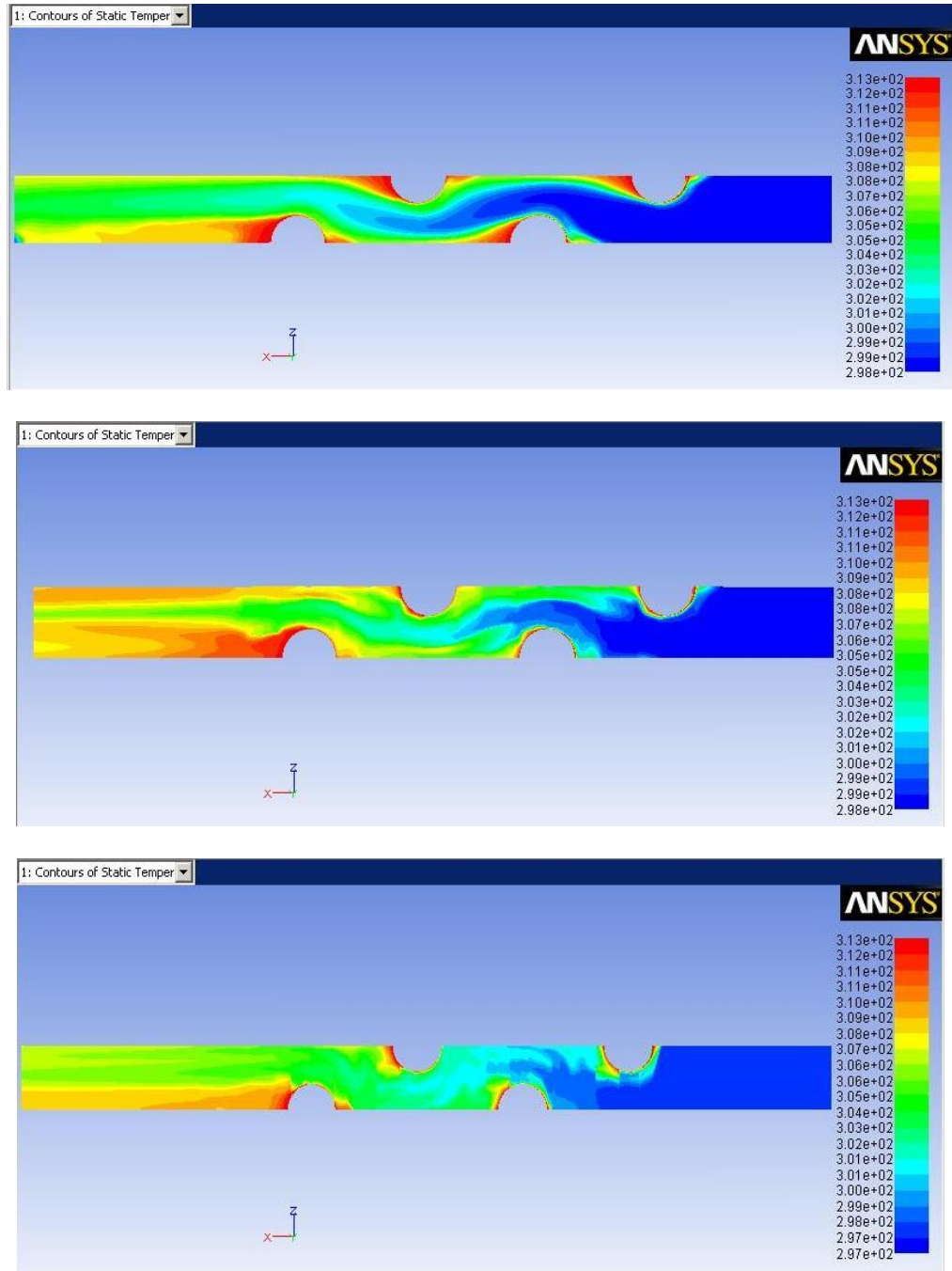
Şekil 4.35 Patlatmalı lamel çözümündeki hız konturleri (1 m/s)



