

**KARŞIT AKIŞLI RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜPÜN  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**KEVSER D NCER**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2005  
ANKARA**



**KARŞIT AKIŞLI RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜPÜN  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**KEVSER D NCER**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2005  
ANKARA**

Kevser DİNCER tarafından hazırlanan KARŞIT AKIŞLI RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜPÜN PERFORMANSININ İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

1. Tez Yöneticisi

Prof. Dr. B. Zühtü UYSAL

2. Tez Yöneticisi

Bu çalışma jürimiz tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

BAŞKAN : Prof. Dr. Ö. Ercan ATAER

Üye : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA

Üye : Prof. Dr. Mecit SİVRİOĞLU

Üye : Doç. Dr. Cemil YAMALI

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÜÇGÜL

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

# **KARŞIT AKIŞLI RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜPÜN PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**(Doktora Tezi)**

**Kevser DİNCER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Kasım 2005**

## **ÖZET**

Bu araştırmada, değişik geometrik yapılardaki karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüpü üzerinde teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Analitik çalışmada, vorteks tüplere termodinamiğin 1. yasası ve 2. yasası uygulanmıştır. Termodinamiğin 2. yasasından yararlanılarak sıcak ve soğuk çıkış akımlarının sıcaklıklarının, giriş basıncından nasıl etkilendiğine dair teorik ifadeler geliştirilmiştir. Ayrıca deneysel verilerden yararlanılarak yapılan ekserji analizi ile de sistemdeki kayıp iş ve verim hesaplanmıştır. Problemin çözümü için nümerik bir çalışma, PHOENICS paket programı kullanarak yapılmıştır. Problem PHOENICS'te, değişik başlıklar altında incelenmiştir. Deneysel çalışmalar yapılırken, iki farklı özellikte iki deneysel sistem hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda ilk olarak vorteks tüplerin çalışırılığını test etmek amacıyla, her iki çıkıştan (sıcak ve soğuk çıkış) kütleli akışı ayarlanabilir bir vorteks tüpü imal edilmiş ve bu sistemde, ön çalışma olarak nitelendirilebilen deneyler yapılmıştır. Bu sistemde, akım sıcak ve soğuk taraftan ayrı ayrı kontrol edilerek vorteks tüplerin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde akımın sıcak çıkış tarafından kontrol edildiğinde, vorteks tüplerin performanslarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Vorteks tüplerin performanslarını incelemek

için kurulan ikinci deneysel sistemde, bu gözlemden yararlanılmış ve akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilmiştir. Sonra, karşıt akışlı vorteks tüplerin performansını araştırmak amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda, iç çapı 9 mm ve uzunluğunun çapa oranı 10, 15 ve 18 olan Ranque-Hilsch vorteks tüpler üzerinde farklı özelliklerde, soğuk akımın girişteki akıma oranı olan  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde deneyler yapılarak en iyi performans gösteren vorteks tüp geometrisi belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, 5 mm çapındaki hareketli vida ucundaki açının  $30^\circ$  veya  $60^\circ$  olması ve sıcak çıkış konumunda bırakılması, vorteks tüp uzunluğunun çapa oranının 15 olması ve havanın 4 nozul ile vorteks tüpe gönderilmesi, akımın ise sıcak çıkış tarafından kontrol edilmesinin, daha etkin olduğu deneysel olarak görülmüştür. Uygulama çalışmasında, en iyi performans gösteren vorteks tüp, etanol-su karışımının damıtılmasında kullanılmıştır. Ayrıca vorteks tüpünde akışkan olarak hava,  $O_2$ ,  $CO_2$ , ve  $N_2$  kullanılarak enerji ayrıştırma olayı farklı gazlarla incelenmiştir. Deneysel veriler kullanarak, vorteks tüpün performansı, bulanık mantık metoduyla da modellenmiştir.

**Bilim kodu** : 914

**Anahtar Kelimeler** : Ranque-Hilsch vorteks tüpü, ısıtma, soğutma, ekserji analizi, enerji ayrışımı, bulanık mantık

**Sayfa Adedi** : 229

**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA, Prof. Dr. B. Zühtü UYSAL

# **KARŞIT AKIŞLI RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜPÜN PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**(Doktora Tezi)**

**Kevser DİNCER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Kasım 2005**

## **ÖZET**

Bu araştırma, değişik geometrik yapılardaki karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüpü üzerinde teorik ve deneysel olarak yapılmıştır. Analitik çalışmada, vorteks tüplere termodinamiğin 1. yasası ve 2. yasası uygulanmıştır. Termodinamiğin 2. yasasından yararlanılarak sıcak ve soğuk çıkış akımlarının sıcaklıklarının, giriş basıncından nasıl etkilendiğine dair teorik ifadeler geliştirilmiştir. Ayrıca deneysel verilerden yararlanılarak yapılan ekserji analizi ile de sistemdeki kayıp iş ve verim hesaplanmıştır. Problemin çözümü için nümerik bir çalışma, PHOENICS paket programı kullanarak yapılmıştır. Problem PHOENICS'te, değişik başlıklar altında incelenmiştir. Deneysel çalışmalar yapılırken, iki farklı özellikte iki deneysel sistem hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda ilk olarak vorteks tüplerin çalışırliğini test etmek amacıyla, her iki çıkıştan (sıcak ve soğuk çıkış) kütleli akışı ayarlanabilir bir vorteks tüpü imal edilmiş ve bu sistemde, ön çalışma olarak nitelendirilebilen deneyler yapılmıştır. Bu sistemde, akım sıcak ve soğuk taraftan ayrı ayrı kontrol edilerek vorteks tüplerin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde akımın sıcak çıkış tarafından kontrol edildiğinde, vorteks tüplerin performanslarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Vorteks tüplerin performanslarını incelemek

için kurulan ikinci deneysel sistemde, bu gözlemden yararlanılmış ve akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilmiştir. Sonra, karşıt akışlı vorteks tüplerin performansını araştırmak amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda, iç çapı 9 mm ve uzunluğunun çapa oranı 10, 15 ve 18 olan Ranque-Hilsch vorteks tüpler üzerinde farklı özelliklerde, soğuk akımın girişteki akıma oranı olan  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde deneyler yapılarak en iyi performans gösteren vorteks tüp geometrisi belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, 5 mm çapındaki hareketli vida ucundaki açının  $30^\circ$  veya  $60^\circ$  olması ve sıcak çıkış konumunda bırakılması, vorteks tüp uzunluğunun çapa oranının 15 olması ve havanın 4 nozul ile vorteks tüpe gönderilmesi, akımın ise sıcak çıkış tarafından kontrol edilmesinin, daha etkin olduğu deneysel olarak görülmüştür. Uygulama çalışmasında, en iyi performans gösteren vorteks tüp, etanol-su karışımının damıtılmasında kullanılmıştır. Ayrıca vorteks tüpünde akışkan olarak hava,  $O_2$ ,  $CO_2$ , ve  $N_2$  kullanılarak enerji ayrıştırma olayı farklı gazlarla incelenmiştir. Deneysel veriler kullanarak, vorteks tüpün performansı, bulanık mantık metoduyla da modellenmiştir.

**Bilim kodu** : 914

**Anahtar Kelimeler** : Ranque-Hilsch vorteks tüpü, ısıtma, soğutma, ekserji analizi, enerji ayrışımı, bulanık mantık

**Sayfa Adedi** : 229

**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA, Prof. Dr. B. Zühtü UYSAL

# **INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF A COUNTERFLOW RANQUE-HILSCH VORTEX TUBE**

**(Ph. D. Thesis)**

**Kevser DiNCER**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**November 2005**

## **ABSTRACT**

**In this research, theoretical and experimental studies on the counter flow Ranque–Hilsch vortex tube with different geometric configurations were made. In the analytical study, the 1<sup>st</sup> and the 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics were applied to the vortex tubes. By using the 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics theoretical expressions were developed to show how the hot and cold output streams are affected by the initial pressure. In addition the lost work and the efficiency of the system were calculated by an exergy analysis with the help of the experimental data. A numerical study to solve the problem was made using the PHOENICS software. The problem was examined under different topics in PHOENICS. While making the experimental studies, two different experimental systems with two different arrangements were prepared. In the experimental studies, first of all, in order to test the functioning of the vortex tubes, a vortex tube where the mass flow can be adjusted from both outputs (hot and cold) was manufactured, and preliminary were made on this system. Within this system, the performance of the vortex tubes were investigated experimentally by adjusting the flow from both the hot side as well as the cold side. The calculations made by using the experimental data revealed**

that, when the hot outlet side of the stream was adjusted, the performance of the vortex tubes was higher. In constructing the second experimental system assembled in order to examine the performance of the vortex tubes thoroughly, this finding had been used and the flow rates were adjusted from the hot outlet side only. Afterwards, in the experiments conducted with the second set up the best performance of the vortex tube geometry has been found by testing different values of  $\xi$ , which is the ratio of the cold stream flow rate to the input stream flow rate, with different experiments where Ranque–Hilsch vortex tubes with the inner diameter of 9 mm and a length of 10, 15 and 18 times their diameter were used. When the experimental results were evaluated, it has been found that when the tip angle of the 5 mm diameter moving screw was left at 30 or 60 degrees and when it was left at the hot output side, when the vortex tube's ratio of its length to its diameter is 15, when the air is introduced to the tube with 4 nozzles, and when the stream is adjusted from the hot output side is most effective. In a practical application the best performing vortex tube was used to distill an ethanol-water mixture. Also the energy separation event has been examined by using air, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>. The vortex tube performance has also been modeled with the fuzzy logic method by using the experimental data.

**Science Code : 914**

**Key Words : Ranque-Hilsch vortex tube, heating, cooling, exergy analysis, energy separation, fuzzy logic**

**Page Number : 229**

**Adviser : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA, Prof. Dr. B. Zühtü UYSAL**

# **INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF A COUNTERFLOW RANQUE-HILSCH VORTEX TUBE**

**(Ph. D. Thesis)**

**Kevser DiNCER**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**November 2005**

## **ABSTRACT**

**In this research, theoretical and experimental studies on the counter flow Ranque–Hilsch vortex tube with different geometric configurations were made. In the analytical study, the 1<sup>st</sup> and the 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics were applied to the vortex tubes. By using the 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics theoretical expressions were developed to show how the hot and cold output streams are affected by the initial pressure. In addition the lost work and the efficiency of the system were calculated by an exergy analysis with the help of the experimental data. A numerical study to solve the problem was made using the PHOENICS software. The problem was examined under different topics in PHOENICS. While making the experimental studies, two different experimental systems with two different arrangements were prepared. In the experimental studies, first of all, in order to test the functioning of the vortex tubes, a vortex tube where the mass flow can be adjusted from both outputs (hot and cold) was manufactured, and preliminary were made on this system. Within this system, the performance of the vortex tubes were investigated experimentally by adjusting the flow from both the hot side as well as the cold side. The calculations made by using the experimental data revealed**

that, when the hot outlet side of the stream was adjusted, the performance of the vortex tubes was higher. In constructing the second experimental system assembled in order to examine the performance of the vortex tubes thoroughly, this finding had been used and the flow rates were adjusted from the hot outlet side only. Afterwards, in the experiments conducted with the second set up the best performance of the vortex tube geometry has been found by testing different values of  $\xi$ , which is the ratio of the cold stream flow rate to the input stream flow rate, with different experiments where Ranque–Hilsch vortex tubes with the inner diameter of 9 mm and a length of 10, 15 and 18 times their diameter were used. When the experimental results were evaluated, it has been found that when the tip angle of the 5 mm diameter moving screw was left at 30 or 60 degrees and when it was left at the hot output side, when the vortex tube's ratio of its length to its diameter is 15, when the air is introduced to the tube with 4 nozzles, and when the stream is adjusted from the hot output side is most effective. In a practical application the best performing vortex tube was used to distill an ethanol-water mixture. Also the energy separation event has been examined by using air, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>. The vortex tube performance has also been modeled with the fuzzy logic method by using the experimental data.

**Science Code : 914**

**Key Words : Ranque-Hilsch vortex tube, heating, cooling, exergy analysis, energy separation, fuzzy logic**

**Page Number : 229**

**Adviser : Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA, Prof. Dr. B. Zühtü UYSAL**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendirenlerden birinci tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Şenol BAŞKAYA'ya, ikinci tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Bekir Zühtü UYSAL'a, TİK (Tez İzleme Komitesi) üyelerimden Sayın Prof. Dr. Mecit SİVRİOĞLU'na ve yine TİK üyelerimden Sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÜÇGÜL'e, Doktora çalışmalarımı tamamlayabilmem için bana destek veren Sayın Prof. Dr. Ömer Ercan ATAER'e ve Sayın Doç. Dr. Cemil YAMALI'ya, deneysel sistemin kurulması için gerekli olan parçaların imalatını gerçekleştirmesi için akademik personelinin yardımcı olmasını sağlayan, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Talaşlı İmalat ABD Başkanı Sayın Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN'e, deneysel sistemin akış ölçümlerinde kullanılan malzemeleri sağlayan Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dekanı Sayın Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK'a, deneysel çalışmanın gerçekleşmesi için BAP 2002/124 no'lu proje kapsamında destek veren Selçuk Üniversitesi Rektör Yardımcısı Sayın Prof. Dr. Şefik BİLİR'e, teknik konularda yardımlarını aldığımız Sayın Sıddık SARIKAYA ve Kadir YILMAZ'a ve verimli bir şekilde çalışabilmem için çocuklarıma karşı sorumluluğumu tümenden üzerimden alan Sevgili Annem ve Babama Teşekkür eder ve Saygılar sunarım.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                   |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET.....                                                                         | iii  |
| ABSTRACT .....                                                                    | v    |
| TEŞEKKÜR .....                                                                    | vii  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                  | viii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                                                        | xii  |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                           | xiii |
| RESİMLER LİSTESİ.....                                                             | xx   |
| SİMGELER LİSTESİ.....                                                             | xxi  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                     | 1    |
| 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI .....                                                      | 6    |
| 3. ANALİTİK ANALİZ .....                                                          | 16   |
| 3.1. Problemin Tanımı.....                                                        | 16   |
| 3.2. Vorteks Tüplerin Uygulama Alanları.....                                      | 17   |
| 3.2.1. Vorteks tüplerin noktasal soğutma amacıyla kullanımı .....                 | 17   |
| 3.2.2. Kimyasal analizlerde vorteks tüp kullanımı.....                            | 18   |
| 3.2.3. Orta sıcaklıklı kromatografik analizlerde vorteks tüp kullanılması .....   | 18   |
| 3.2.4. Çözeltilerin soğutulmasında vorteks tüp kullanımı.....                     | 18   |
| 3.2.5. Nem giderme işlemlerinde vorteks tüp kullanımı .....                       | 19   |
| 3.2.6. Hava hattının nemden arındırılması işlemlerinde vorteks tüp kullanımı..... | 19   |
| 3.2.7. Kızılötesi analizlerde soğutma amaçlı vorteks tüp kullanımı .....          | 19   |
| 3.2.8. Vorteks tüp sisteminin gaz endüstrisinde kurutma amacıyla kullanımı.....   | 19   |

**Sayfa**

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.9. Vorteks tüp ile kar yapımı .....                                 | 20 |
| 3.3. Analitik Analiz .....                                              | 20 |
| 3.3.1. Vorteks tüplere termodinamiğin 1. yasasının uygulanması .....    | 20 |
| 3.3.2. Vorteks tüplere termodinamiğin 2.yasasının uygulanması .....     | 22 |
| 3.3.3. Termodinamik analizin pratik sonucu .....                        | 23 |
| 3.3.4 $T_1/T_2$ cinsinden $P_1/P_2$ ifadesinin geliştirilmesi .....     | 24 |
| 3.3.5. $T_3/T_2$ cinsinden $P_1/P_2$ ifadesinin geliştirilmesi .....    | 27 |
| 3.4. Vorteks Tüplerde Ekserji Analizi.....                              | 30 |
| 3.4.1. Dört nozullu vorteks tüpünün ekserji analizi .....               | 33 |
| 3.4.2. Altı nozullu vorteks tüpünün ekserji analizi.....                | 36 |
| 4. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ .....                                          | 41 |
| 4.1. PHOENICS Paket Programı.....                                       | 41 |
| 4.1.1. Diskritizasyon.....                                              | 41 |
| 4.1.2. PHOENICS'te işletim sistemi .....                                | 48 |
| 4.1.3. Yakınsama kriterleri .....                                       | 51 |
| 4.2. Problemin Sayısal Çözümü İçin Tanımı .....                         | 53 |
| 5. DENEYSEL SİSTEM .....                                                | 58 |
| 5.1. Ön Çalışma .....                                                   | 58 |
| 5.2. Deneysel Sistem .....                                              | 59 |
| 5.2.1. Deneysel sistemin tanıtımı .....                                 | 59 |
| 5.2.2. Deneysel sistemde kullanılan ölçme aletleri ve kalibrasyonu..... | 63 |
| 5.3. Deneysel Yöntem .....                                              | 67 |
| 5.4. Deneysel Program .....                                             | 71 |

**Sayfa**

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                                                                            | 75  |
| 6.1. L/D Oranının Vorteks Tüp Performansına Etkisinin Deneysel<br>İncelenmesi.....                                       | 76  |
| 6.2. Hareketli Vida Konumunun Vorteks Tüp Performansına Etkisinin<br>Deneysel İncelenmesi.....                           | 84  |
| 6.3. Hareketli Vida Çapının Vorteks Tüp Performansına Etkisinin Deneysel<br>İncelenmesi.....                             | 88  |
| 6.4. Nozul Sayısının Vorteks Tüp Performansına Etkisinin Deneysel<br>İncelenmesi.....                                    | 97  |
| 6.5. Hareketli Vidanın Ucundaki Açının Vorteks Tüp Performansına<br>Etkisinin Deneysel İncelenmesi .....                 | 101 |
| 6.6..Vorteks Tüp Girişindeki Basıncın Yükseltilmesinin Vorteks Tüp<br>Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi ..... | 106 |
| 6.7. Vorteks Tüplerde Soğuk Sıcak Ayrışma Olayının Deneysel<br>İncelenmesi.....                                          | 109 |
| 7. VORTEKS TÜP UYGULAMALARI .....                                                                                        | 111 |
| 7.1. Vorteks Tüpün Distilasyon İşlemlerinde Kullanımı .....                                                              | 111 |
| 7.2. Vorteks Tüpün Farklı Gazlara Uygulanması.....                                                                       | 113 |
| 8. BULANIK MANTIK YÖNTEMİYLE VORTEKS TÜP<br>PERFORMANSININ İNCELENMESİ .....                                             | 115 |
| 8.1. Bulanık Mantık Metodu .....                                                                                         | 116 |
| 8.2. Vorteks Tüp Performansının Bulanık Mantık İle Belirlenmesi .....                                                    | 118 |
| 9. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                                                               | 125 |
| KAYNAKLAR.....                                                                                                           | 131 |
| EKLER .....                                                                                                              | 134 |
| EK-1. LİTERATÜR ÇİZELGELERİ.....                                                                                         | 135 |
| EK-2. VORTEKS TÜPE TERMODİNAMİĞİN 1.VE 2.YASASININ<br>UYGULANMASINDA ÖRNEK HESAPLAMA .....                               | 144 |
| Ek-2.1. Örnek Hesaplama .....                                                                                            | 144 |
| Ek-2.1.1. Vorteks tüpe termodinamiğin 1. yasasının uygulanması.....                                                      | 145 |

## Sayfa

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ek-2.1.2. Vorteks tüpe termodinamiğin 2. yasasının uygulanması.....                                                                        | 145 |
| Ek-2.3. Adyabatik Olan Vorteks Tüp.....                                                                                                    | 147 |
| Ek-2.4. Adyabatik Olmayan Vorteks Tüp.....                                                                                                 | 151 |
| EK-3. T1/T2 CİNSİNDEN P1/P2'NİN EN AZ NE OLMASI GEREKTİĞİNE<br>AİT ÖRNEK HESAPLAMA .....                                                   | 154 |
| EK-4. EKSERJİ ANALİZİ.....                                                                                                                 | 156 |
| EK-5. Q <sub>1</sub> VE RESULT .....                                                                                                       | 160 |
| Ek-5.1. Q <sub>1</sub> .....                                                                                                               | 160 |
| Ek-5.2. Result .....                                                                                                                       | 166 |
| EK-6. ÖN ÇALIŞMA DENEYSEL SİSTEMİ .....                                                                                                    | 182 |
| Ek-6.1. Her İki Çıkıştan (Sıcak Çıkış ve Soğuk Çıkış) Kütleli Akışı<br>Ayarlanabilir Vorteks Tüpün Performansının Deneyel İncelenmesi..... | 182 |
| Ek-6.2. Deneyel Sistemin Tanıtımı.....                                                                                                     | 183 |
| Ek-6.3. Deneyel Sistemde Kullanılan Ölçme Cihazları ve Kalibrasyonları.....                                                                | 188 |
| Ek-6.4. Deneylerin Yapılışı.....                                                                                                           | 190 |
| Ek-6.5. Bulgular ve Tartışma .....                                                                                                         | 190 |
| Ek-6.6. Sonuçlar .....                                                                                                                     | 207 |
| Ek-7. VORTEKS TÜPÜN PERFORMANSININ DENEYSEL<br>ARAŞTIRILMASINA AİT ÖRNEK HESAPLAMA .....                                                   | 223 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                                                                              | 229 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                                        | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 1.1. 2.deneysel sistemin çalışma parametreleri ve aralıkları.....                                                                      | 4     |
| Çizelge 4.1. Model Q <sub>1</sub> küttüğünde standarat komutlar .....                                                                          | 50    |
| Çizelge 5.1. Sistemin ısı dengeye gelmesi için yapılmış olan ölçümler .....                                                                    | 68    |
| Çizelge 5.2. Çalışma basınç aralığı ayarlandıktan sonra beklenen zaman .....                                                                   | 69    |
| Çizelge 5.3. L/D=10; N=2, 4, 6; d=6 mm; $\alpha=60^\circ$ ; hvk=L'de;<br>Pgir=200-320 kPa.....                                                 | 71    |
| Çizelge 5.4. L/D=15; N=2, 4, 6; d=6 mm; $\alpha=60^\circ$ ; hvk=L'de;<br>Pgir=200-320 kPa.....                                                 | 72    |
| Çizelge 5.5. L/D=18; N=2, 4, 6; d=6 mm; $\alpha=60^\circ$ ; hvk=L'de;<br>Pgir=200-260 kPa.....                                                 | 72    |
| Çizelge 5.6. L/D=15; N= 6; d=6 mm; $\alpha=60^\circ$ ; hvk=L, L-1, L-2, L-3'de;<br>Pgir=200-320 kPa.....                                       | 72    |
| Çizelge 5.7. L/D=15; N=2, 4,6; d=7 mm; $\alpha=60^\circ$ ; hvk=L'de;<br>Pgir=200-320 kPa.....                                                  | 73    |
| Çizelge 5.8. L/D=15; N=2, 4, 6; d=8 mm; $\alpha=60^\circ$ ; hvk=L'de;<br>Pgir=200-320 kPa.....                                                 | 73    |
| Çizelge 5.9. L/D=15; N=2, 4, 6; d=5 mm; $\alpha=60^\circ$ ; hvk=L'de;<br>Pgir=200-320 kPa.....                                                 | 73    |
| Çizelge 5.10. L/D=15; N=4; d=5 mm; $\alpha=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ ;<br>hvk=L'de; Pgir=200-320 kPa..... | 74    |
| Çizelge 5.11. L/D=15; N=4; d=5 mm; $\alpha=30^\circ$ ; hvk=L'de; Pgir=200-420 kPa.....                                                         | 74    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Ahlborn ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları deneysel sistem.....                                                                         | 8     |
| Şekil 2.2. Fröhlingsdorf ve Unger'in CFX çözümünden oluşturdıkları hız profilleri.....                                                                         | 9     |
| Şekil 2.3. Vorteks tüpde oluşan birinci ve ikincil akış.....                                                                                                   | 10    |
| Şekil 2.4. Behera ve arkadaşlarının CFD'de çözümleriyle gösterdikleri soğuk çıkıştaki akış.....                                                                | 10    |
| Şekil 2.5. Saidi ve Valipour'un çalışmalarında kullandıkları vorteks tüp.....                                                                                  | 11    |
| Şekil 2.6. Gao ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları vorteks tüpler.....                                                                              | 12    |
| Şekil 2.7. Ranque-Hilsch tüpün şematik görünümü.....                                                                                                           | 13    |
| Şekil 2.8. Aljuwayhel ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları vorteks tüp geometrisi.....                                                               | 14    |
| Şekil 2.9. Skye ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları ticari vorteks tüp .....                                                                        | 15    |
| Şekil 3.1. Vorteks tüplerdeki akış .....                                                                                                                       | 16    |
| Şekil 3.2. Sistemin genel görünüşü .....                                                                                                                       | 20    |
| Şekil 3.3. Sistemin genel görünüşü .....                                                                                                                       | 24    |
| Şekil 3.4. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $e_{gir}$ ve $e_{çık}$ 'ın $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=6mm$ ; harekeli vida konumu= $L$ 'de ..... | 34    |
| Şekil 3.5. $\dot{I}$ 'nin $T_{sck}-T_{soğ}$ ile değişimi; $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=6 mm$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                                   | 35    |
| Şekil 3.6. $\dot{I}/\dot{I}_{maks}$ 'ın $T_{sck}-T_{soğ}$ ile değişimi; $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=6 mm$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                     | 35    |
| Şekil 3.7. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde ikinci yasa veriminin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=6mm$ ; harekeli vida konumu= $L$ 'de.....       | 36    |

| Şekil                                                                                                                                                                                                 | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.8. $e_{gir}$ 'nin $\xi$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu=L, L-1, L-2, L-3 ve $L/D=10$ ; $N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu=L'de; $P_{gir}=200$ kPa ..... | 37    |
| Şekil 3.9. $e_{cik}$ 'nin $\xi$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu=L, L-1, L-2, L-3 ve $L/D=10$ ; $N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu=L'de; $P_{gir}=200$ kPa ..... | 38    |
| Şekil 3.10. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $e_{gir}$ ve $e_{cik}$ 'in $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu=L-1'de .....                                        | 38    |
| Şekil 3.11. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde ikinci yasa veriminin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu=L-1'de .....                                             | 39    |
| Şekil 3.12. $\dot{I}$ 'nin $\xi$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu=L-1'de .....                                                                                        | 40    |
| Şekil 3.13. $\dot{I}/\dot{I}_{maks}$ 'in $\xi$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu=L-1'de .....                                                                          | 40    |
| Şekil 4.1. Komşu hücreler ve tek hücre .....                                                                                                                                                          | 43    |
| Şekil 4.2. Koordinat sistemi ve hücre yapısı .....                                                                                                                                                    | 43    |
| Şekil 4.3. PHOENICS paket programının genel yapısı .....                                                                                                                                              | 47    |
| Şekil 4.4. Problemin geometrik yapısı .....                                                                                                                                                           | 53    |
| Şekil 4.5. Problemin üç boyutlu hücre yapısı .....                                                                                                                                                    | 54    |
| Şekil 4.6. Problemin iki boyutlu hücre yapısı .....                                                                                                                                                   | 55    |
| Şekil 4.7. y-z düzlemindeki ki hız vektörleri .....                                                                                                                                                   | 55    |
| Şekil 4.8. y-z düzlemindeki sıcaklık konturları .....                                                                                                                                                 | 55    |
| Şekil 4.9. y-x düzlemindeki sıcaklık konturları (soğuk çıkış) .....                                                                                                                                   | 56    |
| Şekil 4.10. y-x düzlemindeki sıcaklık konturları (sıcak çıkışa yakın) .....                                                                                                                           | 56    |
| Şekil 4.11. y-x düzlemindeki sıcaklık konturları (sıcak çıkış) .....                                                                                                                                  | 57    |
| Şekil 5.1. Deneysel sistem .....                                                                                                                                                                      | 60    |
| Şekil 5.2. Sıcak akıma ait manometre kalibrasyonu .....                                                                                                                                               | 64    |

| Şekil                                                                                                                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 5.3. Soğuk akıma ait manometre kalibrasyonu .....                                                                                                                 | 64    |
| Şekil 5.4. 1. ısı çift kalibrasyonu .....                                                                                                                               | 65    |
| Şekil 5.5. 2. ısı çift kalibrasyonu birinci ve ikinci birlikte (soğutma).....                                                                                           | 65    |
| Şekil 5.6. 2. ısı çift kalibrasyonu birinci ve ikinci birlikte (ısıtma).....                                                                                            | 66    |
| Şekil 5.7. 3. ısı çift kalibrasyonu .....                                                                                                                               | 66    |
| Şekil 5.8. Deneysel sistemin ısı dengeye gelmesi, ( $P_{gir}=280$ kPa) .....                                                                                            | 68    |
| Şekil 6.1. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=10$ ;<br>N=2; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de.....       | 77    |
| Şekil 6.2. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>N=2; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de.....       | 78    |
| Şekil 6.3. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=18$ ;<br>N=2; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de .....      | 78    |
| Şekil 6.4. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=10$ ;<br>N= 4; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de .....     | 79    |
| Şekil 6.5. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>N= 4; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de .....     | 79    |
| Şekil 6.6. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=18$ ;<br>N=4; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de .....      | 80    |
| Şekil 6.7. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=10$ ;<br>N= 6; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de .....     | 80    |
| Şekil 6.8. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>N= 6; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de .....     | 81    |
| Şekil 6.9. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=18$ ;<br>N= 6; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de .....     | 81    |
| Şekil 6.10. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=10$ ,<br>15; N=2; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de ..... | 82    |
| Şekil 6.11. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=10$ ,<br>15; N=4; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de ..... | 83    |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                                                                     | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 6.12. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=10$ ,<br>15; $N=6$ ; $d=6$ ; $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....   | 83           |
| Şekil 6.8. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                          | 85           |
| Şekil 6.13. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu= $L-1$ 'de .....                       | 85           |
| Şekil 6.14. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu= $L-2$ 'de .....                       | 86           |
| Şekil 6.15. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu= $L-3$ 'de .....                       | 86           |
| Şekil 6.16. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=6$ ; $d=6mm$ ; hareketli vida konumu= $L$ , $L-1$ , $L-2$ , $L-3$ 'de ..... | 87           |
| Şekil 6.17. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=5mm$ ; $N=2$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                         | 89           |
| Şekil 6.18. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=5mm$ ; $N=4$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                         | 89           |
| Şekil 6.19. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=5mm$ ; $N=6$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                         | 90           |
| Şekil 6.2. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=6mm$ ; $N=2$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                          | 90           |
| Şekil 6.5. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=6mm$ ; $N=4$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                          | 91           |
| Şekil 6.8. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=6mm$ ; $N=6$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                          | 91           |
| Şekil 6.20. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=7mm$ ; $N=2$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                         | 92           |
| Şekil 6.21. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=7mm$ ; $N=4$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                         | 92           |
| Şekil 6.22. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=7mm$ ; $N=6$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                         | 93           |

| Şekil                                                                                                                                                                                      | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 6.23. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=8\text{mm}$ ; $N=2$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                            | 93    |
| Şekil 6.24. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=8\text{mm}$ ; $N=4$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                            | 94    |
| Şekil 6.25. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=8\text{mm}$ ; $N=6$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                            | 94    |
| Şekil 6.26. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=5, 6, 7, 8\text{ mm}$ ; $N=2$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                  | 95    |
| Şekil 6.27. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=5, 6, 7, 8\text{ mm}$ ; $N=4$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                  | 96    |
| Şekil 6.28. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$d=5, 6, 7, 8\text{ mm}$ ; $N=6$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                  | 97    |
| Şekil 6.17. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=2$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....       | 98    |
| Şekil 6.18. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....       | 99    |
| Şekil 6.19. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=6$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de.....        | 99    |
| Şekil 6.29. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=2, 4, 6$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de ..... | 100   |
| Şekil 6.30. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....       | 102   |
| Şekil 6.18. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....       | 102   |
| Şekil 6.31. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=90^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....       | 103   |
| Şekil 6.32. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=120^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....      | 103   |
| Şekil 6.33. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ;<br>$N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=150^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....      | 104   |

| Şekil                                                                                                                                                                                                                                      | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 6.34. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=180^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....                                                         | 104   |
| Şekil 6.35. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de .....     | 105   |
| Şekil 6.36. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de.....                                                           | 107   |
| Şekil 6.37. $\xi$ 'nin değişik değerlerinde $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi, önce ve sonra yapılan deneylerin birbiri ile mukayesesi, $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de ..... | 107   |
| Şekil 6.38 $V_{soğ}$ 'un $\xi$ ile değişimi; $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de, $P_{gir}=420\text{ kPa}$ .....                                                                       | 108   |
| Şekil 6.39. $V_{sck}$ 'ın $\xi$ ile değişimi; $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=5\text{mm}$ ve $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de, $P_{gir}=420\text{ kPa}$ .....                                                                      | 108   |
| Şekil 6.40. Isınma ve soğuma sıcaklıklarının $\xi$ ile değişimi, $L/D=10$ ; $N=4$ ; $d=6\text{ mm}$ .....                                                                                                                                  | 109   |
| Şekil 6.41. Isınma ve soğuma sıcaklıklarının $\xi$ ile değişimi, $L/D=15$ ; $N=4$ ; $d=6\text{ mm}$ .....                                                                                                                                  | 110   |
| Şekil 7.1. Etanol-su-konstrasyon refraktif indeks kalibrasyon eğrileri.....                                                                                                                                                                | 112   |
| Şekil 7.2. Farklı gazlara uygulanan vorteks tüp deney düzeneği .....                                                                                                                                                                       | 113   |
| Şekil 7.3. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklıklarının $P_{gir}$ ile değişimi .....                                                                                                                                                             | 114   |
| Şekil 7. 4. $\Delta T$ 'nin $P_{gir}$ ile değişimi .....                                                                                                                                                                                   | 114   |
| Şekil 8.1. Bulanık mantık metodunda kullanılan işlem akış şeması .....                                                                                                                                                                     | 117   |
| Şekil 8.2. Vorteks tüp performansının bulanık mantık metodu ile modellenmesi ....                                                                                                                                                          | 119   |
| Şekil 8.3. Giriş basıncı (gb).....                                                                                                                                                                                                         | 119   |
| Şekil 8.4. Giriş sıcaklığı (gs).....                                                                                                                                                                                                       | 120   |
| Şekil 8.5. Vana açıklığı (va).....                                                                                                                                                                                                         | 120   |

| <b>Şekil</b>                                                                                                                            | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 8.6. L/D oranı (nt) .....                                                                                                         | 120          |
| Şekil 8.7. Soğuk akım sıcaklığı (so).....                                                                                               | 121          |
| Şekil 8.8. Sıcak akım sıcaklığı (si).....                                                                                               | 121          |
| Şekil 8.9. Kütle oranı (ko).....                                                                                                        | 121          |
| Şekil 8.10. Sıcaklık farkı (sf).....                                                                                                    | 122          |
| Şekil 8.11. Bulanık mantık metodu ile elde edilen üç boyutlu değişimi gösteren<br>grafiksel yüzey .....                                 | 123          |
| Şekil 8.12. Tahmin safhasında deneysel (sf) değerleri ile modelden elde<br>edilen (sf) sıcaklık farkı değerleri arasındaki ilişki ..... | 124          |

**RESİMLERİN LİSTESİ**

| <b>Resim</b>                                                                                | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 5.1. Vorteks t p ve vorteks tüpü oluşturan parçalar.....                              | 60           |
| Resim 5.2. Vorteks tüp gövdeleri ( $L/D=10, 15, 18$ ).....                                  | 61           |
| Resim 5.3. Hava girişini sağlayan ve vorteks tüp gövdesiyle birlikte<br> alışan parça ..... | 62           |
| Resim 5.4. Soğuk  ıkış ve nozulların olduğu parçalar .....                                  | 62           |
| Resim 5.5. $60^\circ$ konik uca sahip 5, 6, 7, 8 mm çapında olan vidalar .....              | 63           |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler                | Açıklama                                                                    |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $\tilde{c}_p$           | Sabit basınçtaki özgül ısı, $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$               |
| $c_p$                   | Sabit basınçtaki özgül ısı, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$                |
| $d$                     | Hareketli vida çapı, m                                                      |
| $e$                     | Özgül ekserji, $\text{kJ kg}^{-1}$                                          |
| $E$                     | Ekserji, kJ                                                                 |
| $D$                     | Vorteks tüp çapı, m                                                         |
| $g$                     | Yer çekimi ivmesi, $\text{m s}^{-2}$                                        |
| $h$                     | Entalpi, $\text{kJ kg}^{-1}$                                                |
| $\dot{I}$               | Tersinmezlik hızı, kW                                                       |
| $L$                     | Vorteks tüp uzunluğu, m                                                     |
| $\dot{m}$               | Kütle debisi, $\text{kg s}^{-1}$                                            |
| $\dot{n}$               | Molar hız, $\text{mol s}^{-1}$                                              |
| $P$                     | Basınç, bar                                                                 |
| $R$                     | Üniversal gaz sabiti, $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$              |
| $R'$                    | Gaz sabiti, $287 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$                           |
| $s$                     | Entropy, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$                                  |
| $T_{\text{gir}}$        | Girişteki akışkanın sıcaklığı, K                                            |
| $T_o$                   | Çevre sıcaklığı, K                                                          |
| $T_r$                   | Referans sıcaklığı, 0 K                                                     |
| $T_{\text{sck}}$        | Sıcak akışkanın sıcaklığı, K                                                |
| $T_{\text{soğ}}$        | Soğuk akışkanın sıcaklığı, K                                                |
| $\Delta T_{\text{sck}}$ | Sıcak akışın sıcaklığı ile girişteki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark, K |

**Simgeler****Açıklama** $\Delta T_{soğ}$ 

Soğuk akışın sıcaklığı ile girişteki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark, K

 $\Delta T$ 

Sıcak akışın sıcaklığı ve soğuk akışın sıcaklığı arasındaki fark, K

 $v$ Hız,  $m\ s^{-1}$  $Q$ 

Isı geçişi, kJ

 $V$ Hacim,  $m^3$  $W_s$ 

İş, kJ

 $\eta_{II}$ 

Ekserji verimi

 $\xi$ 

Soğuk akışın kütle debisinin girişteki akışın kütle debisine oranı

 $1-\xi$ 

Sıcak akışın kütle debisinin girişteki akışın Kütle debisine oranı

**Kısaltmalar****Açıklama****0**

Çevre hali

**1**

Giriş

**2**

Soğuk çıkış

**3**

Sıcak çıkış

 **$\Delta$** 

Değişim

**çkş**

Çıkış

**gir**

Giriş

**hvk**

Hareketli vida konumu

**k**

Kayıp

**N**

Nozul sayısı

**sck**

Sıcak

**soğ**

Soğuk

## 1. GİRİŞ

Isıtma ve soğutma konusu insanoğlunun var oluşundan itibaren günümüze kadar gelen bir konudur. Günümüzde, ısıtma ve soğutma için gerekli olan enerjinin büyük bir kısmı, fosil yakıtlar kullanılarak sağlanmaktadır. Fosil yakıt rezervleri ise gün geçtikçe azalmaktadır. Aynı zamanda da bu yakıtlardan oluşan baca gazları atmosferde sera etkisi göstermektedir. Soğutma işlemlerinde ise soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. Soğutucu akışkanlar, ozon tabakasında telafisi mümkün olmayan hasarlara neden olmaktadır. Hava ile çalışan soğutma veya ısıtma sistemleri diğer sistemlere göre daha avantajlıdır. Çünkü hava bol miktarda bulunur ve gerek soğutucu akışkanlar gerekse fosil yakıtlar gibi çevreye zararları yoktur. Isıtma veya soğutma sistemlerinde, yakıtlar ek bir maliyet getirdikleri halde havanın böyle bir ek maliyeti yoktur. Isıtma ve soğutma konusu için vorteks tüpler alternatif bir çözümdür ve vorteks tüpler hava ile çalışmaktadırlar. Vorteks tüpler ilk olarak Ranque tarafından keşfedilmiş, Hilsch tarafından geliştirilmiştir. Bu nedenle Ranque-Hilsch vorteks tüpü olarak isimlendirilmiştir. Basit bir borudan ibaret olan vorteks tüpler, ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılmakta olup, imalat masrafları oldukça düşüktür. Fakat kullanım alanları fazladır. Literatürde vorteks tüpler “sıcak çıkış tarafındaki parça hariç, hiç bir hareketli elemanı bulunmayan sistemler” olarak tanımlanmaktadır.

Vorteks tüpler değişik özellikleri dikkate alındığında iki ana başlık altında gruplandırılmaktadır. Bunlar, tasarım ve akış özellikleridir.

Tasarım özelliklerine göre;

1. Adyabatik vorteks tüpleri,
2. Adyabatik olmayan vorteks tüpleri.

Akış özelliklerine göre;

1. Karşıt akışlı vorteks tüpleri,

## 2. Paralel akışlı vorteks tüpleri,

olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar.

Paralel akışlı vorteks tüplerinde, sıcak akış soğuk akışa karışmaktadır. Bu nedenle paralel akışlı vorteks tüplerinin verimleri, karşıt akışlı vorteks tüplerine göre daha düşüktür (1).

Vorteks tüplerden farklı sıcaklıkta iki akışkan elde edilmektedir. Bunlar sıcak ve soğuk akışkandır. Sıcak ve soğuk akışkanın sıcaklığını etkileyen bir çok faktör vardır. Vorteks tüpün uzunluğunun tüp çapına oranı, nozul sayısı, akışkanın vorteks tüpe girişteki hızı ve basıncı bunlardan bazılarıdır.

Bu çalışma, değişik özelliklerde (akımın sıcak ve soğuk çıkış tarafından kontrol edilmesi, vorteks tüpün uzunluğunun tüp çapına oranı, hareketli vida konumu, nozul sayısı, hareketli vida çapı, hareketli vida ucundaki açı, akışkanın vorteks tüpe girişteki hızı ve basıncı) olan karşıt akışlı vorteks tüplerin performanslarını araştırmak için yapılmıştır. Performans, sıcak akışkanın sıcaklığı ile soğuk akışkanın sıcaklığı arasındaki farktır. Bu çalışma 3 ana başlık altında toplanmaktadır. Bunlar;

1. Analitik,
2. Sayısal,
3. Deneysel.

Analitik çalışmada, vorteks tüplere termodinamiğin 1.yasası ve 2.yasası uygulanmıştır. Termodinamiğin 2. yasasından yararlanılarak sıcak ve soğuk çıkış akımlarının sıcaklıklarının, giriş basıncından nasıl etkilendiğine dair analitik ifadeler geliştirilmiştir. Ayrıca deneysel verilerden yararlanılarak ekserji analizi yapılarak kayıp iş ve verim hesaplanmıştır.

Problemin çözümü için sayısal çalışma, PHOENICS'te yapılmıştır. Problem PHOENICS'te, değişik başlıklar altında incelenmiştir. Bunlar; sıcak taraf açık soğuk

taraf kapalı laminar akış, sıcak taraf ve soğuk taraf açık laminar akış, sıcak taraf açık soğuk taraf kapalı sıkıştırılabilir laminar akış, sıcak taraf ve soğuk taraf açık sıkıştırılabilir laminar akış, sıcak taraf açık soğuk taraf kapalı sıkıştırılabilir türbülanslı akış, sıcak taraf ve soğuk taraf açık sıkıştırılabilir türbülanslı akıştır.

Deneysel çalışmalarda iki farklı özellikte iki deneysel sistem kurulmuştur. Deneysel çalışmalarda, ilk olarak vorteks tüplerin çalışırılığını test etmek amacıyla bir deneysel sistem hazırlanmış ve bu deneysel sistemde, vorteks tüplerde sıcak çıkış tarafında olması gereken hareketli parça yerine, sabit dairesel bir parça yerleştirilerek, isteğe bağlı olarak, kütleli debileri her iki taraftan da (sıcak ve soğuk çıkış) ayarlanabilir bir vorteks tüp geliştirilmiştir. Her iki çıkışa şiber vanalar yerleştirilmiştir. Oluşturulan sistemde, sıcak çıkış tarafına takılan ve soğuk çıkıştaki kütleli akışı ayarlamak amacıyla kullanılan hareketli vida yoktur. Bu parça olmadığı halde kütleli akış her iki taraftan da sistemde isteğe göre ayarlanabilmektedir. Geliştirilen bu deneysel sistemde, ön çalışma deneyleri olarak üç farklı özellikte deneyler yapılarak sistemin performansı araştırılmıştır. İlk grup deneylerde, sıcak çıkış ve soğuk çıkış tarafındaki şiber vanalar tamamen açık konumda bırakılarak basınç yükseltilerek, sistemin çalışma basıncı belirlenmiştir. İkinci grup deneylerde, sıcak taraftaki şiber vana tamamen açık konumdan, tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılmış, soğuk taraf tam açık konumda bırakılmıştır. Üçüncü grup deneylerde ise, soğuk taraftaki şiber vana tamamen açık konumdan tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılmış, sıcak taraf ise tam açık konumda bırakılmıştır.

Yapılmış olan tüm deneylerde, girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hızlar ölçülmüştür. Bu ölçümlerden elde edilen değerler kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve hesapların sonuçları dikkate alınarak şekiller çizilmiştir. Çizilmiş olan şekiller yardımı ile vorteks tüpün performansı incelenerek yorumlar getirilmiştir.