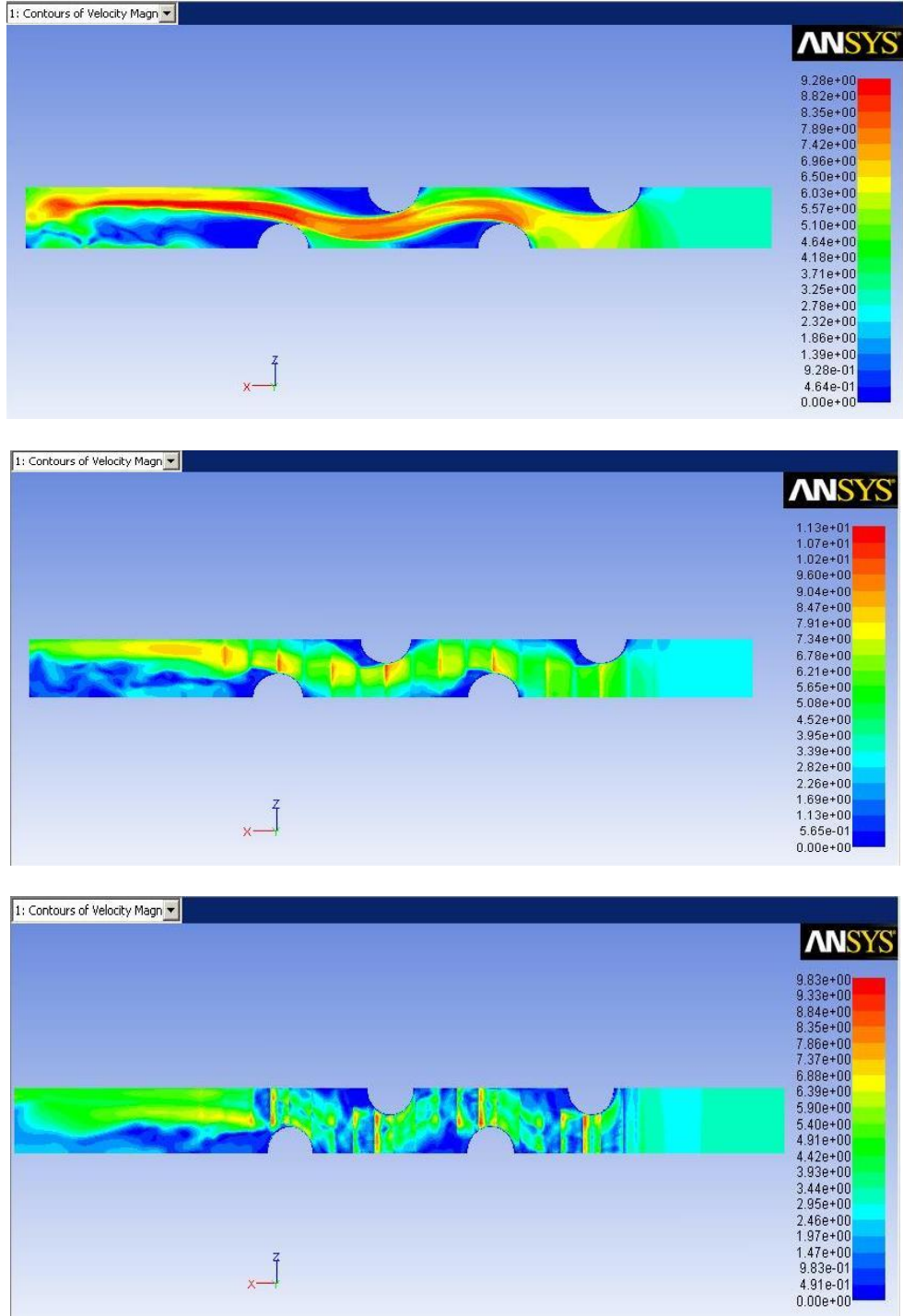
Şekil 4.36 Patlatmalı lamel çözümündeki hız konturleri (3 m/s)

#### 4.9 Çözümlerin Değerlendirilmesi

Düz, dalgalı ve patlatmalı lamel formları için elde edilen sonuçların değerlendirilmesi noktasında elde edilen sıcaklık, basınç ve hız konturlerinin aynı hızda elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması uygun olacaktır. Karşılaştırmanın yapılabilmesi için 3 m/s hız değerinde düz, dalgalı ve patlatmalı lamel formlarına ait sıcaklık kontürleri Şekil 4.37’de, hız kontürleri ise Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.37 Düz, dalgalı ve patlatmalı lamel formlarında oluşan sıcaklık konturleri(3 m/s)