Karşıt akışlı vorteks tüplerin performansını araştırmak amacıyla hazırlanan ikinci deneysel sistemde, 252 farklı özellikte, soğuk akımın kütleli debisinin girişteki

akımın kütleli debisine oranı olan  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde deneyler yapılmıştır (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1. 2.deneysel sistemin çalışma parametreleri ve aralıkları

| L/D        | Hareketli vidanın konumu | Hareketli vida çapı (mm) | Nozul sayısı | Hareketli vidanın ucundaki açı ( $\alpha$ ) | Giriş basıncı (kPa) |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------|---------------------------------------------|---------------------|
| 10, 15, 18 | L, L-1, L-2, L-3         | 5, 6, 7, 8               | 2, 4, 6      | 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°             | 200-320             |

*Not: L: Hareketli vidanın sıcak çıkışta bulunduğu konumdur, L-1: Hareketli vidanın sıcak çıkıştan 1 cm soğuk çıkış tarafa doğru hareket etmiş olduğu konumdur. L-2: Hareketli vidanın sıcak çıkıştan 2 cm soğuk çıkış tarafa doğru hareket etmiş olduğu konumdur. L-3: Hareketli vidanın sıcak çıkıştan 1 cm soğuk çıkış tarafa doğru hareket etmiş olduğu konumdur.*

Deneysel sonuçlardan yararlanılarak oluşturulan şekiller değerlendirildiğinde; en iyi vorteks tüp performansı,  $L/D=15$ ; nozul sayısı=4 (nozul kesit alanı  $2*2$  mm); hareketli vidanın konumunun=L; hareketli vida çapı=5 mm; hareketli vidanın ucundaki açı=30° olduğu deneysel olarak görülmüştür. Bu özellikteki vorteks tüple, deneysel sistem çalışır konuma getirilmiş ve  $P_{gir}=200$  kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla 420 kPa'a kadar yükseltilerek,  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde deneyler yapılmıştır. Basıncın yükselmesiyle vorteks tüpün performansının nasıl bir etkileşim gösterdiği deneysel olarak incelenmiştir.

Vorteks tüpün uygulamaya yönelik kullanımı amacıyla, en iyi performans gösteren vorteks tüp, etanol-su karışımının damıtılması işleminde kullanılmıştır. Ayrıca farklı bir vorteks tüpü deneysel sisteminde hava, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> kullanılarak enerji ayrışma olayı çeşitli gazlarla incelenmiştir.

Bu çalışmada, deneysel verilerden yararlanılarak, vorteks tüpün peformansı bulanık mantık metodu ile de modellenmiştir. Bulanık mantık metodu kullanılarak yapılan modellemeden, hassas sonuçlar elde edilebileceği ve metodun tüm Ranque-Hilsch vorteks tüpüyle yapılan deneysel çalışmalara uygulanabileceği grlmştir.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Vorteks tüplerde sıcaklık ayrışımı olayını ilk keşfeden ve bu konuda patent alan kişi, Fransız metalurjist ve fizik bilim adamı George Ranque, bir siklon ayırıcı içinde cidardaki akışın iç bölgedeki akışa oranla ısındığını ve merkezdeki akışın sıcaklığının, girişteki akımın sıcaklığından daha düşük bir değerde olduğunu görmüştür. Bu doğrultuda bir tüpe teğetsel bir akım göndererek çalışmalar yapmış ve 1933 yılında çalışmalarının sonuçlarını açıklamıştır. Fakat bilim ve mühendislik topluluklarından gereken ilgiyi görememiştir. Ranque, vorteks tüplerin endüstriyel olarak kullanılabileceğini düşünerek, “Vortec” adındaki şirketi kurmuştur. Ama bu şirket ticari yetersizlik nedeni ile devamlılık gösterememiştir. 1946 yılında Alman Mühendis Rudolf Hilsch, vorteks tüpü, günümüzdeki kullanıldığı şekilde dizayn etmiştir (1).

Hartnett ve Eckert (1957), 30" uzunluğunda, 3" çapında, 3/8" çapında ki 8 nozul ile pleksiglastan yapılmış olan vorteks tüp ile çalışmışlardır. Vorteks tüpe giriş basıncı 10, 15 ve 20 psig olarak uygulanmıştır. Vorteks tüpün gövdesine, eksen boyuna 1", 3", 6", 12" ve 18" olmak üzere 5 prob yerleştirilerek ölçme yapılmış ve merkezdeki akışın sıcaklığının düşük, akışın dış bölümlerinde ise sıcaklığın yüksek olduğu görülmüştür (2).

Gulyaev (1966), vorteks tüpü, vorteks etkileri yönünden, teorik olarak gaz dinamiği analizini yapmıştır. Çalışmalarında,  $D=30$  mm,  $L/D=13$ ,  $d_{soğ}/D=0,5$  konik bir vorteks tüp kullanmıştır. Konik vorteks tüpün sıcak çıkış tarafına bir aparat yerleştirilmiştir. Bu aparatın, soğuk çıkıştan itibaren olduğu mesafeyi,  $L_1$  olarak isimlendirilmiş ve  $L_1$ 'i 85 ile 250 mm arasında değiştirilerek incelenmiştir.  $L_1=85$  olduğunda soğuk akım sıcaklığının daha düştüğü fakat sıcak akım sıcaklığını fazla yükselmediği görülmüştür (3).

Stephan ve ark. (1983,1984), enerji ayrışımı için genel matematik formüllerinden hareket ederek boyut analizi yapmışlardır.  $D=17,6$  mm ve  $L=20D=352$  mm ve nozul çapı 4,1 mm,  $d_{soğ}=6,5$  mm olan 1,5; 2; 2,5; 3; 4 bar giriş basıncında vorteks tüplerin

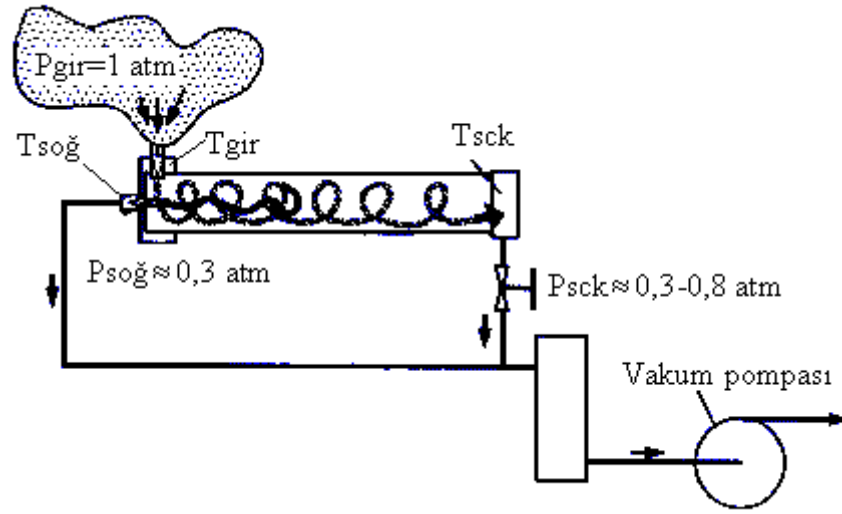
performansları araştırılmıştır.  $\Delta T_{soğ}/\Delta T_{soğmaks}$  şeklinde boyutsuz bir ifade tanımlanmıştır.  $\Delta T_{soğ}/\Delta T_{soğmaks}$ 'a göre hava, oksijen ve helyum için bu büyüklüğü, soğuk akım kesrine göre değişimleri irdelenmiştir. Tanımlanan bu büyüklüğün vorteks tüpün çalışma şartlarından bağımsız olduğunu ifade edilmiştir (4, 5).

Balmer (1988), yapmış olduğu çalışmada, Ranque-Hilsch vorteks tüpünde gerçekleşen sıcaklık ayrışma olayını, sıkıştırılabilir gazlarla sınırlı olmadığını ve sıkıştırılamaz akışkanlar içinde uygulanabileceğini belirtmiştir. Termodinamiğin 2.yasasını, sıkıştırılamayan akışkanlar için teorik analizi yapılmış ve bu cihazların sıkıştırılamayan akışkanlar içinde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Hava kullanımı için tasarlanan ticari vorteks tüpde, 20-50 MPa giriş basıncında, 10-20 °C arasında sıcaklık ayrışma olayının gerçekleştiği görülmüştür. Giriş basıncının yeterince yüksek olduğu durumlarda sıvılar içinde bu cihazların enerji ayrışmasında kullanılabileceği belirtilmiştir. Kullanılmış olan vorteks tüpün sıkıştırılabilir akış için tasarlandığını, sıvılar için farklı bir dizaynla bu enerji ayrışma olayının daha da iyileşebileceği önerilmiştir (6).

Piralishvili ve Polyaev (1996), vorteks tüp gövdesine açı vererek, vorteks tüpü konikleştirmişlerdir. Bu konikleşen vorteks tüp, tüp eksenini boyunca 6 bölüme ayrılmış ve teorik olarak incelenmiştir.  $0,3 \leq P_{gir} \leq 0,6$  MPa basınç aralığında çalışılmış ve sıcak çıkış tarafına difüzör yerleştirilmiştir. 30 mm çapındaki bir vorteks tüpe 3-3,5°'lik bir açı verilince, vorteks tüplerde ikinci bir döngü oluştuğu belirtilmiştir (7).

Ahlborn ve ark. (1996), Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 25,4 mm çapında ve 60 mm uzunluğunda olan bir vorteks tüpe bir vakum pompası bağlayarak, vorteks tüpü düşük basınçlarda çalıştırmışlardır. 10, 20, 30 psig (69; 138; 207 kPa)'de basınçlı hava ile çalışan vorteks tüple, vakumla çalıştırılan vorteks tüp,  $X=(P_{gir}-P_{soğ})/P_{gir}$  şeklindeki boyutsuz bir büyüklük dikkate alınarak mukayese edilmiştir. Burada  $P_{gir}$  girişteki basıncı,  $P_{soğ}$  soğuk çıkış tarafındaki basınçtır. Vakum pompası ile yapılmış olan deneylerde X'i 0,19 olarak hesaplanmıştır. Sıkıştırılmış hava ile çalışan vorteks

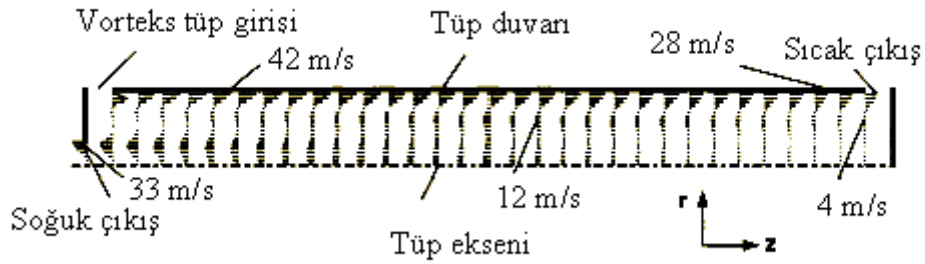
tüpde ise 10 psig’de  $X=0,16$ ; 20 psig’de  $X=0,24$ ; 30 psig’de  $X=0,29$ ’dır. Vakum pompası ile çalışılan vorteks tüpteki  $X$ ’in 10 psig ile 20 psig arasında basınçlı hava ile çalışılan vorteks tüplere karşılık geldiği ifade edilmiştir. Bu tür vorteks tüplerin kapalı sistemlerde, soğutma ve nemden arındırma işlemleri için kullanılabileceği önerilmiştir (8).



Şekil 2.1. Ahlborn ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları deneysel sistem (8)

Saidi ve Yazdi (1999), Ranque-Hilsch vorteks tüpünden elde ettikleri deneysel sonuçları kullanarak ekserji analizi yapmışlardır. PVC ve çelikten yapılmış vorteks tüplerin performansları mukayese edilmiş ve PVC tüpün performansının daha yüksek olduğu görülmüştür. 3, 5, 6 bar giriş basıncında, sıcak akım sıcaklığı ile soğuk akım sıcaklığı arasındaki fark olan  $\Delta T$ ’nin giriş basıncından nasıl etkilendiği incelenmiş ve 6 bar’da vorteks tüpün performansının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.  $L=100$ , 150, 200 mm için, soğuk akım kesrine göre 600 kPa giriş basıncında kayıp ekserji incelendiğinde,  $L=100$  mm’de kayıp ekserjinin daha fazla olduğu görülmüştür. 300, 500, 600 kPa giriş basıncında, soğuk akım kesrine göre kayıp ekserji mukayese edildiğinde, en fazla kayıp ekserjinin 300 kPa giriş basıncında olduğu hesaplanmıştır. 500 kPa giriş basıncında 1 ve 1,5 mm’lik nozul çapına göre kayıp ekserji incelendiğinde  $L=200$ mm için 1 mm’lik nozul çapında ( $L=200$ mm) daha fazla olduğu gözlemlenmiştir(9).

Fröhlingsdorf ve Unger (1999), Ranque-Hilsch vorteks tüpündeki enerji ayrışma olayını, sıkıştırılabilir akış için CFX kodlu programda 2 boyutlu olarak, CFD’de modellemişlerdir (Şekil 2.2).

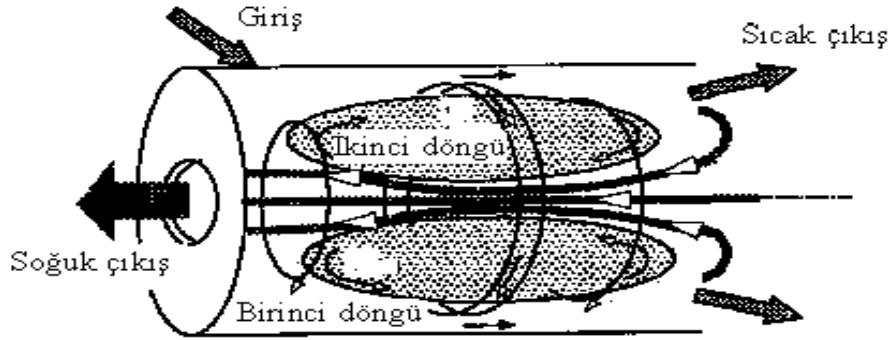


Şekil 2.2. Fröhlingsdorf ve Unger'in CFX çözümünden oluşturdukları hız profilleri (10)

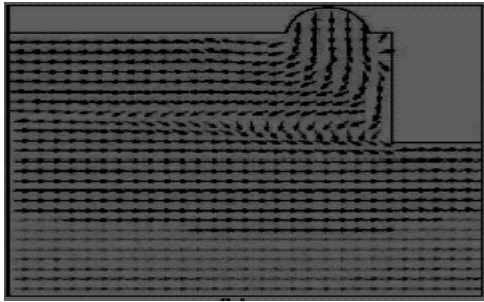
Bruun'un deneysel çalışmalarından yararlanılmış, vorteks tüp uzunluğunu  $L=520$ , tüp yarıçapını  $r=47$  mm soğuk çıkış yarıçapı  $r_o=17,5$  mm nozul kesit alanı  $A_{nzl}=363$  mm<sup>2</sup> ve 4 nozul, girişteki akımın kütle debisi 0,12 kg/s, giriş basıncı 2 bar (mutlak basınc), giriş sıcaklığı 294 K, soğuk akım kesri  $\xi=0,23$ ,  $\Delta T_{soğ}=-20$  K,  $\Delta T_{sck}=6$  K olarak çalışılmıştır. CFX kodlu program sonucunda vorteks tüp içindeki akışın hız profillerini gösterilmiştir (Şekil 2.2). CFX kodlu programdan elde edilen nümerik çözümler, Bruun'un deneysel sonuçları ile karşılaştırıldığında, yapılmış olan çalışmanın olumlu olduğu belirtilmiş ve soğuk akımdan sıcak akıma mekanik iş transferi olduğundan, sıcak akımın sıcaklığının arttığını ifade edilmiştir (10).

Ahlborn ve ark.(1994), vorteks tüplerde oluşan ısınma ve soğumanın kinetik enerjinin azalması ya da yükselmesiyle ilgili olduğunu savunmuşlardır. Sıcak akım  $T_{sck}-T_{gir}/T_{gir} \leq X(\gamma-1)/\gamma$  ve soğuk akım  $T_{soğ} \geq T_{gir}(1-X)^{(\gamma-1)/\gamma}$  şeklinde ifade edilmiştir. Buradaki  $T_{sck}$ , sıcak akımın sıcaklığı,  $T_{soğ}$  soğuk akımın sıcaklığı,  $T_{gir}$  girişteki akımın sıcaklığı,  $X=(P_{gir}-P_{soğ})/P_{gir}$ ,  $\gamma=1,4$  (hava için)'dir. 18 mm iç çapında ve havayla çalışan bir vorteks tüpde,  $X=0,7$  olduğunda, girişteki hızın, ses hızına ulaşabileceği belirtilmiştir (11).

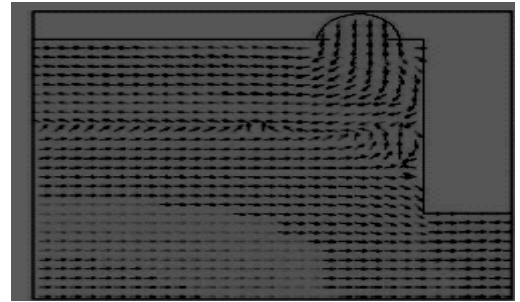
Ahlborn ve Gordon (2000), Ranque-Hilsch vorteks tüpünde sıcak akım sıcaklığının soğuk akım sıcaklığına oranı olan  $T_{\text{soğ}}/T_{\text{sıcak}} \approx 1 + \{(\gamma-1)X(\xi+1)/\gamma\}$  şeklindeki ifadeyi dikkate alarak, soğuk akım kesrinin değişik değerlerinde bu ifadeyi matematiksel olarak irdemişlerdir. Burada  $X=(P_{\text{gir}}-P_{\text{soğ}})/P_{\text{gir}}$ ,  $\gamma=1,4$  (hava için)  $\xi$  ise soğuk akım kesridir (12). Ahlborn ve Groves (1997), vorteks tüplerde, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi ikincil bir akışın oluştuğunu ifade etmişlerdir (13). Behera ve ark. (2005) ise bu ikincil akışın soğuk kesit alanıyla ilgili olduğunu CFD’de ki çözümleriyle göstermişlerdir (Şekil 2.4). Soğuk çıkış kesit alanı dar olduğunda, ikincil akışın oluşacağı vurgulanmıştır (14).



Şekil 2.3. Vorteks tüpde oluşan birinci ve ikincil akış (13)



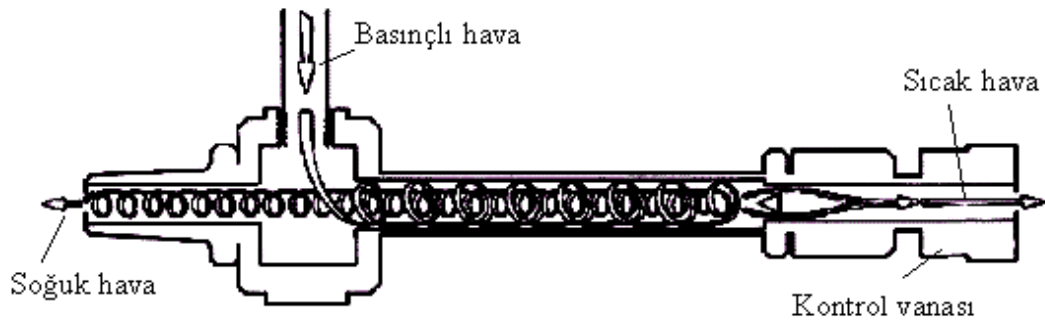
a) Soğuk kesit alanı büyük  
İkincil akış yok



b) Soğuk kesit alanı küçük  
İkincil akış var

Şekil 2.4. Behera ve arkadaşlarının CFD’de çözümleriyle gösterdikleri soğuk çıkıştaki akış (14)

Saidi ve Valipour (2003), çalışmalarında vorteks tüp çapını  $D=18\text{mm}$ , vorteks tüp uzunluğunu  $L=55,5 \cdot D=1000\text{ mm}$ , boyutlarındaki vorteks tüpünü kullanarak, soğuk çıkış çapı, vorteks tüp girişindeki havanın nemi, gaz tipi, vorteks tüp uzunluğunun vorteks tüp çapına göre değişiminin, Ranque-Hilsch vorteks tüpü performansına etkisini incelemişlerdir (Şekil 2.5).

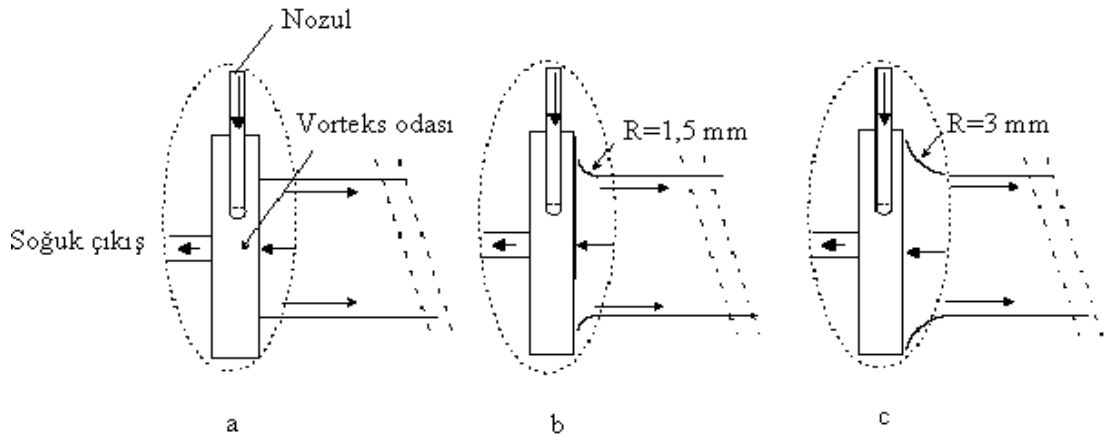


Şekil 2.5. Saidi ve Valipour'un çalışmalarında kullandıkları vorteks tüp (15)

$L/D < 20$ ,  $L/D > 55,5$  olduğunda vorteks tüp performansının azaldığı,  $L/D > 20$ 'da VT performansının yükseldiği deneysel olarak gözlemlenmiştir ve  $20 < L/D < 55,5$  olması gerektiği ifade edilmişlerdir. Soğuk çıkıştaki çap  $d_{soğ}^* = d_{soğ}/D$  şeklinde boyutsuz duruma getirilmiş ve  $\Delta T_{soğ}$  (girişteki akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark)'ın  $d_{soğ}^*$ 'a göre değişimleri deneysel verilere göre incelenmiş ve  $d_{soğ}^* = 0,5$  oluncaya kadar,  $\Delta T_{soğ}$ 'un sürekli artış gösterdiği,  $d_{soğ}^* > 0,5$ 'den sonra ise  $\Delta T_{soğ}$ 'un düştüğü ifade edilmiştir. Vorteks tüpe 1,5 bar giriş basıncında, 3 ve 4 nozulun vorteks tüp performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir ve 3 nozulun performansının 4 nozula göre daha iyi olduğu belirtilmiştir. Soğuk çıkış çapı 9 mm alınarak, 1; 1,5; 2; 2,5; 3 bar giriş basıncında, vorteks tüp performansı incelendiğinde, basıncın yükselmesiyle vorteks tüp performansında arttığı belirtilmiştir. Ancak soğuk akım kesri olan  $\xi$  ( $\xi = m_{soğ}/m_{gir}$ )'nin yani soğuk akımın girişteki akıma oranının düşük değerlerinde bu performans yüksek,  $\xi$ 'nin artan değerlerinde ise performansın düştüğü gözlemlenmiştir. 1,5-5 bar basıncda, Helyum Oksijen ve havada, vorteks tüp performansı incelendiğinde, en iyi performansın helyumda olduğu görülmüştür. Vorteks tüp girişindeki havaya nem verilerek  $T_{sck}$  ve

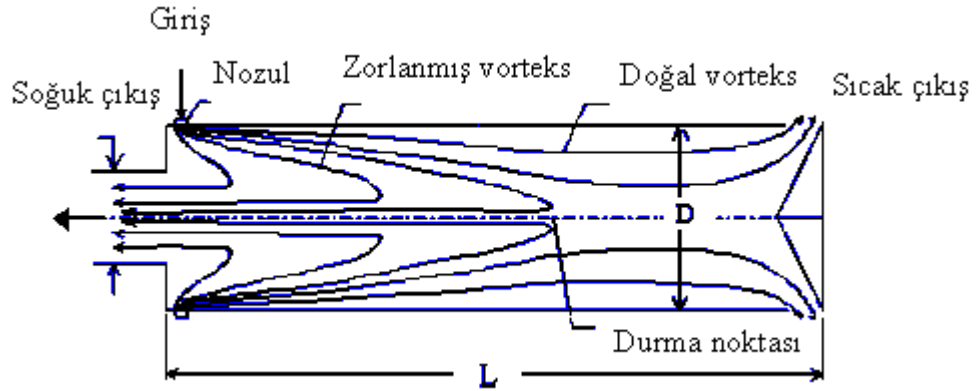
$T_{soğ}$ 'un nemden önce ve nemden sonra ki değerleri mukayase edildiğinde, girişteki havada nem yükseldikçe, soğuk akım sıcaklığının soğumasının azaldığı belirtilmiştir(15).