Şekil 4.38 Düz, dalgalı ve patlatmalı lamel formlarında oluşan hız konturleri(3 m/s)

Şekillerde de görüldüğü gibi farklı lamel formlarındaki akış karakteristikleri lamel formu özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir. Çözüm sonuçlarında elde edilmek istenen değerler üç farklı lamel formunda gerçekleşen ısı transferi miktarı ve basınç kaybı değerleridir. Lamel üzerinde yer alan formların akışta oluşturduğu yönlendirme ve hız değişimleri, lamel formlarında farklı basınç düşümlerine neden olduğu gibi artan lamel dış

yüzey alanı dolayısıyla daha fazla ısı transferi elde edilmesini sağlamaktadır. Lamel formlarında sayısal çözümler sonucu elde edilen sayısal veriler Çizelge 4.8’de yer almaktadır.

Çizelge 4.8 Lamel formları sayısal çözüm değerleri: düz, dalgalı ve patlatmalı lamel

| Düz Lamel Formu |        |          | Dalgalı Lamel Formu |        |          | Patlatmalı Lamel Formu |        |          |
|-----------------|--------|----------|---------------------|--------|----------|------------------------|--------|----------|
| Hız: 1 m/s      |        |          | Hız: 1 m/s          |        |          | Hız: 1 m/s             |        |          |
| Debi            | kg/s   | 3,89E-05 | Debi                | kg/s   | 3,89E-05 | Debi                   | kg/s   | 3,89E-05 |
| Isı Transferi   | W      | 0,375    | Isı Transferi       | W      | 0,469    | Isı Transferi          | W      | 0,495    |
| Basınç Kaybı    | pascal | 9,399    | Basınç Kaybı        | pascal | 11,538   | Basınç Kaybı           | pascal | 17,676   |

| Hız: 2 m/s    |        |          | Hız: 2 m/s    |        |          | Hız: 2 m/s    |        |          |
|---------------|--------|----------|---------------|--------|----------|---------------|--------|----------|
| Debi          | kg/s   | 7,78E-05 | Debi          | kg/s   | 7,78E-05 | Debi          | kg/s   | 7,78E-05 |
| Isı Transferi | W      | 0,618    | Isı Transferi | W      | 0,692    | Isı Transferi | W      | 0,779    |
| Basınç Kaybı  | pascal | 20,950   | Basınç Kaybı  | pascal | 28,387   | Basınç Kaybı  | pascal | 45,817   |