Gao ve ark. (2005), Şekil 2.6'da görüldüğü gibi 30 mm çapında ve 11 mm uzunluğundaki dairesel bir parçayı (Şekil 2.6b'de 1,5 mm yarıçapında kavisle, Şekil 2.6c'de 3 mm yarıçapında kavisle) soğuk çıkış tarafına yerleştirmişler ve bu parçayı vorteks odası olarak isimlendirerek, Ranque-Hilsch vorteks tüp performansını araştırmışlardır. Nozul ise bu dairesel parçanın içinde bulunmaktadır. Vorteks tüp gövdesinin eksenini boyunca belirli aralıklarla 9 ayrı noktadan ölçümler yapılmış ve vorteks tüp performansı, Mach sayısı ile analiz yapılmıştır. Yapılmış olan bu üç farklı geometrik yapıda da vorteks tüplerdeki akışın, türbülanslı olduğu gözlemlendiği ifade edilmiş ve geliştirilen bu modelle vorteks tüp performansının artırıldığı belirtilmiştir (16).



Şekil 2.6. Gao ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları vorteks tüpler (16)

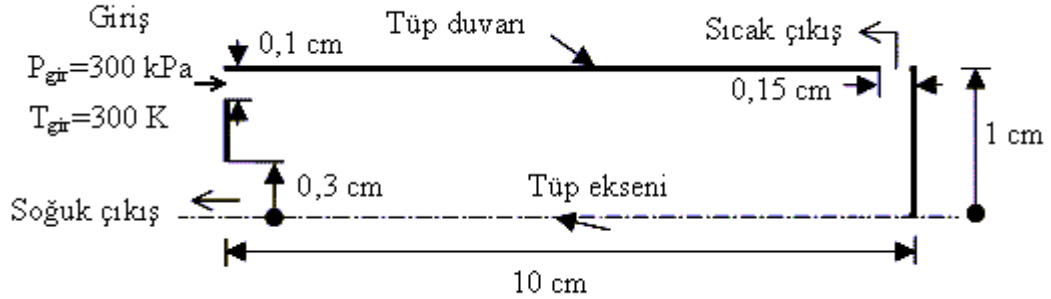
Behera ve ark.(2005), vorteks tüp içindeki akımı iki bölgeye ayırmışlar, soğuk akımın olduğu bölgeyi zorlanmış vorteks, sıcak akımın olduğu bölgeyi ise doğal vorteks bölgesi olarak isimlendirmişlerdir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Ranque-Hilsch tüpün şematik görünümü (14)

Ranque-Hilsch vorteks tüpünü Star-CD kodlu programda, deneysel sonuçlar kullanarak 3 boyutlu olarak CFD analizi yapmışlardır.  $D=12$  mm,  $L/D=20$  soğuk çıkış çapı  $d_{soğ}=7$  mm,  $A_{nızl}/A_{vt}=0,07$  ( $A_{nızl}$ ; nozul kesit alanı,  $A_{vt}$ ; vorteks tüp gövdesinin kesit alanı), sıcak akım sıcaklığı 353,7 K, soğuk akım sıcaklığı 266,2 K olan deneysel sonuçlarla, CFD'deki çalışmalarını karşılaştırmışlardır. Nozul sayısı ve nozul profilleri yönünden CFD ile vorteks tüp analiz edilmiştir. Soğuk çıkıştaki çap,  $L/D$ , sıcak akım kesrine  $1-\xi$  (sıcak akımın girişteki akıma oranı)'ye bağlı olarak irdelenmiştir. Yapılmış olan çalışmada hücreler,  $0,003 \text{ mm}^3$ – $0,012 \text{ mm}^3$  arasında alınmıştır.  $d_{soğ}/D$  ( $d_{soğ}$ ;soğuk çıkış çapı) CFD'de analiz edilmiş ve  $d_{soğ}/D=0,323$  olduğunda vorteks tüp içerisinde ikincil bir akışın oluştuğu (Şekil 2.4),  $d_{soğ}/D=0,58$  olduğunda ise ikincil akışın oluşmadığı hız vektörleriyle açıklanmıştır.  $L/D=10, 15, 20, 25, 30, 35$  olarak nümerik olarak araştırılmış,  $20 \leq L/D \leq 30$  arasında olduğunda, Ranque-Hilsch vorteks tüpünün performansının artacağı, sayısal çözümlere bağlı olarak yorumlanmıştır (14).

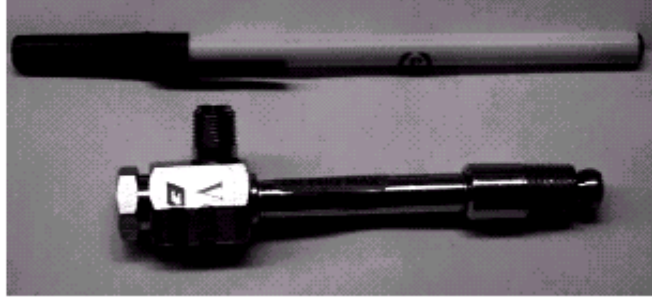
Aljuwayhel ve ark. (2005), Ranque-Hilsch vorteks tüpünü, FLUENT kodlu bilgisayar programında,  $P_{gir}=300$  kPa,  $T_{gir}=300$  K, vorteks tüp gövdesinin uzunluğu  $L=10$  cm, çapı  $D=2$  cm ve 75 000 hücre kullanarak, iki boyutlu olarak modellemişlerdir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Aljuwayhel ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları vorteks tüp geometrisi (17)

Aljuwayhel ve ark., çalışmalarında, klasik  $k-\epsilon$  ve RNG  $k-\epsilon$  türbulanslı model olmak üzere iki tür model kullanmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, vorteks tüp gövdesinin uzunluğunu 10 cm'den 30 cm'ye çıkararak çalışma özelliğini değiştirmeden, nümerik olarak irdelediklerinde, vorteks tüp gövdesinin boyu uzatılınca, soğuk akım sıcaklığının % 2,6 K düştüğünü belirtmişlerdir. Vorteks tüp çapı yükseldikçe, açısal hızın düştüğü, bu yüzden enerji ayrışma olayının olumsuz yönde etkilendiği belirtilmiştir (17).

Skye ve ark.(2005), Exair 708 slpm (25 scfm) olan ticari vorteks tüple yapılan deneysel çalışmadan yararlanarak, Ranque-Hilsch vorteks tüpünü, 2 boyutlu olarak FLUENT kodlu programda modellemişlerdir. Giriş basıncı 483 kPa, soğuk çıkış kesit alanı  $30,2 \text{ mm}^2$ , sıcak çıkış kesit alanı  $95 \text{ mm}^2$ , nozul sayısı 6 ve 25 000 hücre kullanarak FLUENT paket programında yapılmış olan çalışma, ticari vorteks tüpün deneysel sonuçları ile mukayese edildiğinde sonuçların uyumsuzluk gösterdiği belirtilmiştir. Bunun nedenininde, ticari vorteks tüpte farklı nozul tipi kullanıldığından kaynaklandığı, bu yüzden nozul kesit alanını arttırılması gerektiği iddia edilmiştir. Nozul kesit alanı arttırıldığında, çözümün uyum sağladığı belirtilmiştir (18).



Şekil 2.9. Skye ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları ticari vorteks tüp(18)

Choi ve ark. (2001), CNC makinalarında, vorteks tüpünden elde ettikleri basınçlı soğuk havayı, soğutma işlemlerinde kullanmışlardır. İş parçasının, vorteks tüpden sağlanan basınçlı soğuk hava ile işlendiğinde, parçanın yüzeyinde oluşması gereken yağın olmadığından dolayı, düzgün bir şekilde işlendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca 9,3 mm ve 12,3 mm çapında iki farklı nozul kullanılmış ve 9,3 mm çapındaki nozulun 12,3 mm çapındaki nozuldan daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir(19).

Hajdik ve ark. (1997), vorteks tüpleri gaz-sıvı ayrıştırma işlemlerine uygulamışlardır. Çok yüksek basınçlarda ve çok büyük ebatlarda vorteks tüplerle çalışmışlardır. Vorteks tüp gövdesinin altına, ek bir aparat ilave edilerek, gaz-sıvı karışımından sıvı alma işlemi için kullanılmıştır (20).

Bruno (1992, 1994), Kromatografik analizlerde, kromatografik şırınganın soğutulmasında, çözeltilerin soğutulmasında, nem gidermede, hava hattının nemden arındırılmasında, kızıl ötesi analizlerde, vorteks tüpün kimyasal analizlerde, soğutma ve ısıtma gerektiren yerlerde, vorteks tüplerin kullanılabileceğini ve çok ekonomik çözümler olduğunu ifade etmiştir (21, 22).

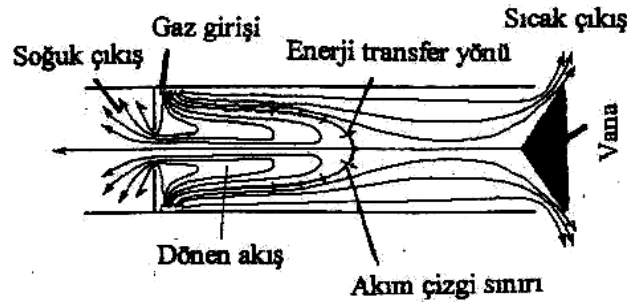
Literatür çalışmaları çizelgelere dönüştürülerek Ek-Çizelge 1.1-1.2’de verilmiştir.

### 3. ANALİTİK ANALİZ

Bu bölümde, karşıt akışlı vorteks tüplerin çalışma prensibi ve kullanım alanları açıklanarak, vorteks tüplere termodinamiğin 1. ve 2. yasası uygulanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonunda vorteks tüpten çevreye olan ısı kaybının çok küçük olduğu ve bu sistemin, adyabatik olarak kabul edilebileceği anlaşılmıştır. Termodinamiğin 2. yasasından yararlanılarak sıcak ve soğuk çıkış akımlarının sıcaklıklarının, giriş basıncından nasıl etkilendiği incelenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmaların sonuçlarından yararlanılarak ekserji analizi ile sistemdeki kayıp iş ve verim hesaplanmıştır.

#### 3.1. Problemin Tanımı

Bu çalışma karşıt akışlı vorteks tüpler üzerinde yapılmıştır. Karşıt akışlı bir vorteks tüpün çalışma prensibi, şu şekilde tarif edilebilir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, nozullardan vorteks tüpe teğetsel olarak giren akışkan, vorteks tüpün silindirik yapısından dolayı, akışkanın girişteki hızı ve basıncına bağımlı olarak, yüksek hızlarda dönmeye başlar.



Şekil 3.1. Vorteks tüplerdeki akış (23)

Yüksek hızlarda dönen akışkan tüp cidarındaki sürtünmeden dolayı, tüp cidarı ve tüpün merkezindeki akışkan arasında basınç farkı oluşur. Tüp cidarındaki akışkanın hızı, tüp cidarındaki sürtünmenin etkisi ile tüp merkezindeki akışkanın hızına göre daha düşüktür. Bu sebepten merkezdeki akışkan tüp cidarındaki akışkana enerji

transfer eder ve vorteks tüpün geometrik yapısına bağımlı olarak bir durma noktasından sonra ters yönde hareket eder. Enerjisini transfer eden soğuk akışkan, enerji transfer edilen akışkan ise sıcak akışkandır (24).

### **3.2. Vorteks Tüplerin Uygulama Alanları**

Vorteks tüplerin kullanım alanları, bu cihazların ürettiği farklı akışların sıcaklıklarının yeterli seviyelerde olması ve işletme maliyetlerinin düşük olması gibi başlıca nedenlerle günümüzde endüstriyel uygulamalar içinde oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Özellikle spot soğutma olarak tabir edilen ve herhangi bir cihaz içerisindeki ısı üreten kaynağın direkt soğutulduğu uygulamalar için oldukça yaygındır. Ayrıca kimyasal analizlerde soğutma amacı ile kullanılmaktadırlar.

#### **3.2.1. Vorteks tüplerin noktasal soğutma amacıyla kullanımı**

Vorteks tüplerin noktasal soğutma amacıyla kullanımı endüstriyel uygulamalar içinde geniş bir yer tutmaktadır. Bu tür uygulamalarda kullanılan vorteks tüplerin özellikleri sabit kapasite için ayarlanmıştır. Bu sabit değer cihazın ürettiği maksimum soğutma kapasitesidir.

Soğutma amacıyla vorteks tüplerin kullanımı;

- Programlanabilir makina elemanlarının soğutulması, otomatik hatların ve robotize uygulamaların elektronik ünitelerinin soğutulması,
- Kesici takımların ve taşlama taşlarının soğutulması,
- Termal kameraların merceklerinin soğutulması,
- Sürekli kaynak yapan ve ısınan punto kaynak cihazlarının uçlarının soğutulması,
- Bilgisayar  nitelerinin ve CNC cihazlarının devrelerinin soğutulması,
-  p üreten cihazlarda sürtünmeden ısınan iplerin ve cihaz ekipmanlarının soğutulması,
- Rigo tezgahlarında mamul köşelerinin soğutulması,

- Punto kaynak cihazının soğutulması,
- Diş açma paftasının soğutulması,
- CNC elektronik devrelerinin soğutulması,
- Otomatik bandın hareketlerini kontrol eden elektronik sistemin soğutulması,
- Taşlama taşının soğutulması,
- Torna kaleminin soğutulması,
- Freze kesici takımının soğutulması,
- İp üretim cihazında ipin ve makaraların soğutulması.

### **3.2.2. Kimyasal analizlerde vorteks tüp kullanımı**

Kimyasal analizlerde her geçen yıl vorteks tüplerin kullanımları artmaktadır. Üretilen soğuk akış sıcaklığının yeterli olması ve cihaz ebatlarının küçük olması nedenleri ile vorteks tüpler kimyasal analizlerde sıkça tercih edilen bir uygulama haline gelmişlerdir.

### **3.2.3. Orta sıcaklıklı kromatografik analizlerde vorteks tüp kullanılması**

Bir bileşiğin içerdiği maddelerin neler olduğunun tespitinde ve bileşiği oluşturan maddelerin miktarını belirlemede faydalanılan kromatografik analizler, 0 °C ile -100 °C değerleri arasında yapılabilmektedir. -40 °C değerine kadar olan analizlere ise orta sıcaklıklı kromatografik analizler denmektedir. Bu işlem için düşük sıcaklıklarda buharlaşan sıvı soğutkanlar (kriojenik akışkan) kullanılabilir.

### **3.2.4. Çözeltilerin soğutulmasında vorteks tüp kullanımı**

Bazı çözeltilerde çözücü maddenin buharlaşması nedeni ile çözeltinin konsantrasyonunda değişimler olmaktadır. Bu sebeple çözelti soğutulurak çözücü bileşenin buharlaşmasının durdurulması amaçlanır. Aynı zamanda "Micro veya Kuderna Danish" tipi konsantre edici aparatta numunenin üst kısımları ısıtılmakta alt kısımları ise soğutulmaktadır. Bu iş için ise vorteks tüp uygun olabilmektedir.

### **3.2.5. Nem giderme işlemlerinde vorteks tüp kullanımı**

Özellikle baca gazının analizinin yapılması ve buna benzer analizlerde numunenin nemden arındırılması gerekir. Baca gazı analizinin yapıldığı cihazın sensörünün elektroliti neme duyarlı olan bir alkalin kurşun hidroksit malzemedir. Bu sebepten dolayı numunenin nemden arındırılması bazı kimyasal analizlerde önem arz etmektedir. Vorteks tüpten elde edilen soğuk hava akımı bir ters akımlı ısı değiştiricisine nakledilirken ısı değiştiricisinin diğer ucuna da nemden arındırılacak ve analize tabi tutulacak numune nakledilir. Yoğuşan nem yerçekiminin etkisiyle ısı değiştiricinin altına bağlanmış bir haznede biriktirilir.

### **3.2.6. Hava hattının nemden arındırılması işlemlerinde vorteks tüp kullanımı**

Basıncı hava hatlarında, nakledilen hava nem içerebilir. Pnömatik sistemlerde hava içerisindeki nem, bazı durumlarda arzu edilmeyen şartlar meydana getirebilmektedir. Bu sebeple hava içerisindeki nemin alınması pnömatik sistemlerin çalışma şartları açısından önem arz etmektedir.

### **3.2.7. Kızılötesi analizlerde soğutma amaçlı vorteks tüp kullanımı**

Kızılötesi ışınlar kullanılarak yapılan analizlerde numunenin bulunduğu hücrenin soğutulması gerekmektedir. Alternatif soğutkanlar ile yapılabilecek bu hücre soğutulmasında kullanılan "Dewar" tipi hücreler pahalı cihazlardır. Ayrıca kızılötesi analizlerinde  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıklar önemlidir. Bir çok soğutucu akışkanda daha düşük sıcaklıklarda buharlaşabildiklerinden bu sıcaklıklarda kullanılmaları bazı durumlarda sorun çıkarabilmektedir. T. J. Bruno, vorteks tüp soğutma sistemi ile yaptığı kızıl ötesi analizlerde oldukça güvenilir sonuçlar aldığını ve vorteks tüp ile soğutma sisteminin bu analizde avantajlı olduğunu belirtmiştir.

### **3.2.8. Vorteks tüp sisteminin gaz endüstrisinde kurutma amacıyla kullanımı**

Vorteks tüp sisteminin gaz endüstrisinde kullanım alanı, bir hidrokarbon bileşiği olan doğalgaz içerisinden nem almaktadır. Vorteks tüp sistemi, endüstrideki diğer

uygulamalarından farklı olarak çok büyük ebatlara sahiptir ve çok yüksek basınçlarında (60-65 bar) çalıştırılmaktadır.

### 3.2.9. Vorteks tüp ile kar yapımı

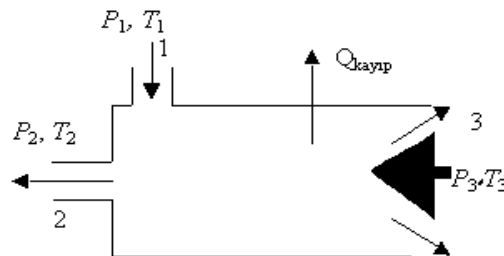
Vorteks tüpün sağladığı soğuk akışın sıcaklığının kar üretimi için kullanılması fikri ilk olarak 1999 yılında L. Tunkel ve ark. tarafından düşünülmüştür. Vorteks tüpten elde edilen soğuk akış, bir su jetinden pülverize olarak püskürtülen su hüzmesi ile kesiştirilerek kar üretilebilir (1).

### 3.3. Analitik Analiz

Bu çalışmada, vorteks tüplere termodinamiğin 1. ve 2. yasası uygulanmış, sıcak ve soğuk akım sıcaklıklarının giriş basıncından nasıl etkilendiklerine dair teorik ifadeler geliştirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçlarından yararlanılarak ekserji analizi ile sistemdeki kayıp iş ve verim hesaplanmıştır.

#### 3.3.1. Vorteks tüplere termodinamiğin 1. yasasının uygulanması

Bu çalışmada, genellikle oda sıcaklığında ve yüksek basınçtaki giriş sıcaklığına göre daha sıcak ve daha soğuk iki akım elde etmek için kullanılan vorteks tüplerin Termodinamik analizi yapılmıştır. Çözümü esas alınan sistemin genel görünüşü, Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Sistemin genel görünüşü

Tüm sürekli açık sistemler için madde denkliği

$$\sum \dot{m}_{gir} - \sum \dot{m}_{çıkış} = 0 \quad [3.1]$$

deneysel çalışmada kullanılan vorteks tüp için uygulanırsa

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad [3.2]$$

elde edilir. Vorteks tüpler için termodinamiğin 1. yasası ile işlem yapılırken vorteks tüpün adiyabatik olduğu kabul edilmiş ve dış yüzeyden ısı kaybı ihmal edilmiştir.

$$\sum \dot{m} h + \sum \dot{m} \overset{\sim 0}{g z} + \sum \dot{m} \overset{\sim 0}{\frac{v^2}{2}} = \overset{\sim 0}{\dot{Q}} - \overset{\sim 0}{\dot{W}_s} \quad [3.3]$$

$$\sum \dot{m} h + \sum \dot{m} \frac{v^2}{2} = 0 \quad [3.4]$$

Giriş, sıcak ve soğuk çıkışların alanları dikkatle ayarlanıp, yaklaşık  $v_1 \approx v_2 \approx v_3$  yapılabilir. Kinetik enerji terimlerinin katkısı yaklaşık sıfır alınabilir ve enerji eşitliği entalpi eşitliğine dönüşür (Eş. 3.6).

$$\sum \dot{m} h = 0 \quad [3.5]$$

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 \quad [3.6]$$

Vorteks tüpler çoğunlukla gazlar için uygulanır. Bu çalışmada da akışkan olarak hava kullanılmıştır. Havanın ideal gaz gibi davrandığı dikkate alınırsa, ideal gazlar için geçerli olan hal denklemleri kullanılabilir.

$$PV = nRT \quad [3.7]$$

$$\dot{m}_1 c_p (T_1 - T_r) = \dot{m}_2 c_p (T_2 - T_r) + \dot{m}_3 c_p (T_3 - T_r) \quad [3.8]$$

Referans sıcaklığı  $T_r = 273,15$  K alındığında, Eş. 3.8, kütleli birimler cinsinden Eş. 3.9 gibi yazılabilir.

$$\dot{m}_1 T_1 = \dot{m}_2 T_2 + \dot{m}_3 T_3 \quad [3.9]$$

### 3.3.2. Vorteks tüplere termodinamiğin 2. yasasının uygulanması

$P_1, V_1, T_1$  ilk halinden  $P_2, V_2, T_2$  son haline giden bir ideal gaz için

$$\Delta S = \dot{n} \tilde{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} - \dot{n} R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [3.10]$$

olarak yazılabilir.

$\Delta S$  (entropi değişimi)  $\Delta H$  gibi hal fonksiyonudur. Sadece ilk ve son hallere bağlıdır. Takip edilen yolun  $\Delta S$  değeri üzerinde bir etkisi yoktur. Dolayısı ile yukarıdaki denklemin elde edilişi iki basamak düşünülerek yazılmıştır.

$$P_1, T_1 \xrightarrow[P_1 = \text{sabit}]{1. \text{basamak}} P_1, T_2 \xrightarrow[T_2 = \text{sabit}]{2. \text{basamak}} P_2, T_2$$

Termodinamiğin 2. yasasının genel ifadesi  $\Delta S_{\text{toplam}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{çevre}} > 0$ 'dır. Sürekli bir hal değişimi için  $\Delta S_{\text{sistem}} = 0$  olur.

$$S_2 + S_3 - S_1 > 0 \quad [3.11]$$

veya

$$\Delta S_{Toplam} = \Delta S_{Soğuk akım} + \Delta S_{Sıcak akım} > 0 \quad [3.12]$$

Giren ve çıkan akımların sıcaklık ve basınçları dikkate alınarak molar birimler cinsinden

$$\Delta S_{Toplam} = \dot{n}_2 \left( \tilde{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \right) + \left( \dot{n}_3 \tilde{c}_p \ln \frac{T_3}{T_1} - \dot{n}_3 R \ln \frac{P_3}{P_1} \right) > 0 \quad [3.13]$$

olmalıdır. Kütleli birimler kullanılarak ise

$$\Delta S_{Toplam} = \dot{m}_2 \left( c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R' \ln \frac{P_2}{P_1} \right) + \dot{m}_3 \left( c_p \ln \frac{T_3}{T_1} - R' \ln \frac{P_3}{P_1} \right) > 0 \quad [3.14]$$

şeklinde ifade edilebilir.

Vorteks tüpün kullanımında genellikle esas amaç soğuk akım elde etmektir. Soğuk akımın istenen sıcaklığını sağlamak için giriş basıncının en az ne olması gerektiği hesaplanabilir.

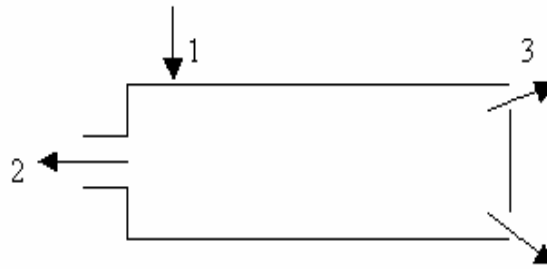
Buradaki çalışma ile ilgili örnek bir hesaplama Ek-2'de verilmiştir.

### 3.3.3. Termodinamik analizin pratik sonucu

Vorteks tüpler genellikle soğutma işlemlerinde kullanılmaktadır. Soğuk akım için istenen sıcaklığı elde etmek için giriş basıncının en az ne olması gerektiği hesaplanabilir. Buna ilave olarak çıkan iki akımın yani sıcak ve soğuk akımların istenilen sıcaklıklarına bağlı olarak giriş basıncı olan  $P_1$ 'in ne olması gerektiği de hesaplanabilir.

### 3.3.4. $T_1/T_2$ cinsinden $P_1/P_2$ ifadesinin geliştirilmesi

Termodinamiğin 2. yasasından yararlanılarak soğuk akımın sıcaklığının, giriş basıncından nasıl etkilendiği incelenmiştir. Çözümü esas alınan sistemin genel görünüşü ise Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Sistemin genel görünüşü

Eş. 3.13’de  $P_2 \approx P_3$  olarak kabul edilmiş ve yeniden düzenlenerek

$$\Delta S_{\text{Toplam}} = \dot{n}_2 \tilde{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} + \dot{n}_3 \tilde{c}_p \ln \frac{T_3}{T_1} - \left( \dot{n}_2 + \dot{n}_3 \right) R \ln \frac{P_2}{P_1} > 0 \quad [3.15]$$

Eş. 3.15 yazılmıştır. Eş. 3.15’de  $\dot{n}_2 + \dot{n}_3$  görüldüğü yere  $\dot{n}_1$  olarak yazılırsa,

$$-\dot{n}_1 R \ln \frac{P_2}{P_1} > - \left( \dot{n}_2 \tilde{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} + \dot{n}_3 \tilde{c}_p \ln \frac{T_3}{T_1} \right) \quad [3.16]$$

$$+\dot{n}_1 R \ln \frac{P_1}{P_2} > \dot{n}_2 \tilde{c}_p \ln \frac{T_1}{T_2} + \dot{n}_3 \tilde{c}_p \ln \frac{T_1}{T_3} \quad [3.17]$$

elde edilir. Eş. 3.17’nin her iki tarafı  $\dot{n}_1$  ile bölünmüş ve Eş. 3.18 oluşturulmuştur.

$$\frac{R}{\tilde{c}_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \frac{\dot{n}_2}{\dot{n}_1} \ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{\dot{n}_3}{\dot{n}_1} \ln \frac{T_1}{T_3} \quad [3.18]$$

Kütlesel debiler oranı,

$$\xi = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \text{ ve } (1-\xi) = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} \quad [3.19]$$

olarak tanımlanmıştır. Molar büyüklükler cinsinden  $\xi$  ve  $1-\xi$  Eş. 3.20 şeklinde yazılmıştır.

$$\xi = \frac{\dot{n}_2}{\dot{n}_1} \text{ ve } (1-\xi) = \frac{\dot{n}_3}{\dot{n}_1} \quad [3.20]$$

Eş. 3.18, Eş. 3.20 ile kullanılarak Eş. 3.21

$$\frac{R}{\tilde{c}_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \xi \ln \frac{T_1}{T_2} + (1-\xi) \ln \frac{T_1}{T_3} \quad [3.21]$$

elde edilmiştir. Eş. 3.9 molar büyüklükler cinsinden yazılırsa,

$$\dot{n}_1 T_1 = \dot{n}_2 T_2 + \dot{n}_3 T_3 \quad [3.22]$$

olur. Eş. 3.22'den sıcak çıkıştaki sıcaklık olan  $T_3$ , Eş. 3.23'de ki gibi yazılmıştır.

$$T_3 = \frac{\dot{n}_1 T_1 - \dot{n}_2 T_2}{\dot{n}_3} = \frac{T_1 - \frac{\dot{n}_2}{\dot{n}_1} T_2}{\frac{\dot{n}_3}{\dot{n}_1}} \quad [3.23]$$

Eş. 3.20 kullanılmış,

$$T_3 = \frac{(T_1 - \xi T_2)}{(1 - \xi)} \quad [3.24]$$

elde edilmiştir. Eş. 3.18 ile Eş. 3.24 birleştirilmiş

$$\frac{R}{\tilde{c}_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \xi \ln \frac{T_1}{T_2} + (1 - \xi) \ln \frac{T_1}{(T_1 - \xi T_2)/(1 - \xi)} \quad [3.25]$$

Eş. 3.25 yazılmıştır. Bu ifadelerin tekrar düzenlenmesiyle de Eş. 3.26 elde edilmiştir.

$$\frac{R}{\tilde{c}_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \xi \ln \frac{T_1}{T_2} + (1 - \xi) \ln \frac{(T_1 / T_2)(1 - \xi)}{(T_1 / T_2) - \xi} \quad [3.26]$$

Eş. 3.26'dan, vorteks tüpe girişteki basıncın soğuk çıkış tarafındaki basınç oranı ile değişimi Eş. 3.27 şeklindeki gibi yazılabilir.

$$\left( \frac{P_1}{P_2} \right) > \left\{ \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^\xi \left[ \frac{(T_1 / T_2)(1 - \xi)}{(T_1 / T_2) - \xi} \right]^{(1 - \xi)} \right\}^{\frac{\tilde{c}_p}{R}} \quad [3.27]$$

$T_1$  giriş sıcaklığıdır ve genellikle ortam sıcaklığına yakındır ve bilinir. Termodinamiğin 2. yasasından başlayarak geliştirilen yukarıdaki ifade, belirli bir  $\xi$  değeri için istenilen soğuk akım sıcaklığı olan  $T_2$ 'ye ulaşmak için  $P_1/P_2$ 'nin ne olması gerektiğini vermektedir. Bu çalışmada, soğuk akımın istenilen sıcaklığını

elde etmek için giriş basıncının en az ne olması gerektiği yönünde ifadeler geliştirilmiştir.

Buradaki çalışma ile ilgili örnek bir hesaplama Ek-3'de verilmiştir.

### 3.3.5. $T_3/T_2$ cinsinden $P_1/P_2$ ifadesinin geliştirilmesi

Termodinamiğin 2. yasasından yararlanılarak sıcak çıkış akımının sıcaklığının, giriş basıncından nasıl etkilendiği bu bölümde incelenmiştir.

Eş. 3.21 yazılmış ve yeniden düzenlenerek Eş. 3.30 elde edilmiştir.

$$\frac{R}{c_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \xi \ln \frac{T_1}{T_2} + (1 - \xi) \ln \frac{T_1}{T_3} \quad [3.21]$$

$$\frac{R}{c_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \xi \ln T_1 - \xi \ln T_2 + (1 - \xi) \ln T_1 - (1 - \xi) \ln T_3 \quad [3.28]$$

$$\frac{R}{c_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \xi \ln T_1 - \xi \ln T_2 + \ln T_1 - \xi \ln T_1 - \ln T_3 + \xi \ln T_3 \quad [3.29]$$

$$\frac{R}{c_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > -\xi \ln T_2 + \ln T_1 - \ln T_3 + \xi \ln T_3 \quad [3.30]$$

Eş. 3.30'da gerekli olan işlemler yapılmış ve Eş. 3.31 oluşturulmuştur.

$$\frac{R}{c_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \ln \frac{T_1}{T_3} + \xi \ln \frac{T_3}{T_2} \quad [3.31]$$

elde edilir. Eş. 3.22 yazılmış ve Eş. 3.20 ile işlem yapılarak Eş. 3.33 elde edilmiştir.

$$\dot{n}_1 T_1 = \dot{n}_2 T_2 + \dot{n}_3 T_3 \quad [3.22]$$

$$T_1 = \frac{\dot{n}_2}{\dot{n}_1} T_2 + \frac{\dot{n}_3}{\dot{n}_1} T_3 \quad [3.32]$$

$$T_1 = \xi T_2 + (1-\xi) T_3 \quad [3.33]$$

Eş. 3.31 ve Eş. 3.33 birleştirilmiş ve Eş. 3.38 elde edilmiştir.

$$\frac{R}{\tilde{c}_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \ln \frac{\xi T_2 + (1-\xi) T_3}{T_3} + \xi \ln \frac{T_3}{T_2} \quad [3.34]$$

$$\frac{R}{\tilde{c}_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \ln \left[ \xi \frac{T_2}{T_3} + (1-\xi) \right] + \xi \ln \frac{T_3}{T_2} \quad [3.35]$$

$$\ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{R}{\tilde{c}_p}} > \ln \left\{ \left[ \xi \frac{T_2}{T_3} + (1-\xi) \right] \left( \frac{T_3}{T_2} \right)^\xi \right\} \quad [3.36]$$

$$\frac{P_1}{P_2} > \left\{ \left( \frac{T_3}{T_2} \right)^\xi \left[ (1-\xi) + \xi \left( \frac{T_2}{T_3} \right) \right] \right\}^{\frac{\tilde{c}_p}{R}} \quad [3.37]$$

veya

$$\frac{P_1}{P_2} > \left\{ \left( \frac{T_3}{T_2} \right)^\xi \left[ 1 + \xi \left( \frac{T_2}{T_3} - 1 \right) \right] \right\}^{\frac{\tilde{c}_p}{R}} \quad [3.38]$$

Eş. 3.36 veya Eş. 3.37 yerine benzer başka bir ifade de geliştirilebilir. Eş. 3.35'den başlayarak

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{R}{\tilde{c}_p}} > \left\{ \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^\xi \left[ (1-\xi) + \xi \left(\frac{T_2}{T_3}\right) \right] \right\} \quad [3.39]$$

Sağ taraf  $\frac{T_3/T_2}{T_3/T_2}$  ile çarpılmış,

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{R}{\tilde{c}_p}} > \frac{\left(\frac{T_3}{T_2}\right)^\xi}{\frac{T_3}{T_2}} \left[ \frac{T_3}{T_2} (1-\xi) + \xi \right] \quad [3.40]$$

Sağ taraftaki köşeli parantezin içine +1, -1 eklenmiş,

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{R}{\tilde{c}_p}} > \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{-(1-\xi)} \left[ \frac{T_3}{T_2} (1-\xi) - (1-\xi) + 1 \right] \quad [3.41]$$

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{R}{\tilde{c}_p}} > \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{-(1-\xi)} \left[ 1 + (1-\xi) \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right) \right] \quad [3.42]$$

$$\frac{P_1}{P_2} > \left\{ \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{-(1-\xi)} \left[ 1 + (1-\xi) \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right) \right] \right\}^{\frac{\tilde{c}_p}{R}} \quad [3.43]$$

Eş. 3.36 ve Eş. 3.37 eşdeğer ifadelerdir. Sadece  $T_3 > T_2$  olduğundan ve dolayısı ile  $T_3/T_2 > 1$  olacağından, matematiksel hesaplama Eş. 3.43 ile daha kolay olabilir. Burada çıkartılan Eş. 3.43'nin benzeri (25) nolu kaynakta verilmiştir. Bu kaynakta ara işlemler yoktur. Eş. 3.27 orjinal bir denklemdir. Literatürde yoktur.

### 3.4. Vorteks Tüplerde Ekserji Analizi

Kullanılabilirlik terimi ABD’de 1940’lı yıllarda MIT Mühendislik Fakültesinde ortaya atılmış ve bilim çevrelerinde benimsenmiştir. Bugün, 1950’li yıllarda Avrupa’da önerilen ve aynı anlamı ifade eden ekserji terimidir.

Bir sistemden elde edilecek en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimiyle çevrenin bulunduğu hale (ölü hale) getirilirse elde edilir. Bu değer, sistemin verilen başlangıç halinde, yararlı iş potansiyeline veya iş yapma olanağını göstermektedir ve kullanılabilirlik diye adlandırılır.

Bir sistemden elde edilen işin tümünden amaçlarımız doğrultusunda yararlanamayabiliriz. Örnek olarak bir piston-silindir düzeneğinde genişleyen gaz ele alınırsa, yapılan işin bir bölümü pistonun önündeki havayı itip, yolunu açmak için kullanılmaktadır. Bu iş çevre basıncı  $P_o$ ’ın, sistemin hacim değişikliği olan  $V_2-V_1$  çarpılması sonucu bulunur, geri kazanılması veya başka herhangi bir amaçla kullanılması olanaksızdır.

$$W_{\text{çevre}} = P_o(V_2 - V_1) = mP_o(v_2 - v_1) \quad [3.44]$$

Gerçek iş  $W$  ile çevre işi  $W_{\text{çevre}}$  arasındaki fark, gerçek yararlı iş veya sadece yararlı iş diye tanımlanır.  $W_y$  ile gösterilir.

$$W_y = W - W_{\text{çevre}} \quad [3.45]$$

Bir sistem genişlerken ve iş yaparken, yapılan işin bir bölümü atmosfer basıncını alt etmek için kullanılır, böylece  $W_{\text{çevre}}$  sistem açısından bir kayıp iş olur. Buna karşın bir sistem sıkıştırıldığında, atmosfer basıncı sıkıştırılma işlemine yardım eder, böylece  $W_{\text{çevre}}$  sistem açısından bir kazanç olur. Tersinir iş belirli iki hal arasındaki hal değişimi sırasında bir sistemden elde edilebilecek en çok yararlı iş diye tanımlanır ve  $W_{\text{tr}}$  ile gösterilir. Bu iş ilk ve son haller arasında hal değişimi tümünden

tersinir olarak gerçekleştiği zaman elde edilir. Başka bir deyişle, sistemle evre arasındaki ısı geçişinin tersinir olarak gerçekleştiği, ayrıca sistem içinde tersinmezliklerin olmadığı bir hal değişimi söz konusudur. Son hal l hal olduğu zaman, tersinir iş kullanılabilirliğe eşittir. İş gerektiren hal değişimleri için tersinir iş, hal değişimini gerçekleştirmek için gerekli en az işi gösterir.

Tersinir iş  $W_{tr}$  ile yararlı iş  $W_y$  arasındaki fark, hal değişimi sırasındaki tersinmezliklerden kaynaklanır ve  $I$  ile gösterilir.

$$I = W_{tr} - W_y, (kJ) \quad [3.46]$$

$$i = w_{tr} - w_y, (kJ/kg) \quad [3.47]$$

Bir hal değişimi sırası ile birim zamanda oluşan tersinmezlik hızı,  $\dot{I}$  ile gösterilir.

$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} - \dot{W}_y, (kW) \quad [3.48]$$

Tümden tersinir bir hal değişimi için gerçek ve tersinir iş terimleri aynıdır, böylece tersinmezlik sıfırdır. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü tümden tersinir bir hal değişimi sırasında tersinmezliklerin bir ls olan entropi üretimi olmaz. Tüm gerçek hal değişimleri sırasında tersinmezlik sıfırdan büyük (artı) bir değerdir. Çünkü iş yapan makinalar için iş terimi artıdır ve  $W_{tr} > W_y$  olur. İş gerektiren makinalar için ise iş terimi eksidir ve  $|W_{tr}| < |W_y|$  olur (26).

Süreçlerin ekserji analizinin temelini oluşturan yaklaşım, ısı, entalpi gibi değişik enerji türlerinin biri faydalı, diğeri faydasız iki değişik kısmı olduğundan kabul edilmelidir.

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji}$$

Herhangi bir enerji türünün (ısı, entalpi, vb) ne kadarının işe yarayan ekserji olduğunun belirlenmesi için, ekserjinin tanımlanması gereklidir. Ekserjinin ilk tanımı Baehr tarafından yapılmıştır.

“Ekserji, enerjinin diğer enerji türlerine dönüştürülebilen kısmıdır”.

Enerjinin bu tanımı nitel olup, nicel hesaplarda kullanılamaz. Daha ayrıntılı ve nicel hesaplamalar için kullanılabilecek bir tanım ise Bosnjakovic tarafından yapılmıştır.

Ekserji, tersinir bir süreç sonunda çevre ile denge sağlandığı takdirde kuramsal olarak elde edilebilecek maksimum iş miktarıdır. Bosnjakovic'in tanımına uygun olarak ekserjinin hesaplanabilmesi için;

- Çevrenin sıcaklık, basınç ve kimyasal kompozisyonunun kesinlikle belirtilmesi,
- Tersinir bir sürecin var olduğunun kabul edilmesi gereklidir.

Diğer tüm termodinamik analizler gibi, ekserji analizi için de tersinir sürecin nasıl olduğunun bilinmesi gerekli değildir. Sadece sürecin başlangıç-giriş noktaları ile bitiş-çıkış noktaları için geçerli olan koşulların bilinmesi yeterlidir (27).

Vorteks tüpü için ekserji denkliği:

$$E_{gir} - E_{çkş} - E_k = \Delta E \quad [3.49]$$

Ekserji kaybı, Eş. 3.50 ile verilmiştir.

$$E_k = \dot{m}_{gir} e_{gir} - \sum \dot{m}_{çkş} e_{çkş} \quad [3.50]$$

Vorteks tüpü için tersinmezlik hızı İ Eş. 3.51, 2. yasa verimi ise Eş. 3.52, Eş. 3.54-3.56’da verilmiştir.

$$\dot{I} = \dot{m}_{gir} * e_k \quad [3.51]$$

$$\eta_{II} = \frac{\sum \dot{m}_{\check{c}k\check{s}} e_{\check{c}k\check{s}}}{\sum \dot{m}_{gir} e_{gir}} \quad [3.52]$$

$$\sum \dot{m}_{\check{c}k\check{s}} e_{\check{c}k\check{s}} = \dot{m}_{gir} e_{gir} - E_k \quad [3.53]$$

$$\eta_{II} = \frac{\sum \dot{m}_{gir} e_{gir} - E_k}{\sum \dot{m}_{gir} e_{gir}} \quad [3.54]$$

$$\eta_{II} = \frac{\sum \dot{m}_{gir} e_{gir} - T_o \Delta S_{Toplam}}{\sum \dot{m}_{gir} e_{gir}} \quad [3.55]$$

$$\eta_{II} = 1 - \frac{T_o \Delta S_{Toplam}}{\dot{m}_{gir} e_{gir}} \quad [3.56]$$

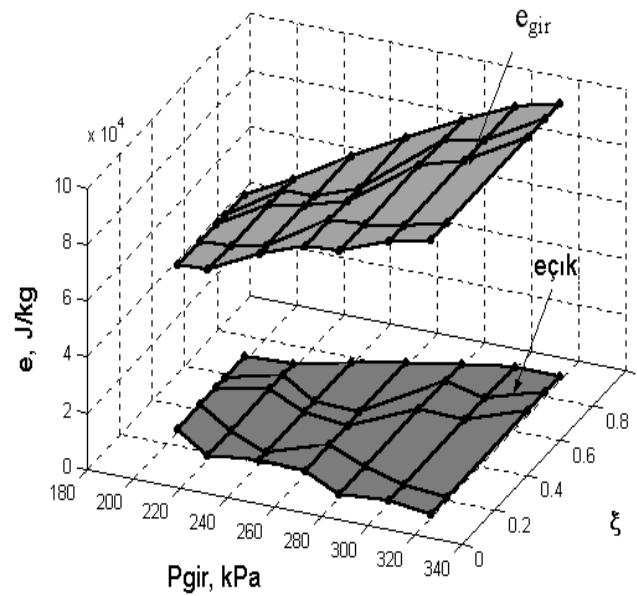
Buradaki çalışma ile ilgili örnek bir hesaplama Ek-4’de verilmiştir.

#### 3.4.1. Dört nozullu vorteks tüpün ekserji analizi

Hava girişinin 4 nozul ile sağlandığı, uzunluğun çapa oranının 15 olduğu ve 6 mm çapında olan hareketli vidanın sıcak çıkış konumunda bırakıldığı deneysel çalışmalarda akışkan olarak hava kullanılmıştır. Vorteks tüpe girişteki basınç 200 kPa’dan başlayarak 20 kPa aralıklarla 320 kPa’a kadar yükseltilerek deneyler

yapılmıştır. Bu çalışmanın deneysel verileri kullanılarak ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan ekserji analizi ile sistemdeki kayıp iş ve verim hesaplanmıştır.