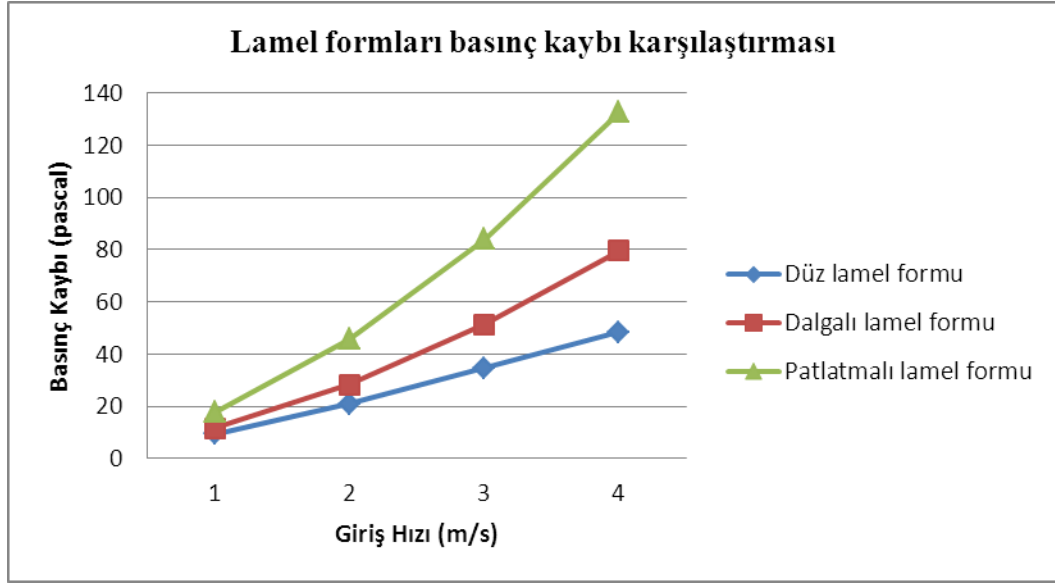
  

| Hız: 3 m/s    |        |          | Hız: 3 m/s    |        |          | Hız: 3 m/s    |        |          |
|---------------|--------|----------|---------------|--------|----------|---------------|--------|----------|
| Debi          | kg/s   | 1,17E-04 | Debi          | kg/s   | 1,17E-04 | Debi          | kg/s   | 1,17E-04 |
| Isı Transferi | W      | 0,868    | Isı Transferi | W      | 0,900    | Isı Transferi | W      | 1,036    |
| Basınç Kaybı  | pascal | 34,561   | Basınç Kaybı  | pascal | 51,271   | Basınç Kaybı  | pascal | 84,045   |

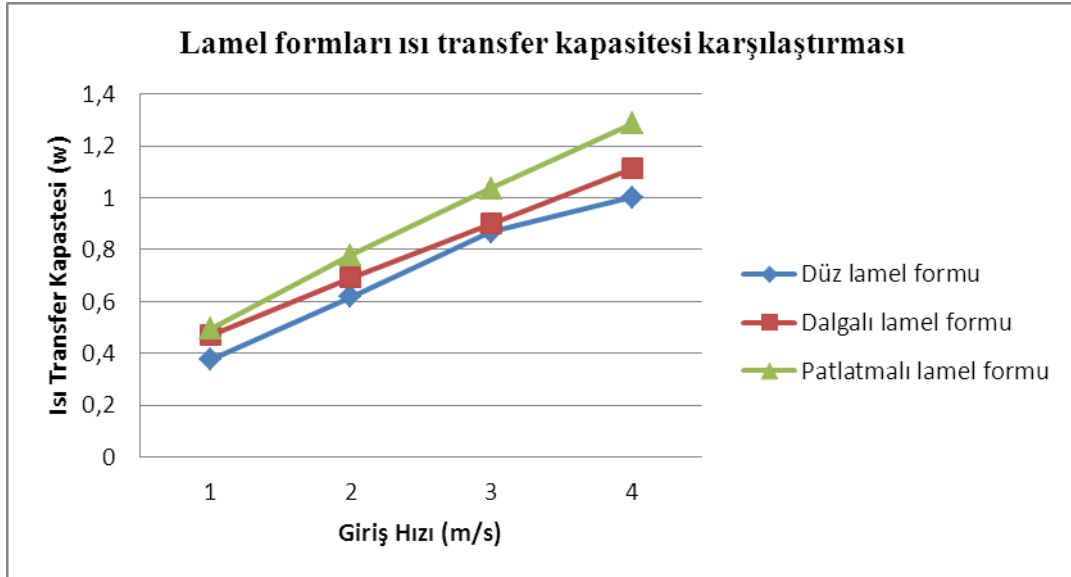
  

| Hız: 4 m/s    |        |          | Hız: 4 m/s    |        |          | Hız: 4 m/s    |        |          |
|---------------|--------|----------|---------------|--------|----------|---------------|--------|----------|
| Debi          | kg/s   | 1,56E-04 | Debi          | kg/s   | 1,56E-04 | Debi          | kg/s   | 1,56E-04 |
| Isı Transferi | W      | 1,002    | Isı Transferi | W      | 1,112    | Isı Transferi | W      | 1,285    |
| Basınç Kaybı  | pascal | 48,429   | Basınç Kaybı  | pascal | 79,473   | Basınç Kaybı  | pascal | 132,631  |

Lamel formları arasındaki farklılığın gözlemlenmesi için basınç kaybı sonuçlarının grafik üzerinde karşılaştırıldığı Şekil 4.39 ve ısı transfer miktarı sonuçlarının karşılaştırıldığı Şekil 4.40 oluşturulmuştur.



Şekil 4.39 Üç farklı lamel formunda basınç kaybının giriş hava hızına bağlı değişimi



Şekil 4.40 Üç farklı lamel formunda ısı transfer kapasitesinin giriş hava hızına bağlı değişimi

Kanatlı borulu ısı değiştiricisindeki farklı lamel formlarının performansı üzerine yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar, lamel üzerinde yapılan ısı transfer yüzeyini artıran ve akışı yönlendiren formların ısı transferine etkisinin dalgalı lamelde düz lamele oranla ortalama % 12, patlatmalı lamelde düz lamele oranla ortalama % 26 iyileşme sağlanmıştır.

Analizi yapılan dalgalı lamel formunu kullanan bir ısı değiştiricisi Fritem A.Ş. ortamla dengeli kalorimetrik test laboratuvarında test edilmiştir. Isı değiştiricisi ısı transfer yüzey alanı analizi yapılan lamel formunun 19200 katı alana sahiptir. Test edilen ısı değiştiricisi ile analizi yapılan modelin bilgileri Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Test edilen ısı değiştirici ve sayısal çözüm modeli tasarım bilgileri

|                           |      | Sayısal çözüm modeli | Test edilen ısı değiştiricisi |
|---------------------------|------|----------------------|-------------------------------|
| Lamel formu               | -    | Dalgalı              | Dalgalı                       |
| Borular arası mesafe (A)  | mm   | 25,4                 | 25,4                          |
| Sıralar arası mesafe (B)  | mm   | 22                   | 22                            |
| Lamel kalınlığı           | mm   | 0,12                 | 0,12                          |
| Lameller arası mesafe (h) | mm   | 2,5                  | 2,5                           |
| Boru dış çapı (d)         | mm   | 10,3                 | 10,3                          |
| Boru kalınlığı            | mm   | 0,35                 | 0,35                          |
| Boru sayısı               | adet | 1/2                  | 30                            |
| Sıra sayısı               | adet | 4                    | 4                             |
| Lamel adedi               | adet | 1                    | 320                           |

Testi yapılan ısı değiştiricisi bir kondenser bataryasıdır. Bu ürünlerde ilgili standartta yer alan test koşulları gereği ısı değiştiricisi hava giriş sıcaklığı 25°C, kondenzasyon sıcaklığı 40°C'dir. Ancak kondenser bataryalarına akışkan kompresör sonrası kızgın olarak giriş yapmaktadır. Bu test koşulunda da kondenser giriş sıcaklığı 64,98°C'dir, yani ısı değiştiricisindeki boru sıcaklığı kondenzasyon sıcaklığı olarak sabit almak sayısal çözümleme sonuçlarının bir miktar düşük çıkmasına neden olmuştur. Test edilen ısı değiştiricisi sonucu Ek'de verilmiştir. Test sonucunda yer alan bilgiler arasında sabit devirde dönen fanla çalışan kondenser ürününde de hava hızı analizlerde kullanılan 1,2,3 veya 4 m/s olarak değil 1,64 m/s olarak elde edilmesidir. Sayısal çözümü yapılan modelin ısı değiştiricisinin 19200 katı olması dolayısıyla test sonucu olan 13,83 kW değerinin 19200 değerine bölünmesi ile buluna değer karşılaştırma yapılması gereken asıl değer olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu değer  $13,83/19200 = 0,0007203 \text{ kW} = 0,7203 \text{ W}$  olarak hesaplanabilir. Bu noktada kondenser giriş sıcaklığındaki yüksek değer sayısal çözümleme esnasında hesaba katılmadığı bilinciyle yapılacak karşılaştırma için 4 farklı hızda yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarla oluşturulan grafiğin karakteristiğinden yaklaşık 1,64 m/s hızda dalgalı formu lamel için elde edilen kapasite 0,614 W olarak hesaplanmıştır. Test laboratuvarından elde edilen sonuç ile sayısal çözümlerden elde edilen sonuç arasında yaklaşık % 17 fark olduğu görülmektedir. Elde edilen fark sayısal çözümlerinin bu tip ısı değiştiricilerde kullanımı noktasında umut verici düzeydedir. Hesaplamalı akışkanlar mekaniği kullanımının daha güvenilir noktaya gelmesi modellemede yapılacak sınır koşulu şartlarının gerçeğe daha yakın noktalara

taşıyabilecek modellerin oluşturulmasını, daha çok sayıda yapılacak test ile karşılaştırmaların artırılması ve çözüm modeli alternatiflerinin değerlendirebileceği bilgisayar kaynağının kullanılması ile sağlanabilir.