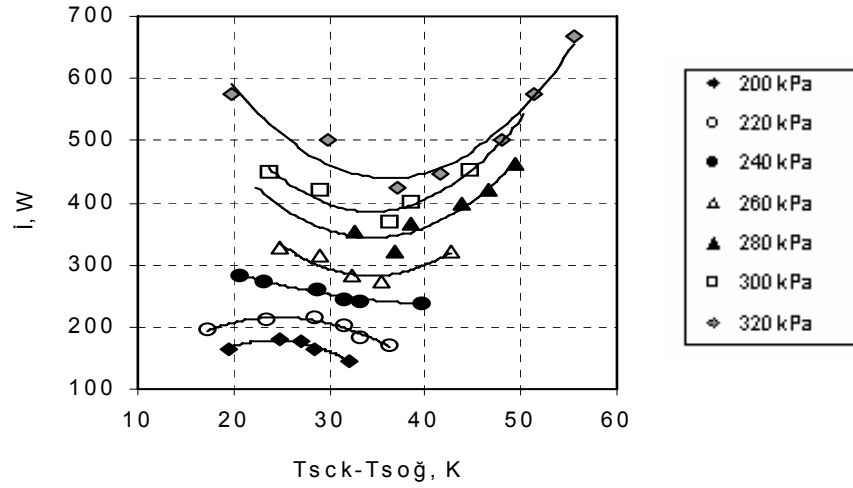
Vorteks tüpe girişteki basıncın yükselmesi kütle debisinin de artmasına neden olmuştur. Girişteki akışkanın sıcaklığı olan  $T_{gir}$  301 ile 304 K arasında değişirken, girişteki basıncın yükselmesiyle Şekil 3.4'den de görüldüğü gibi  $e_{gir}$ 'de artmıştır. Vorteks tüpe girişteki sıcaklık 301 ile 304 K arasında ki değerlerde olmasına rağmen sıcak çıkış tarafında ki sıcaklık 308 K'den 350 K'e kadar artış göstermiştir. Sıcak çıkış tarafındaki sıcaklık artarken sıcak çıkış tarafındaki ekserji de artmıştır. Soğuk çıkış tarafındaki sıcaklık 280 ile 295 K arasında değişmiş ve girişteki basınç yükselirken  $e_{soğ}$ ' da yükselmiştir. Aynı basınçta ki değişik  $\xi$  değerlerinde de  $e_{soğ}$  ve  $e_{sck}$ 'da artış göstermiştir.



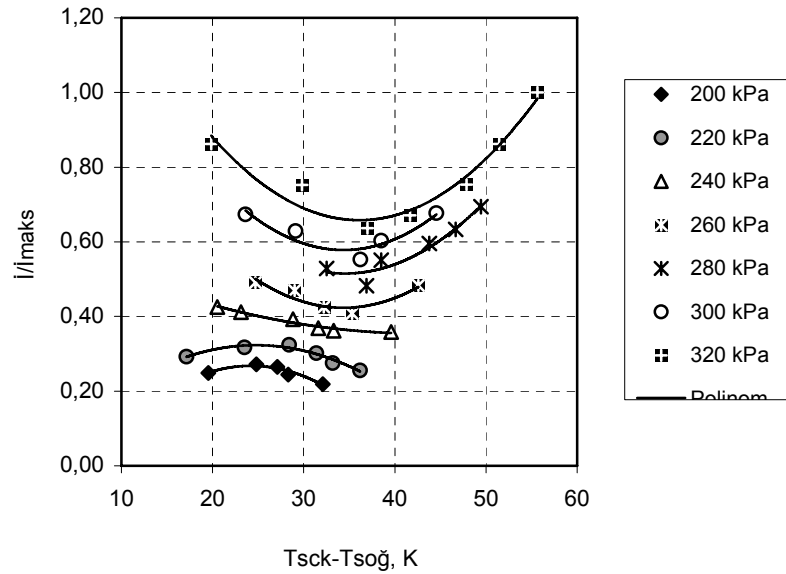
Şekil 3.4.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $e_{gir}$  ve  $e_{cik}$ 'in  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de

Vorteks tüpe girişteki basıncın artırılması ile nozullardaki hız da artmıştır. Basınç yükselirken sıcak ve soğuk akışın kütleli debileri de artmıştır. Sıcak akışkanın kütleli debisi ve soğuk akışın kütleli debileri basınçla beraber yükseldikçe  $\Delta T = T_{sck} - T_{sgk}$ 'de yükselmiştir.  $\xi$  yani soğuk akışın kütle debisinin girişteki akışın kütle debisine oranı önceleri az iken vorteks tüpe girişteki basınç artırıldıkça bu oran

da artmıştır. Bu da tersinmezlik hızı olan  $\dot{I}$ 'yi etkilemiştir (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6). Vorteks tüpe girişteki basıncın aynı kalmasına karşılık  $\xi$ 'nin değişik oranlarında tersinmezlik hızı farklı olmuştur.



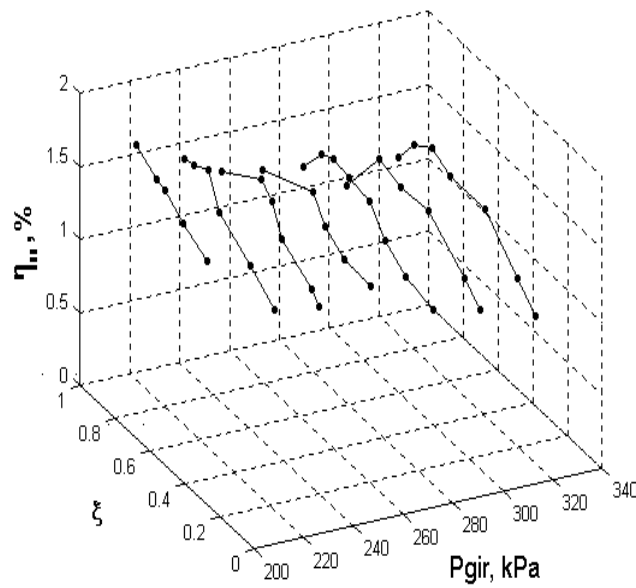
Şekil 3.5.  $\dot{I}$ 'nin  $T_{sck}-T_{soğ}$  ile değişimi;  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=6$  mm; hareketli vida konumu= $L$ 'de



Şekil 3.6.  $\dot{I}/\dot{I}_{maks}$ 'ın  $T_{sck}-T_{soğ}$  ile değişimi;  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=6$  mm; hareketli vida konumu= $L$ 'de

Vorteks tüpe girişteki basıncın artmasıyla  $e_{gir}$ 'de sürekli artış göstermiş buna karşılık  $\dot{I}$ 'nin daha az oranda artış gösterdiği deneysel sonuçlar dikkate alınarak yapılan

hesaplamalar neticesinde tespit edilmiştir. Buda, ekserji veriminin vorteks tüpe giriş basıncı olan  $P_{gir}$ 'in düşük değerlerinde daha fazla,  $P_{gir}$ 'in artan değerlerinde ise daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi 2. yasa verimi, vorteks tüplerde çok düşük değerler almaktadır. Bunun nedeni vorteks tüplerde gerçekleşen süreçlerin tersinmez oluşundandır. Ancak vorteks tüplerde amaç, faydalı iş enerjisinden (sıkıştırılmış akışkanın enerjisinden) faydalanılarak noktasal olarak ısıtma veya soğutma yapmaktır.

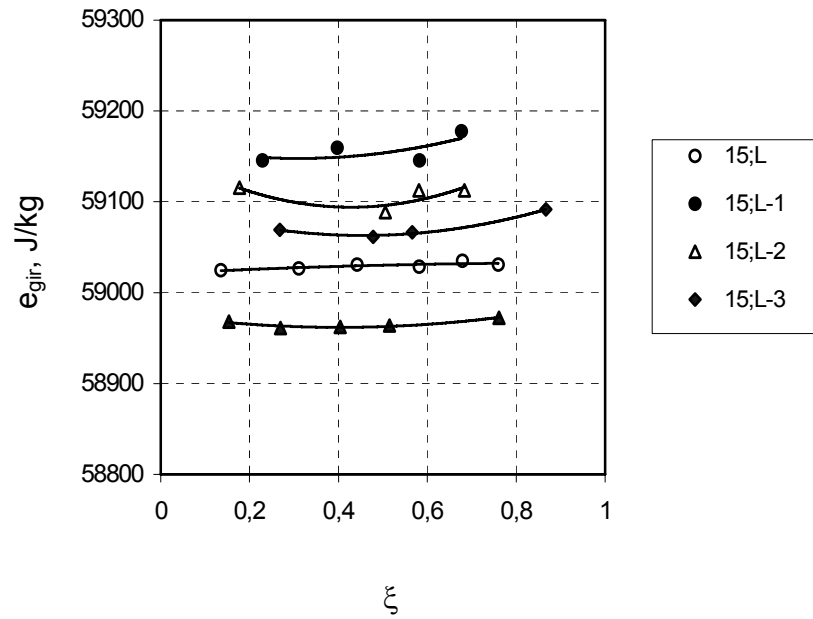


Şekil 3.7.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde ikinci yasa veriminin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de

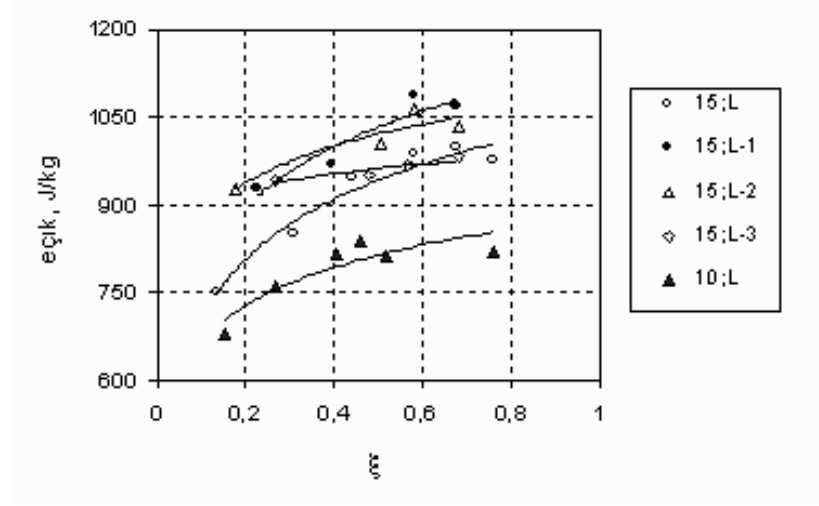
### 3.4.2. Altı nozullu vorteks tüpün ekserji analizi

İç çapı 9 mm, uzunluğunun çapa oranı 10, 15 olan iki tane Ranque-Hilsch vorteks tüpü ve 6 mm çapında olan hareketli vida sıcak çıkış konumunda bırakılarak, en iyi performans gösteren vorteks tüp geometrisi deneysel olarak tespit edilmiştir. En iyi performans gösteren geometrik yapıdaki vorteks tüpte, hareketli vida sıcak çıkıştan itibaren 1'er cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettirilmiştir. Vorteks tüplere hava girişi 6 nozul ile verilmiş ve deneysel çalışmalarda akışkan olarak hava kullanılmıştır. Vorteks tüpe girişteki basınç 200 kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla 320 kPa'a kadar yükseltilerek deneyler yapılmıştır. Bu çalışmanın

deneysel verileri kullanılarak ekserji analizi yapılmıştır. Ekserji analizinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda en fazla giren ekserji, en fazla çıkan ekserji, kayıp ekserji ve ikinci yasa verimi hesaplanmıştır. Deneysel çalışmanın yapılmış olduğu tüm geometrik yapıdaki vorteks tüplerde, giriş basıncının artmasıyla girişteki ekserjide sürekli artış göstermiştir. Aynı basınç'ta, tüm geometrik yapıdaki vorteks tüplerin giriş ve çıkış ekserjileri birbiri ile mukayese edildiğinde, en fazla giren ve en fazla çıkan ekserjinin, hareketli vidanın sıcak çıkıştan 1 cm içerde ve vorteks tüp uzunluğunun çapına oranının 15 olduğu geometrik yapıdaki vorteks tüpde oluşmuştur (Şekil 3.8-3.9).

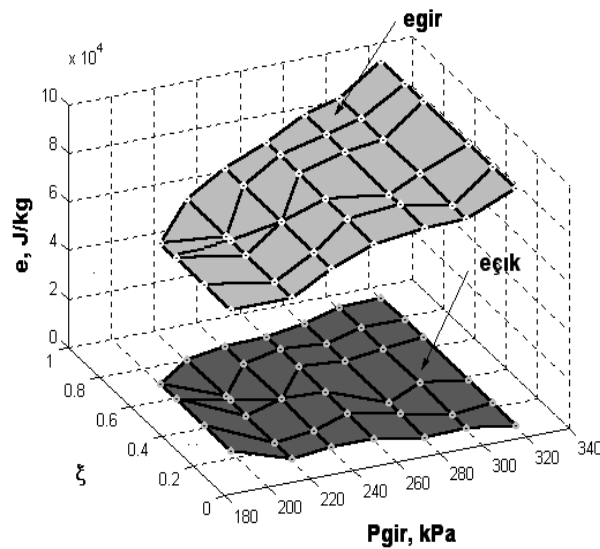


Şekil 3.8.  $e_{gir}$ 'nin  $\xi$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu=L, L-1, L-2, L-3 ve  $L/D=10$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu=L'de;  $P_{gir}=200\text{ kPa}$



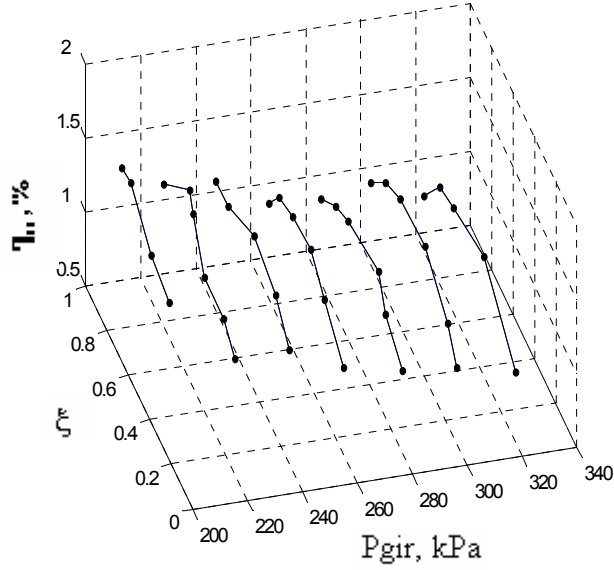
Şekil 3.9.  $e_{\text{çık}}$ 'nin  $\xi$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu= $L$ ,  $L-1$ ,  $L-2$ ,  $L-3$  ve  $L/D=10$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de;  $P_{\text{gir}}=200\text{ kPa}$

Şekil 3.10'da, hareketli vidanın sıcak çıkıştan 1 cm içerde ve vorteks tüp uzunluğunun çapa oranının 15 olduğu geometrik yapıdaki vorteks tüpdeki,  $e_{\text{gir}}$  ve  $e_{\text{çık}}$  verilmiştir. Basıncın yükselmesi ile  $e_{\text{gir}}$  sürekli artış göstermiştir. Buna karşılık  $e_{\text{çık}}$ ,  $e_{\text{gir}}$ 'e göre çok düşük değerlerde kalmıştır. Bu durum 2. yasa verimini etkilemiştir.



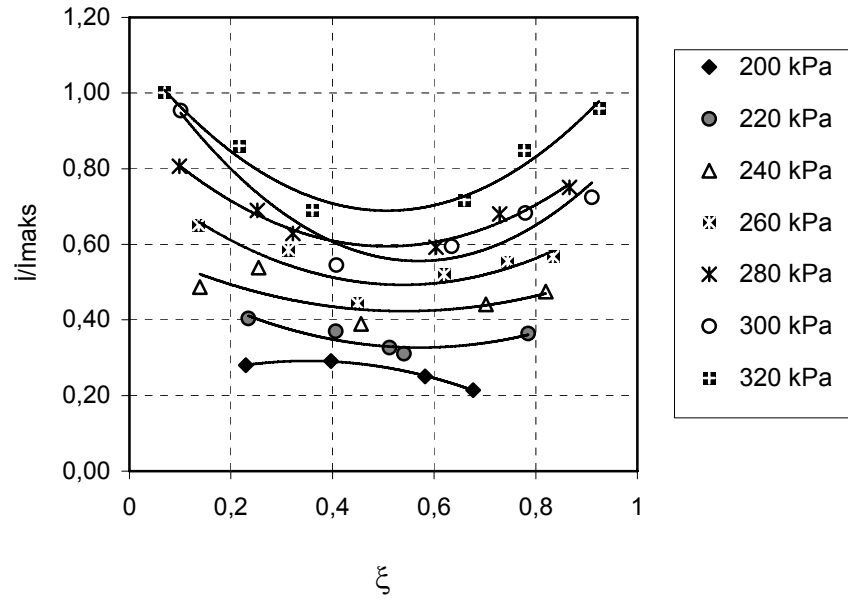
Şekil 3.10.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $e_{\text{gir}}$  ve  $e_{\text{çık}}$ 'ın  $P_{\text{gir}}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu= $L-1$ 'de

2. yasa veriminin çok düşük değerler almasının nedeni, vorteks tüplerde gerçekleşen süreçlerin tersinmez olmasıdır (Şekil 3.11). Vorteks tüplerde, faydalı iş enerjisinden (sıkıştırılmış akışkanın enerjisinden) yararlanılarak noktasal olarak ısıtma veya soğutma yapılmaktadır.

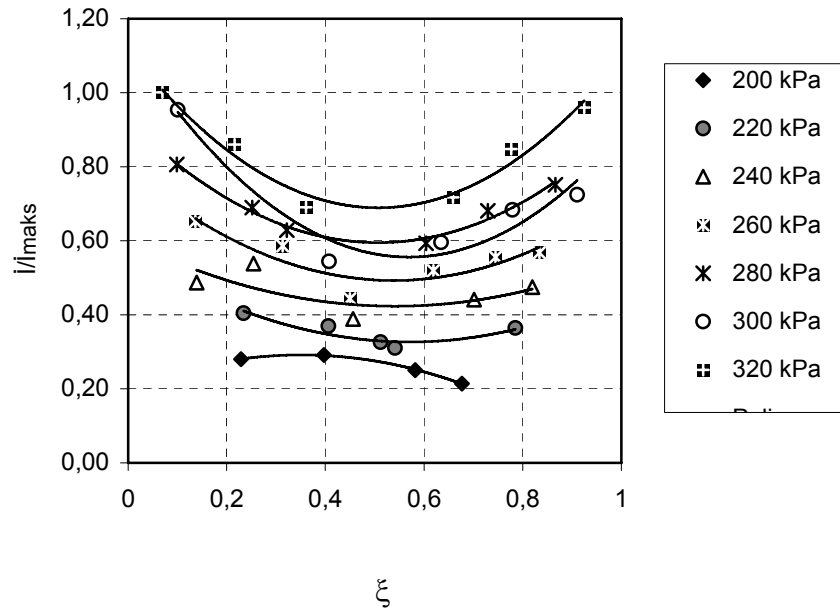


Şekil 3.11.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde ikinci yasa veriminin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu= $L-1$ 'de

Şekil 3.12'de tersinmezlik hızı olan  $\dot{I}$ 'nin  $\xi$  ile değişimi ve Şekil 3.13'de ise  $\dot{I}/\dot{I}_{maks}$ 'ın  $\xi$  ile değişimi verilmiştir. Tersinmezlik hızı,  $P_{gir}$ 'in yükselmesi ile artmıştır. Fakat aynı basınçta  $\xi$  artarken, önceleri düşme göstermiş sonra yükselmiştir.



Şekil 3.12.  $I$ 'nin  $\xi$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu= $L-1$ 'de



Şekil 3.13.  $I/I_{maks}$ 'ın  $\xi$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu= $L-1$ 'de

## 4. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Problemin sayısal çözümü, PHOENICS sayısal akışkanlar dinamiği (SAD) paket programı kullanılarak yapılmıştır. Problem PHOENICS'te, çözülürken değişik başlıklar altında incelenmiştir. Bunlar; sıcak taraf açık soğuk taraf kapalı laminar akış, sıcak ve soğuk taraf açık laminar akış, sıcak taraf açık soğuk taraf kapalı sıkıştırılabilir laminar akış, sıcak ve soğuk taraf açık sıkıştırılabilir laminar akış, sıcak taraf açık soğuk taraf kapalı sıkıştırılabilir türbülanslı akış, sıcak taraf ve soğuk taraf açık sıkıştırılabilir türbülanslı akıştır.

### 4.1. PHOENICS Paket Programı

PHOENICS, ısı ve kütle transferi, akışkanlar mekaniği, kimyasal reaksiyon ve bunun gibi olayların simülasyonunu yapan, süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini sayısal olarak çözmek için tasarlanmış genel amaçla bir bilgisayar programıdır. Denklemleri çözerken SIMPLER algoritmasını kullanır.

#### 4.1.1. Diskritizasyon

PHOENICS paket programı lineer olmayan kısmi diferansiyel denklem setlerinin çözümüne iteratif sayısal yaklaşımlar getirir. Diferansiyel denklemlerin diskritize edilmesinde sonlu hacim metodunu kullanır. Bu metot uygulanırken problem alanı çok küçük kontrol hacimlerine bölünür ve denklem bu kontrol hacimlerinde integre edilir.

#### Diskritizasyonda kullanılan grid sistemi

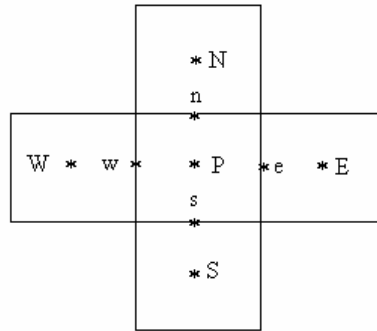
Problemin diferansiyel denklemlerini sayısal olarak çözebilmek için ilk yapılması gereken işlem, hesap alanını kontrol hacimlerine bölerek bir grid (kafes) sistemi oluşturmaktır. Teorik olarak problem alanının içersindeki her noktada, diferansiyel denklemler cebirsel olarak ifade edilebilir. Bu ise sonsuz sayıda denklem demektir. Bu kadar fazla cebirsel denklemi çözmek mümkün olmadığından, diferansiyel

denklemler, problem alanı içerisinde belirli sayıda noktada cebirsel olarak ifade edilir. Bu noktalara grid noktası ve bu noktaların oluşturduğu sisteme de grid sistemi adı verilmektedir. Problem alanı içerisinde, diferansiyel denklemlerin belli sayıda noktada diskritize edilmesiyle elde edilen cebirsel denklemler çözülerek, bağımlı değişkenlerin değerleri sadece bu noktalar için bulunur. Sonuçların hassasiyeti için uygun grid sayısının belirlemek gerekir. Bu da ancak sayısal denemeler ile mümkün olmaktadır.