## 5. SONUÇLAR

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programı ANSYS Fluent kullanılarak kanatlı borulu ısı değiştiricilerinde kullanılan farklı lamel formlarında (düz, dalgalı, patlatmalı) meydana gelen ısı transferi ve basınç kaybı değerlerinin sayısal olarak incelendiği bu çalışmada, dört farklı giriş hava hızında yapılan çözümlerde elde edilen sayısal çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Sayısal çözümler sonucu elde edilen sonuçlarda lameller üzerinde oluşturulan dalga ve patlatma yüzeylerinin gerçek uygulamalarda ve literatür çalışmalarında elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdiği yönündedir. Bu çalışmaların test sonuçları ile desteklenmesi daha sağlıklı verilerin elde edilmesine ve sayısal çözüm için oluşturulan modelin analizi sonucu paket programlardan alınan sonuçların reel ürünler üzerinde elde edilen sonuçlara yüzde kaç sapma ile yaklaşabileceği hakkında bilgi verecektir. Bu tez çalışmasında tek bir test sonucu üzerinden yapılabilen karşılaştırmada yaklaşık %17'lik bir sapma elde edilmiştir. Sapma değerinin başlıca nedeni çözüm modelinde yer alan sabit boru sıcaklığı yaklaşımının gerçek üründe değişken oluşu olarak açıklanabilmektedir. Karşılaştırılmaların daha doğru olarak yapılabilmesi için sayısal çözüm modelinin oluşturulmasında gerçek sınır koşullarının daha sağlıklı verilebileceği modelin oluşturulması ve çözüm modelinin değiştirilerek sayısal çözümlerin karşılaştırılabileceği bilgisayar kaynağının sağlanması gerekmektedir.

Sayısal çözümlerde kullanılan ağ yapısı ve sınır koşullarının tayini üzerine teorik ve uygulamaya yönelik bilgiler verilmeye çalışılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programlarında sayısal çözüm sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği sayısal modelin doğru oluşturulması, ağ yapısının akış çözüm modeline uygun olarak yapılandırılması ve sınır koşulu tanımlarının gerçek modelde meydana gelen sınır koşullarına uygun olarak seçilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bilgisayar kaynaklarına bağımlı olarak modellenen ve gerçek modelin sınırlı bir kısmının alınması ile oluşturulan modellerden elde edilen sayısal çözümler belli bir hatanın olacağı yaklaşımıyla değerlendirilse de bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelerle birlikte gerçek modele yakın modellerin imkanı hale geleceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abu Madi, M. ve Johns, R.A., (1988), " Heikal, Performance characteristics correlation for round tube and plate finned heat exchangers", International Journal of Refrigeration, 21:507–517.
- Anderson, J. D., (1995), Computational Fluid Dynamics, McGraw Hill, New York.
- Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, (2009), Ansys Inc.
- Currie, I. G., (1993), Fundamental Mechanics of Fluids, Marcel Dekker, New York.
- Chang, Y.J. ve Wang, C.C., (1997), " A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry", International Journal of Heat and Mass Transfer, 40(3): 533-544.
- Erak, A., Özerdem, B., Bilir, L. ve İlken Z., (2005), "Effect of geometrical parameters on heat transfer and pressure drop characteristics of plate fin and tube heat exchangers", Applied Thermal Engineering, 25:2421–2431.
- Hsieh C.T. ve Jang J.Y., (2006), "3-D thermal-hydraulic analysis for louver fin heat exchangers with variable louver angle", Applied Thermal Engineering, 26:1629–1639.
- Incropera, F. P. ve DeWitt, D.P., (2002), Fundamentals of Heat and Mass Transfer: J. Wiley, New York.
- Incropera, F. P., Dewitt, D.P., (2006), Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, (Çev., T. Derbentli, O.Genceli, A. Güngör, A. Hepbaşlı, Z. İlken, N. Özbalt, F. Özgüç, C. Parmaksızoğlu, Y.Uralcan), Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Kim, M.H. ve Bullard, C.W., (2002), "Air-side thermal hydraulic performance of multi-louvered fin aluminum heat exchangers", International Journal of Refrigeration, 25: 390–400.
- McQuiston, F.C., (1975), Fin Efficiency With Combined Heat And Mass Transfer, ASHRAE Transactions, 81: 350–355.
- Mon, M.S. ve Gross, U.,(2004), "Numerical study of fin spacing effects in annular finned tube heat exchangers", International Journal of Heat and Mass Transfer, 47:1953–1964.
- Lazzo, G. ve Merlo, U.,(2001), "An experimental investigation of heat transfer and friction losses of interrupted and wavy fins for fin-and-tube heat exchangers" International Journal of Refrigeration, 24:409-416
- Perrotin, T. ve Clodic, D., (2004), "Thermal-hydraulic CFD study in louvered fin-and-flat-tube heat exchangers", International Journal of Refrigeration, 27:422–432.
- Şahin, B., Akkoca, A., Öztürk, N.A. ve Akıllı, H., (2006), "Investigation of flow characteristics in a plate fin and tube heat exchanger model composed of single cylinder", International Journal of Heat and Fluid Flow, 27:522–530.
- Şahin, H.M., Dal A.R. ve Baysal E., (2007), "3-D Numerical study on the correlation between variable inclined fin angles and thermal behavior in platefin-tube heat exchanger", Applied Thermal Engineering, 27:1806–1816.