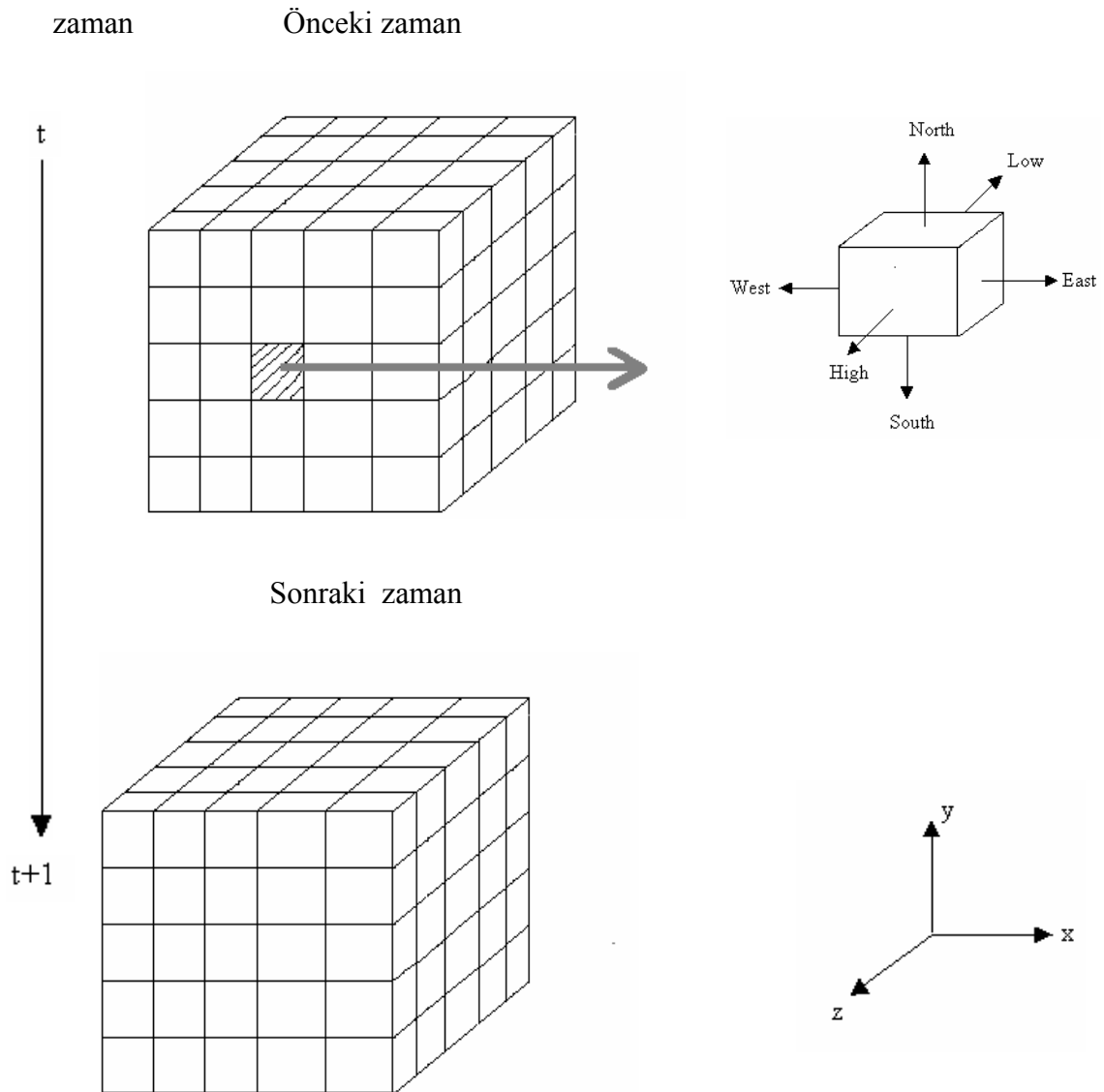
#### Hücre tanımlanması

Sayısal problemlerin çözümünde kullanılan bilgisayar programları, kısmi diferansiyel denklemlerini doğrudan çözmezler. Sayısal akışkanlar dinamiği ile kısmi diferansiyel denklemler diskritize edilerek lineer cebirsel denklemlere dönüştürülür. Bu denklemler bilgisayar programı yardımıyla çözülerek sonuca gidilir. Lineer cebirsel denklemlerin oluşturulmasında birçok yöntem vardır. Bunlar, sonlu farklar (finite difference), sonlu hacimler (finite volume), sonlu elemanlar (finite element) vb. Kullandığımız PHOENICS bilgisayar programında sonlu hacimler metodu kullanılmaktadır.

Şekil 4.1’de tek bir hücre, dört komşu ile birlikte görülmektedir. PHOENICS’te kullanılan koordinat sistemi ve hücre yapısı ise Şekil 4.2’de verilmiştir. Sıcaklık, basınç ve yoğunluklar P, N, S, E, W hücre merkezlerinde, hızlar ise w, e, s, n hücre duvarlarında hesaplanır.



Şekil 4.1. Komşu hücreler ve tek hücre (28)



Şekil 4.2. Koordinat sistemi ve hücre yapısı (28)

Akışkanlar mekaniğine uygulanması

PHOENICS, kütle, momentum ve enerji denklemleriyle ilgili, bir, iki, üç boyutlu geometriler, sürekli ve süreksiz problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan programlardan biridir. Sıkça karşılaşılan bu tür problemler kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilirler. Korunum yasalarının genel ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_i \rho_i \phi_i) + \text{div}(r_i \rho_i \vec{V} \phi_i - r_i \Gamma_{\phi_i} \text{grad } \phi_i) = r_i S_{\phi_i} \quad [4.1]$$

$\downarrow$   
 zamana  
bağlı terim

$\downarrow$   
 konveksiyon  
terimi

$\downarrow$   
 difüzyon  
terimi

$\downarrow$   
 kaynak  
terimi

Burada,

|              |                                                              |
|--------------|--------------------------------------------------------------|
| t            | zaman,                                                       |
| $r_i$        | i fazının hacimsel kesri,                                    |
| $\rho_i$     | i fazının yoğunluğu,                                         |
| $\phi_i$     | i fazının entalpi, birim kütle başına momentum, vb özelliği, |
| $V_i$        | i fazının hız vektörü,                                       |
| $\Gamma_i$   | i fazındaki $\phi$ 'nin değişim katsayısı,                   |
| $S_{\phi_i}$ | $\phi_i$ 'nin kaynak oranı                                   |

olarak ifade edilmektedir.

i fazı için kütle korunumu şu şekilde ifade edilir,

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_i \rho_i) + \text{div}(r_i \rho_i \vec{V}_i) = r_i S_i \quad [4.2]$$

$S_i$  birim kütle başına faza giren kütledir.

Tek fazlı durumda hacimsel kesir sadeleşirse Eş. 4.1, Eş. 4.3 gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\phi\vec{V}) - \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) = S \quad [4.3]$$

ve kütle korunumu ise,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \text{div}(\rho\vec{V}) = 0 \quad [4.4]$$

olur. İkinci faz yoksa, sonlu kütle kaynağı olmayacağından Eş. 4.4'in sağ tarafı görüldüğü gibi sıfır olur.

#### Sonlu hacimler diskritizasyon metodu

Sayısal Akışkanlar Dinamiği'nde kısmi diferansiyel denklemler, lineer cebirsel denklemlere dönüştürülür. Bu cebirsel denklemleri oluşturmak için birçok yöntem mevcuttur. PHOENICS'te sonlu hacimler metodu kullanılmaktadır. Denklemleri çözmek için ayrıca sınır şartlarının da bilinmesi gerekir.

Gerekli sınır şartlarının belirlenmesi için, korunum denklemlerinin genel hali olan Eş. 4.1 A yüzey alanlı, V hacimli bir hesaplama bölgesinde integre edilip, diverjans (divergence) teoremi uygulanırsa,

$$\iint_A dA (r_i \rho_i V \phi_i - r_i \Gamma_i \text{grad} \phi_i)_n = \iiint_V dv \left[ r_i S_i - \frac{\partial}{\partial t} (r_i \rho_i \phi_i) \right] \quad [4.5]$$

bulunur. Görüldüğü gibi konvektif ve difüzyif akıların yüzey normallerinin  $(r_i \rho_i V \phi_i - r_i \Gamma_i \text{grad} \phi_i)_n$  sınırlarda verilmesi gerekir.

Diferansiyel eşitlik takımı (Eş. 4.3 ve Eş. 4.4)'in bir hücrenin sonlu hacmi üzerinde veya zamana bağlı problemlerde sonlu zaman aralığına göre integrali alınırsa, Eş. 4.6'da verilen cebirsel eşitlikler elde edilir.

Şekil 4.2'de ki hücre dikkate alındığında, P noktasında  $\phi_p$  değeri komşu  $\phi$  değerleri ile ilişkilidir. Ayrıca problem zamana bağlı ise bir önceki zaman dilimi ile de ilişkilidir. Bu açıklamalar ışığında lineer cebirsel eşitlikleri şu şekilde yazmak mümkündür.

$$a_P\phi_P = a_N\phi_N + a_S\phi_S + a_W\phi_W + a_E\phi_E + a_H\phi_H + a_L\phi_L + a_T\phi_T + S \quad [4.6]$$

Yukarıdaki cebirsel eşitlikte “ $\phi$ ” bağımlı değişkeni, E, W, N, S, H ve L doğu, batı, kuzey, güney, yüksek ve düşük olmak üzere bu değişkenin hesap edildiği pozisyonları, alt indis T önceki zamandaki değeri, “a” terimleri katsayıları, “S” kaynağı temsil etmektedir.

Eş. 4.6'ya dikkat edilirse her komşu hücrenin ayrı bir katsayısı mevcuttur. Bu katsayıların aldığı değerler; hücre geometrisi, akışkanın bir hücreden diğerine akış hızı ve akışkanın yerel özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Bütün katsayıların biliniyor olarak kabul edilmesi, her bir değişken, hücre ve zaman dilimi için katsayıların bilinmesi demektir. Bu ise  $N_X * N_Y * N_Z * N_\phi * N_T$  çarpımı kadar katsayının bilinmesi demektir. Burada  $N_X$ ,  $N_Y$ ,  $N_Z$  sırasıyla x, y, ve z-yönündeki hücre sayısı,  $N_\phi$  değişken sayısı,  $N_T$  ise çözümün zamana bağımlı olması durumu için zaman dilimi sayısızdır. Skalar büyüklükler olan basınç, entalpi ve konsantrasyonun çözümünde hücre merkezlerinden yararlanılır.

Diskritizasyon işlemleri yapılırken kaynak terimi “S” in lineer bir forma getirilmesi gerekmektedir. Sonlu hacim eşitliklerine, lineer cebirsel denklemlerin çözümünde kullanılan teknikleri uygulamak için, kaynak teriminin de lineer olması gerekir. Ayrıca, yukarıda açıklandığı gibi, akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde, çözüm bölgesinin sınırlarında konvektif ve difüzyif akımların da bilinmesi gerekir.

PHOENICS bunun için esnek bir yapıya sahiptir ve nasıl çalıştığının öğrenilmesi, aşağıda belirtilen noktaların anlaşılmasına bağlıdır.

PHOENICS daima bir sınır şartını, ilgili eşitliğin (kütle, momentum, enerji, kimyasal özellik, türbülans vb) kaynak terimi olarak değerlendirir. Bu nedenle sınır değerini direkt olarak kullanmaz.

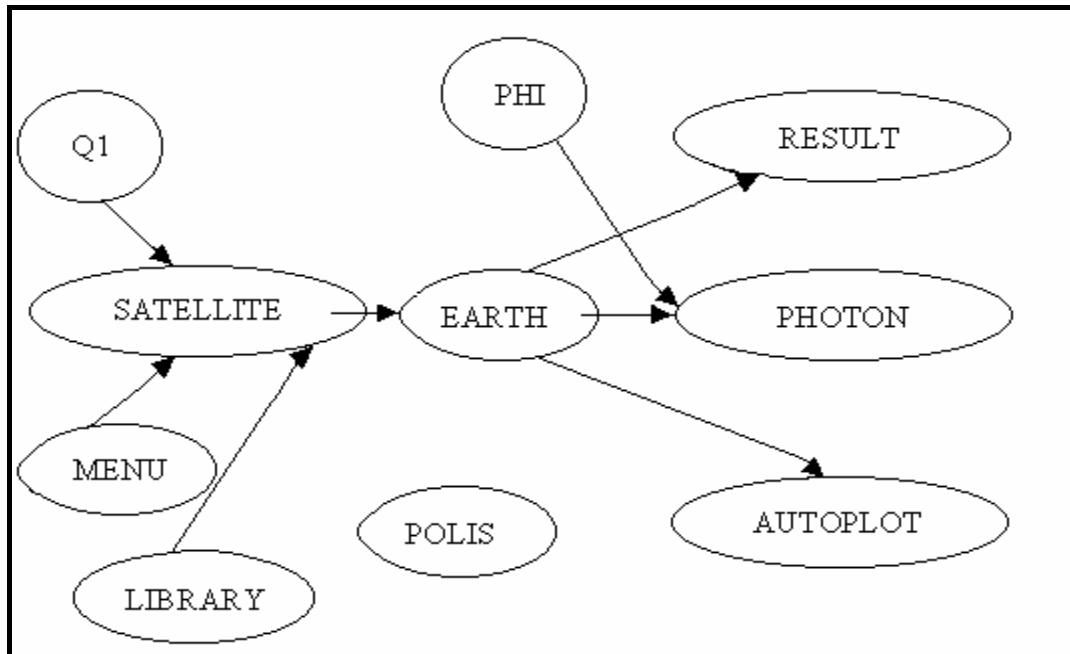
PHOENICS, kaynakların özelliklerini bir “C” katsayısı “V” değeri cinsinden kabul eder.  $\phi$  değişkeni için kaynak  $C_\phi$  ve  $V_\phi$  tarafından belirlenir.

$$S = C_\phi(V_\phi - \phi_p) \quad [4.7]$$

Burada  $\phi_p$ , P düğüm noktasındaki  $\phi$ 'nin değeridir.

#### 4.1.2. PHOENICS'te işletim sistemi

PHOENICS işletim sistemi, Şekil 4.3'de görüldüğü gibi üç ana elemandan oluşur. Ana elemanlar, SATELLITE, EARTH ve PHOTON'dur.



Şekil 4.3. PHOENICS paket programının genel yapısı (28)

SATELLITE, ön işlemci (preprocessor) olarak görev yapar. Bu görevler kısaca şunlardır:

- $Q_1$  kütüğünde verilmiş olan işlemleri okur,
- PHOENICS kütüphanesinde örnek problem seçer,
- Menü sistemini çalıştırarak problem tanımını yapabilir,
- Klavye üzerinden verilen komutları işler,
- Yardım ve komut tarama işlemlerini yapar.

EARTH, ana işlemci olarak, SATELLITE tarafından hazırlanan veri kütüğünü okur ve istenen hesapları yapar. Hesaplama sonunda RESULT ve PHI adında iki kütük oluşturur. PHI kütüğü PHOTON tarafından okunabilecek formattadır. PHOTON, son işlemci (post-processor) olarak görev yapar. PHOTON, EARTH tarafından oluşturulan PHI veri kütüğünü okur ve kullanıcıyla interaktif olarak, bağımlı değişkenlerin vektörel yada kontur grafiklerini ve problemde kullanılan hücre yapısını gösterir.

Sonuç olarak SATELLITE, kullanıcı tarafından girilen bilgileri EARTH'ın anlayacağı bir dile çevirir. Giriş bilgileri  $Q_1$  kütüğünde oluşturulur. EARTH ise bu giriş bilgileri doğrultusunda gerekli hesaplamalar yapar ve RESULT ile PHI kütüğüne aktarır.

PHOENICS'in en önemli özelliklerinden birisi çok geniş kapsamlı bir kütüphaneye sahip olmasıdır. Bu kütüphanede mühendislik problemleri ile ilgili pek çok örnek vardır.

$Q_1$  kütüğü yardımcı elemanlardan biridir ve 24 grup başlığı altında toplanmıştır. Her grubun ayrı bir amacı vardır.  $Q_1$  kütüğünün yazıldığı dil İngilizceye benzer ve birçok hazır komuttan oluşmaktadır.  $Q_1$  kütüğü içerisindeki gruplar genel olarak şu bilgileri içermektedir.

- Problemi tanımlayan başlık,
- Problemin geometrisi ve hücre yapısı,
- Çözümü istenen bağımlı değişkenler,
- Her değişken için çözülmesi istenen denklemin biçimi (parabolik, eliptik, sürekli, süreksiz)
- Uygulanması istenen sayısal çözüm metodu,
- Ortamın fiziksel ve termodinamik özellikleri,
- İlk iterasyon için bağımlı değişkenlerin kabul edilen dağılımı
- Problemin sınır şartları
- Çözüm kontrolünde kullanılan parametreler,
- Sonuçların çıkış formunun belirlenmesi.

Q<sub>1</sub> kütüğüne ait 24 grup Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Model Q<sub>1</sub> kütüğünde standart komutlar

|          |                                               |
|----------|-----------------------------------------------|
| GROUP 1  | Run title and other preliminaries             |
| GROUP 2  | Transience; time step specification           |
| GROUP 3  | x-direction grid specification                |
| GROUP 4  | y-direction grid specification                |
| GROUP 5  | z-direction grid specification                |
| GROUP 6  | Body fitted coordinates or grid distortion    |
| GROUP 7  | Variable stored, solved & named               |
| GROUP 8  | Terms (in differential equations)             |
| GROUP 9  | Properties of medium (or media)               |
| GROUP 10 | Inter-phase-transfer process and properties   |
| GROUP 11 | Initialization of variable or porosity fields |
| GROUP 12 | Convection diffusion adjustments              |
| GROUP 13 | Boundary conditions and special sources       |
| GROUP 14 | Down stream pressure for PARAB=TRUE           |
| GROUP 15 | Termination of sweep                          |
| GROUP 16 | Termination of iterations                     |
| GROUP 17 | Under-relaxion devices                        |
| GROUP 18 | Limits on variables or increments to them     |
| GROUP 19 | Veri communicated by satellite to GROUND      |
| GROUP 20 | Preliminary print-out                         |
| GROUP 21 | Printout of variables                         |
| GROUP 22 | Spot-value print-out                          |
| GROUP 23 | Field print-out and plot control              |
| GROUP 24 | Dumps for restart                             |

Grup 1’de yapılan çalışmanın adı, Grup 2’de çalışmanın sürekli olup olmadığı, Grup 3-4-5’te x, y ve z-yönlerindeki boyut, hücre sayısı ve hücre sisteminin üç ayrı yönde üniform olup-olmadığı, Grup 6’da kullanılacak koordinat sistemi kartezyen veya silindirik değilse, özel bir hücre sistemi kullanılacak ise buna ait özellikler girilir. Grup 7’de çözülecek değişkenlerin isimleri, nasıl çözülecekleri ve kaydedilecek olanlar belirlenir. Grup 8’de diferansiyel denklemlerdeki terimler ve bazı özelliklerin kullanılıp kullanılmayacağı belirlenir. Grup 9’da simulasyonu yapılan ortamın bazı fiziksel özellikleri (yoğunluk, vizkozite vb) girilir. Grup 10 iki fazlı akışkanlar için

aralarında bir etkileşim varsa kullanılır. Grup 11’de zamana bağlı problemlerde başlangıç şartları girildiği gibi, problem sürekli şartlarda başlangıç (ilk tahmin) değerleri girilir. Ortam gözenekli ise yine bu grupta belirtilmelidir. Grup 12’de konveksiyon ve difüzyon ile ilgili ayarlar yapılır. Grup 13’de ilgili sınır şartları ve özel kaynaklar girilir. Grup 14’de tam bir simülasyon için gerekli bilgiler verilir. Grup 15’te kaç defa hesaplama yapılacağı belirtilir. PHOENICS dış ve iç iterasyon olmak üzere iki tür iterasyon içerir. Grup 15 ile dış iterasyon (sweep) Grup 16 ile de iterasyon verilir. Grup 17’de ise, yakınsamanın sağlanabilmesi için, lineer olmayan eşitlik setlerinin çözümünde “under-relaxation” lineer eşitlik setlerinin çözümünde de “over-relaxation” seçenekleri belirlenir. Grup 18 ile bazı değişkenlerin belli sınırlar içinde kalması sağlanır. Grup 19 ile SATELLITE ve GROUND arasındaki iletişim sağlanır. Grup 20-24’de ise istenen sonuçların program çalışırken ekranda ve çözüm bittikten sonra RESULT kütüğünde ki çıktılarının formu belirlenir.

#### **4.1.3. Yakınsama kriterleri**

Sayısal akışkanlar dinamiği metotları kullanılarak, birçok probleme çözüm elde etmek mümkündür. Çok kısa bir sürede, belirli problemlerin çözümlerine ulaşılabilir. Fakat, çözümlerin ve sonuçların gerçek fiziksel olay ve fizik kanunlarına uygun olması gerekmektedir. Birçok çözüm bundan dolayı bir işe yaramaz ve problem defalarca yeniden programlanarak ve tanımlanarak, kullanılan sayısal akışkanlar dinamiği kodunun içerdiği çözüm teknikleri ve değişkenleri tekrar tekrar gözden geçirilerek, problemin gerçek çözümlerinin elde edilmesi sağlanır. PHOENICS’te elde edilen sonuçların geçerliliğinin kontrolü için beş ana kriter vardır ve bunlar aşağıda verilmiştir.

##### 1. Çözümün yakınsaklığı sağlandı mı?

RESULT kütüğünde son kısımda iterasyon sayısına bağlı olarak kalıntılar grafik halinde verilir. Çözümün yakınsaması için bütün değişkenlerin kalıntıları monoton veya değişken bir azalma göstermek zorundadır. Yakınsamanın kontrolü yapıldıktan

sonra, her değişken için toplam kalıntı değerlerine bakmak gerekir. Bu değerlerin de mümkün olduğunca sıfıra yakın çok küçük değerler olması istenir.

### 2. Çözüm iterasyon sayısından bağımsız mı?

Çözüm iterasyon sayısı ile yakından ilgilidir. Problemin basit ve karmaşık olmasına göre iterasyon sayısı değişir. Bundan dolayı iterasyon sayısı değiştirilerek 1. sorunun cevabı aranır. Yani iterasyon sayısı ile yakınsamanın nasıl değiştii sürekli olarak gözlenir. Burada amaç iterasyon sayısının artmasıyla yakınsamış bir problemin yakınsamasının devam ettiğini gözlemektir. Bununla birlikte sadece kalıntılara bakmak yeterli değildir. Elde edilen çözüm değerlerinin değişimine de bakmak gerekir. RESULT kütüğünün son kısmında kalıntılarla birlikte, değişkenlerin fiziksel değerlerinin değişimi de grafik olarak verilmiştir. Bu grafikte değişkenlerin iterasyon sayısı ile birlikte, anlık değerlerinin (spot-value) değişimi de grafik olarak verilir. Bu anlık değer grafiğinin belli bir aşamadan sonra sabit kalması istenir.

### 3. Korunum eşitlikleri sağlandı mı?

Her iki sorunun olumlu cevaplandırılmasından sonra, çözümünü elde etmeye çalıştığımız fiziksel problemi tanımlayan kütle, momentum ve enerjinin korunumu eşitliklerinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Bu değerleri kontrol etmek için yine RESULT kütüğünün sonunda korunum denklemlerinin ne ölçüde sağlandığını gösteren değerler vardır. Bu değerlerin kontrol edilmesi gerekmektedir.

### 4. Çözüm hücre yapısından bağımsız mı?

İlk üç soru olumlu cevaplandırılmasına rağmen elde edilen sonuçlar gerçek değerlerden uzak olabilir. Buna sebep olan nedenlerden biri de çözüm alanı içerisindeki hücre sayısı ve dağılımlardır. Uygun hücre sayısının belirlenememesi, farklı sonuçlar doğurabilir. Ayrıca, problemin fiziğine bağlı olarak, hücre dağılımı da çok önemlidir.