- Tafti, D.K., Wang, G. ve Lin, W., (2000), "Flow transition in a multilouvered fin array", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43:901-919.
- Wang, C.C., Fu, W.L. ve Chang, C.T., (1997), "Heat Transfer and Friction Characteristics of Typical Wavy Fin and Tube Heat Exchangers", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14:174-186.
- Wang, C.C., Jang, J.Y. ve Chiou, N.F., (1999), "A heat transfer and friction correlation for wavy fin and tube heat exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42:1919-1924.
- Wang, C.C., Lee, C.J., Chang, C.T. ve Lin S.P., (1999), "Heat transfer and friction correlation for compact louvered fin and tube heat exchangers", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42:1945-1956.
- White, F.M., (2005), *Akışkanlar Mekaniği*, (Çev., K. Kırkköprü, E. Ayder), Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Yeşil, Ç., (2007), "Kanatlı borulardaki dış akış ve konjugesi transferi mekanizmasının sayısal olarak incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

## EK - Deney Sonucu

FRITERM Termik Cihazlar San. Ve Tic. A.S.



## Air Cooled Condenser Performance Test Data

Test Time 2010-11-11 8:34:18

Print Time 2010-11-11 10:06:40

|                 |                             |                       |  |                     |  |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------|--|---------------------|--|
| Model           | EHS 06                      | Product No.           |  | Rating capacity     |  |
| Medium          | 25x22 3/8" 30T 4R 800A 2,5P | Vessel classification |  | Product standard    |  |
| Net weight      |                             | Heat interchange area |  | Pitch of baffle     |  |
| Design pressure |                             | Proof test pressure   |  | Maximum operating p |  |

|                                    |       |     |                      |        |      |
|------------------------------------|-------|-----|----------------------|--------|------|
| L_ Air Cooled Condenser            |       |     |                      |        |      |
| Condition Room Inlet DB            | 25    | °C  | Calorimeter Inlet DB | 25     | °C   |
| Condensing Pressure                | 1.829 | MPa | Condenser InletTemp. | 65     | °C   |
| Evaporator/ Condenser Outlet Temp. | 37    | °C  | Ref. flow            | 317.16 | kg/h |

|                                       | Unit  | 1         | 2         | 3         | 4         | AVG.      |
|---------------------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Calo.Room Inlet DB                    | °C    | 25.02     | 25.01     | 25.01     | 25.00     | 25.01     |
| Calo.Room Inlet DP                    | °C    | 10.91     | 10.89     | 10.86     | 10.82     | 10.87     |
| Calo.Room Outlet DB                   | °C    | 36.67     | 36.64     | 36.66     | 36.65     | 36.65     |
| Relative Humidity                     | %     | 40.66     | 40.63     | 40.55     | 40.48     | 40.58     |
| Calo. Room AHU Inlet Temp.            | °C    | 17.73     | 17.75     | 17.74     | 17.73     | 17.74     |
| Calo. Room AHU Outlet Temp.           | °C    | 23.78     | 23.79     | 23.78     | 23.77     | 23.78     |
| Liquid Flow                           | m3/h  | 3.000     | 3.000     | 3.000     | 3.000     | 3.000     |
| Liquid Side Capacity                  | kW    | 21.02     | 21.02     | 21.00     | 21.01     | 21.01     |
| DMP1 Voltage                          | V     | 219.56    | 218.03    | 216.62    | 216.65    | 217.71    |
| DMP1 Current                          | A     | 1.17      | 1.16      | 1.16      | 1.16      | 1.16      |
| DMP1 Watt                             | W     | 252.51    | 250.37    | 248.70    | 248.76    | 250.09    |
| DMP1 Power Factor                     |       | 98.59     | 98.65     | 98.70     | 98.69     | 98.66     |
| DMP1 Power Frequency                  | HZ    | 50.02     | 50.00     | 49.99     | 49.99     | 50.00     |
| DMP2 ?? Energy                        | KJ    | 37441.199 | 35080.762 | 31118.850 | 27143.230 | 32696.010 |
| DMP2 ?? Watt                          | W     | 6476.67   | 6563.05   | 6604.67   | 6678.31   | 6580.67   |
| Calo. Room Capacity                   | kW    | 13.89     | 13.86     | 13.80     | 13.75     | 13.82     |
| Condensing Pressure(Ref.)             | MPa   | 1.829     | 1.829     | 1.829     | 1.829     | 1.829     |
| Condenser entering Temp. (Ref.)       | °C    | 64.94     | 65.01     | 65.00     | 64.95     | 64.98     |
| Condenser Leaving liquid Temp. (Ref.) | °C    | 37.10     | 37.12     | 37.14     | 37.17     | 37.13     |
| CON Entering Vapor SH (Ref.)          | °C    | 24.95     | 25.02     | 25.01     | 24.96     | 24.98     |
| CON Leaving liquid SC (Ref.)          | °C    | 3.23      | 3.21      | 3.19      | 3.16      | 3.19      |
| Sat. temp of entering Vapor (Ref.)    | °C    | 40.33     | 40.33     | 40.32     | 40.32     | 40.33     |
| Entering Enthalpy (Ref.)              | kJ/kg | 410.920   | 411.001   | 410.995   | 410.937   | 410.963   |
| Leaving Enthalpy (Ref.)               | kJ/kg | 253.771   | 253.801   | 253.826   | 253.880   | 253.820   |
| Mass Flow (Ref.)                      | kg/h  | 317.208   | 317.200   | 317.197   | 317.217   | 317.206   |
| Standard Capacity (Ref.)              | kW    | 13.847    | 13.851    | 13.848    | 13.839    | 13.846    |
| Average Capacity                      | kW    | 13.86     | 13.86     | 13.82     | 13.80     | 13.83     |
| Thermal equilibrium coefficient       | %     | -0.28     | -0.06     | 0.38      | 0.62      | 0.17      |
| Pressure Drop (Ref.)                  | kPa   | 13.205    | 13.216    | 13.227    | 13.157    | 13.201    |
| Calo. Wall inside Temp.               | °C    | 25.03     | 25.03     | 25.03     | 25.00     | 25.02     |
| Calo. Wall outside Temp.              | °C    | 25.18     | 25.18     | 25.18     | 25.19     | 25.18     |
| Heat Leakage                          | W     | 2.31      | 2.38      | 2.25      | 2.92      | 2.47      |
| Air Flow                              | kg/h  | 4208.32   | 4203.90   | 4179.69   | 4165.67   | 4189.40   |

|            |  |        |  |
|------------|--|--------|--|
| Conclusion |  | Remark |  |
|------------|--|--------|--|

Tested by:

Reviewed by

Approved by:

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi 11.07.1985

Doğum Yeri Gebze

Lise 1999-2003 Gebze Anadolu Lisesi

Lisans 2003-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2009- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

**Çalıştığı Kurum**

2009- Friterm Termik Cihazlar A.Ş.