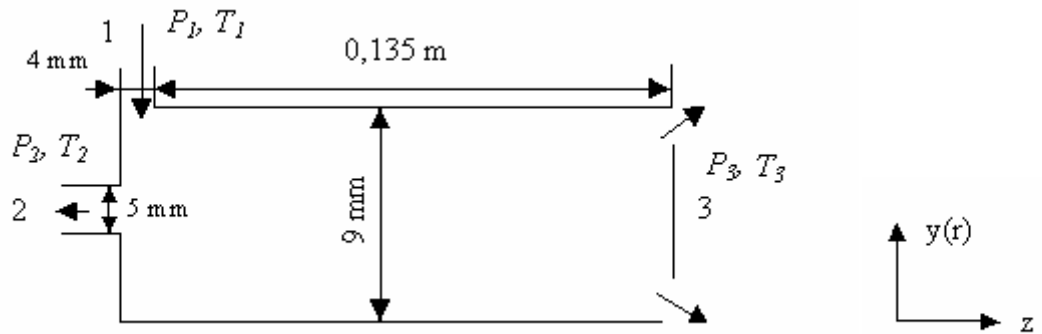
Akışın yapısına göre giriş veya çıkış bölgesinde yada herhangi bir bölgede akışın değişimi farklı olabilir ve hücre dağılımı homojen olmayabilir. Hücre yapısından bağımsız bir çözüm elde etmek sonuçların doğruluğu açısından şarttır. Hücre yapısında ve dağılımında yapılan değişikliklerle, elde edilen sonuçlardaki değişim minimuma indirgenmelidir ve optimum hücre sayısı belirlenmelidir. Böylece hesaplama zamanından önemli ölçüde kazanç sağlanmış olur.

#### 5. Sonuçlar deneysel sonuçlarla uyumlu mu?

Sayısal akışkanlar dinamiği çözüm ve sonuçlarının gerçek fiziksel değerlerle doğruluğu ve uyumluluğu ilk dört sorunun olumlu olarak cevaplandırılmasından sonra, literatürde mevcut veya kendi deneysel değerleri ile karşılaştırmak suretiyle ispatlanmış olur (28).

#### **4.2. Problemin Sayısal Çözümü İçin Tanımı**

Sayısal çözümü yapılan sistemin genel görünüşü Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Problemin geometrik yapısı

$$T_{gir}=296 \text{ K}$$

$$U_{gir}=210 \text{ m/s}$$

$$V_{gir}=0,1 \text{ m/s}$$

$$C_p=1007 \text{ J/kgK}$$

$$P_{gir}=92 \text{ 030 N/m}^2$$

$$\text{Vorteks tüp gövdesinin uzunluğu} : L_{vrt}=0,135 \text{ m}$$

Vorteks tüpün i  çapı : 0,009 m

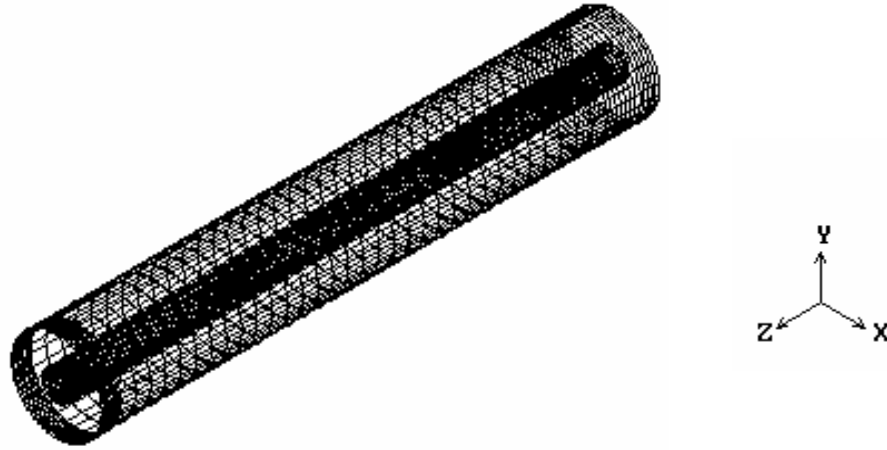
X( $\phi$ ) yönünde 30 hücreye,

Y yönünde 11 hücreye,

Z yönünde 47 hücreye, ayrılmıştır.

 terasyon Sayısı=400+400'tür.

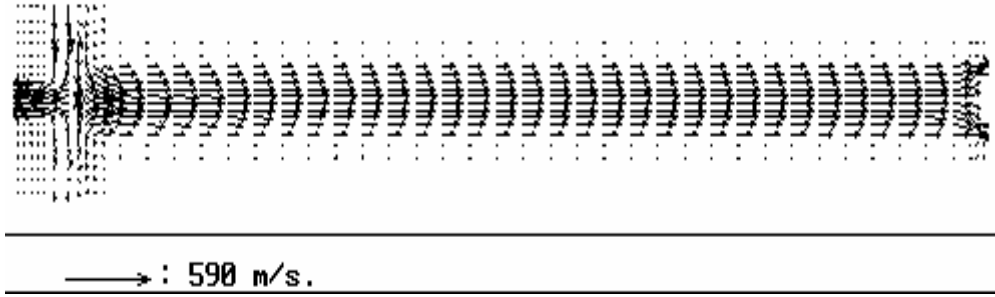
şekil 4.5'de PHOENICS'te  z m  yapılmış olan vorteks tüpün 3 boyutlu hücre yapısı, şekil 4.6'da ise 2 boyutlu hücre yapısı verilmiştir. Problemin PHOENISC'te sayısal  z m  sonucunda oluşturulan hız vektörleri (şekil 4.7), vorteks tüplerde oluşan fiziksel olayda olduğu gibi sıcak ve soğuk çıkış tarafından iki farklı yönde çıktıkları görülmektedir. şekil 4.8-4.11'de  z m  yapılmış olan probleme ait sıcaklık konturları verilmiştir. Sayısal  z mlleme neticesinde oluşturulan bu şekiller incelendiğinde, vorteks tüplerde gerçekleşen fiziksel olayların benzerlerinin oluştuğu görülmektedir (şekil 3.1).



şekil 4.5. Problemin üç boyutlu hücre yapısı



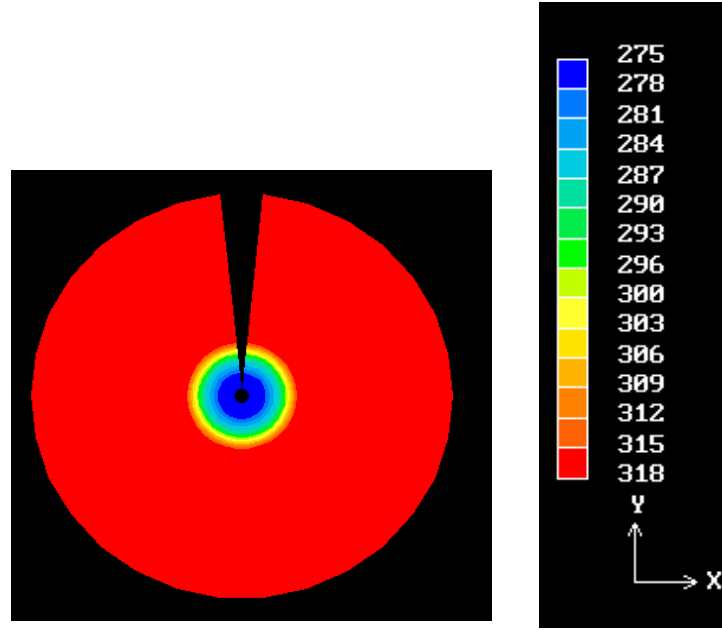
Şekil 4.6. Problemin iki boyutlu hücre yapısı



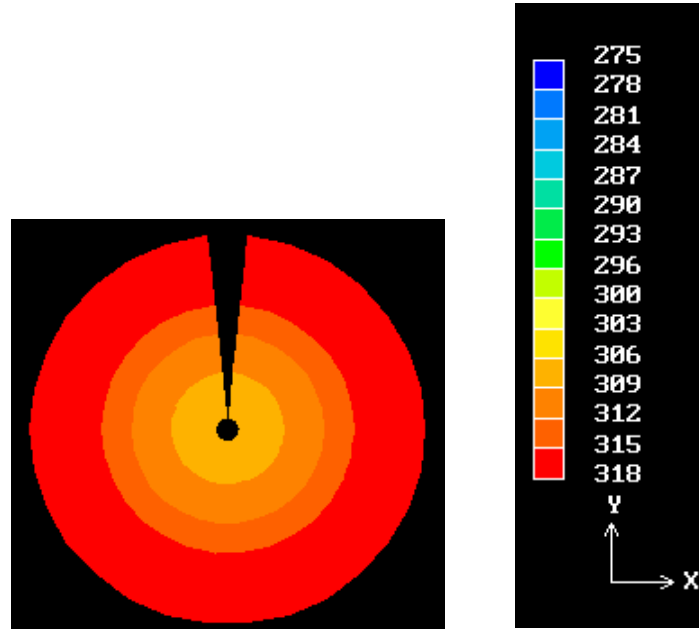
Şekil 4.7. y-z düzlemindeki ki hız vektörleri



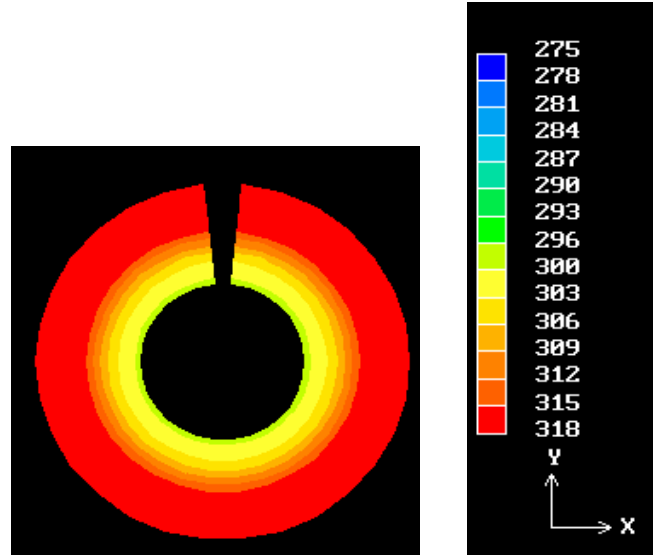
Şekil 4.8. y-z düzlemindeki sıcaklık konturları



Şekil 4.9.  $y$ - $x$  düzlemindeki sıcaklık konturları (soğuk çıkış)



Şekil 4.10.  $y$ - $x$  düzlemindeki sıcaklık konturları (sıcak çıkışa yakın)



Şekil 4.11. y-x düzlemindeki sıcaklık konturları (sıcak çıkış)

## 5. DENEYSEL SİSTEM

Bu çalışma karşıt akışlı vorteks tüpler üzerinde yapılmıştır. Deneysel çalışmalar yapılırken iki farklı özellikte iki deneysel sistem kurulmuştur. Deneysel çalışmalarda ilk olarak, vorteks tüplerin çalışırılığını test etmek amacıyla bir sistem kurulmuştur. Bu sistemde, vorteks tüplerde sıcak çıkış tarafında olması gereken hareketli parça yerine, sabit dairesel bir parça yerleştirilmiş ve her iki çıkıştan (sıcak çıkış ve soğuk çıkış) kütleli akışı ayarlanabilir bir vorteks tüp imal edilmiştir. Geliştirilen bu vorteks tüpün performansını incelemek amacıyla, üç grup deney yapılmıştır.

İkinci olarak kurulan deneysel sistem, vorteks tüplerin performanslarını incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Bu sistemde, soğuk sıcak ayrışma olayının etkisinin deneysel olarak incelenmesi için, soğuk akımın kütleli debisinin girişteki akımın kütleli debisine oranı olan  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde deneyler yapılmıştır (Bkz. Çizelge 1.1).

### 5.1. Ön Çalışma

Deneysel çalışmalarda ilk olarak, kütleli debileri her iki taraftan (sıcak çıkış ve soğuk çıkış) ayarlanabilir bir vorteks tüp geliştirilmiştir. Sistemde, sıcak çıkış tarafına takılan ve soğuk çıkıştaki kütleli akışı ayarlamak amacıyla kullanılan hareketli vida yoktur. Bu parça olmadığı halde kütleli akış her iki taraftan da, sistemde isteğe göre ayarlanabilmektedir. Geliştirilen bu vorteks tüpün performansını incelemek amacıyla, üç grup deney yapılmıştır. İlk grup deneylerde, sıcak çıkış ve soğuk çıkıştaki şiber vanalar, tamamen açık konumda bırakılmıştır. İkinci grup deneylerde, sıcak taraftaki şiber vana tam açık konumdan tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılırken soğuk taraf tamamen açık bırakılmıştır. Girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar ısı çiftler yardımı ile okunmuştur. Manometreler ile sıcak ve soğuk taraftaki hızlar ölçülmüştür. Üçüncü grup deneylerde ise, soğuk taraftaki şiber vana tamamen açık konumdan tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılmıştır. Sıcak taraftaki şiber vana ise tamamen açık konumda bırakılmıştır. Girişteki basınç, giriş

sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, ısı çiftleriyle okunmuştur. Cıvalı manometreler ile sıcak ve soğuk akımların hızları ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır. Hesapların sonuçları dikkate alınarak şekiller çizilmiştir. Bu çizilmiş olan şekiller yardımı ile vorteks tüpün performansı incelenerek yorumlar yapılmıştır. Bu araştırma, ön çalışma olarak Ek-6'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

## 5.2. Deneysel Sistem

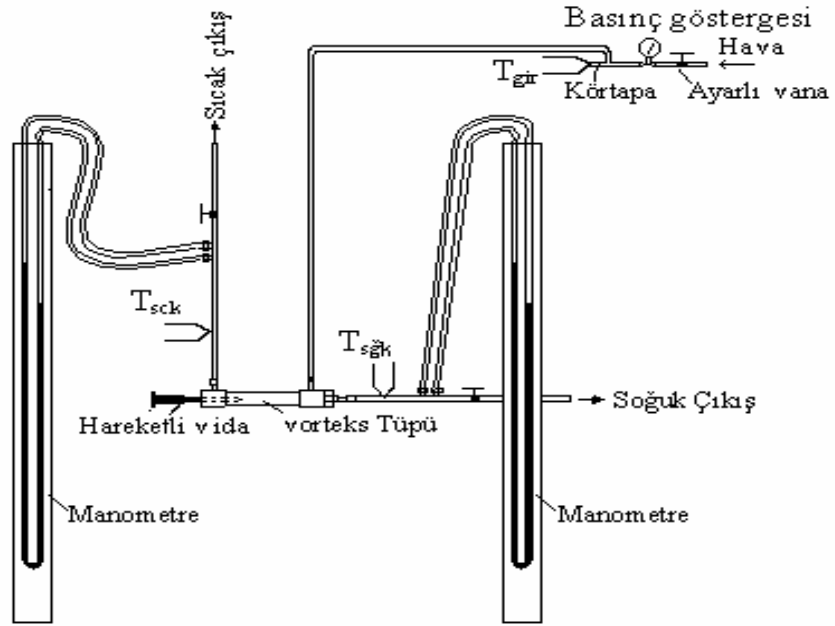
Deneysel çalışmalarda öncelikle, vorteks tüplerin çalışırılığını test etmek için bir sistem kurulmuştur. Kurulan bu sistemde, akım sıcak ve soğuk taraftan ayrı ayrı kontrol edilerek vorteks tüplerin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde, akımın sıcak çıkış tarafından kontrol edildiğinde, vorteks tüplerin performanslarının daha yüksek olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir. Vorteks tüplerin performanslarını incelemek için kurulan deneysel sistemde, bu gözlemden yararlanılmış ve akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilmiştir.

Vorteks tüplerin performanslarını incelemek amacıyla kurulan sistemde, soğuk-sıcak ayrışma olayının etkisinin deneysel olarak incelenmesi için, soğuk akımın girişteki akıma oranı olan  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde deneyler yapılmıştır (Bkz. Çizelge 1.1).

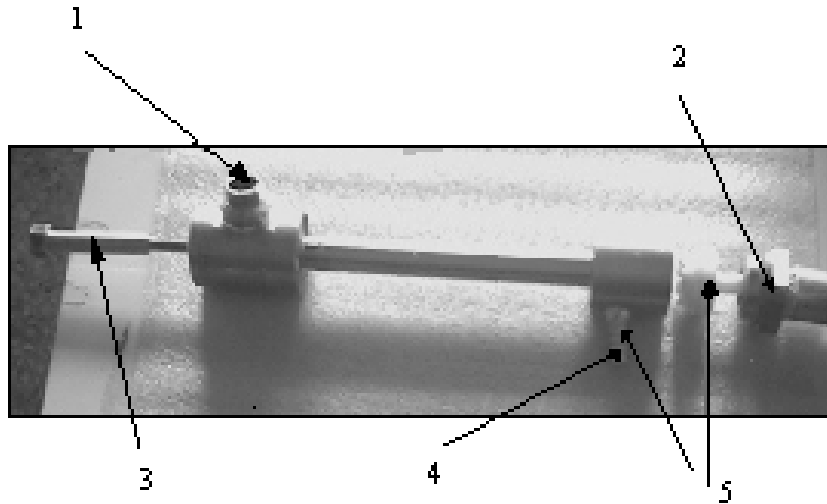
### 5.2.1. Deneysel sistemin tanıtımı

Deneysel çalışmalarda kullanılmış olan sistem Şekil 5.1'de, vorteks tüp ve vorteks tüpü oluşturan elemanların resmi ise Resim 5.2-5.5'de verilmiştir. Şekil 5.1'den de görüldüğü gibi hava hattı üzerine basınç regülatörü ve basınç göstergesi yerleştirilmiştir. Hattın sonuna kör tapa takılmıştır. Kör tapanın ortası 3 mm çapında delinmiş ve 1 no'lu ısı çifti yerleştirilmiştir. Hava hattı olan 1/2" boru üzerine 2 adet delik delinmiş ve hortumlarla buralardan vorteks tüpe hava girişi sağlanmıştır. Orifisler yapılarak sıcak ve soğuk çıkış tarafına monte edilmiştir. Orifisin bulunduğu bölümden itibaren 1" mesafede borunun her iki tarafına da delikler açılmıştır. 2 adet

cıvalı manometre imal edilerek sisteme monte edilmiştir. Sıcak çıkış ve soğuk çıkış taraflarına orifisten 100 mm uzaklığa, 3 mm çapında delikler açılmış ve buralara ısıl çiftler yerleştirilmiştir. 2 no'lu ısıl çift soğuk çıkış taraftaki, 3 no'lu ısıl çift ise sıcak taraftaki ısıl çifttir.



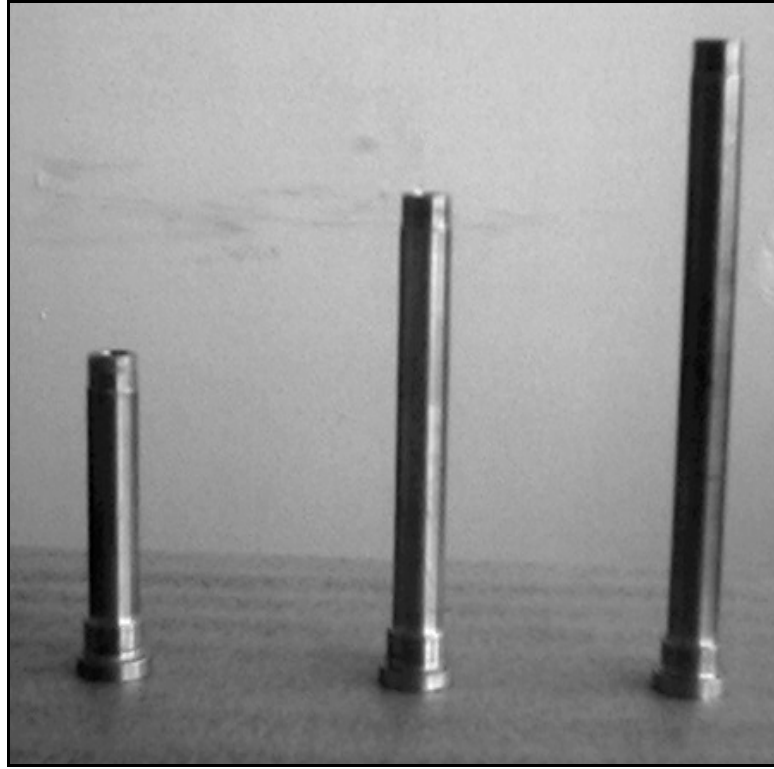
Şekil 5.1. Deneysel sistem



Resim 5.1. Vorteks tüp ve vorteks tüpü oluşturan parçalar  
 1. Sıcak çıkış 2. Soğuk çıkış 3. Hareketli vida  
 4. Hava girişi 5. Nozul

Sıcak ve soğuk çıkışa şiber vanalar takılmıştır. Vanalardan sonra akışın bozulmasını önlemek amacıyla sıcak ve soğuk çıkış tarafa 1/2" çapında ve 15 cm uzunluğunda borular monte edilmiştir. Kafes yapılarak imal edilen vorteks tüp, askılar yardımı ile bu kafese asılmıştır. İzolasyon malzemesiyle vorteks tüpün üzeri kaplanarak sistem çalışır konuma getirilmiştir.

Vorteks tüp gövdesinin uzunluğunun çapa oranı  $L/D$  olarak isimlendirilmiştir.  $L/D$  oranları ise 10D, 15D, 18D olmak üzere, üç farklı vorteks tüp gövdesi imal edilmiştir (Resim 5.2). Üç farklı vorteks tüp gövdesinin imal edilmesindeki amaç,  $L/D$  oranının vorteks tüplerin performanslarına etkisini araştırmaktır.



Resim 5.2. Vorteks tüp gövdeleri ( $L/D=10, 15, 18$ )

Hava hattından sağlanan hava tek girişten değişik sayıdaki nozullardan geçerek ve soğuk çıkış bölümünü de içinde bulunduran aynı zamanda da değişik uzunluktaki vorteks tüp gövdesiyle birlikte çalışacak olan pirinçten bir parça tasarlanarak imal edilmiştir (Resim 5.3).



Resim 5.3. Hava girişini sağlayan ve vorteks tüp gövdesiyle birlikte çalışan parça

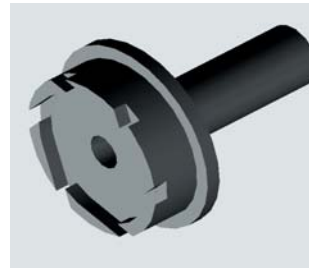
Resim 5.4’de görüldüğü gibi vorteks tüpün soğuk çıkış tarafına, hem nozulları üzerinde bulunduran hem de soğuk çıkış bölümünü oluşturan derlinden bir parça imal edilmiş ve vorteks tüp gövdesinin radyal yönü ile çakıştırılmış ve somun ile sıkıştırılmıştır. Vorteks tüpe hava girişi 2, 4, 6 adet nozul ile sağlanmıştır.



a) 2 nozul



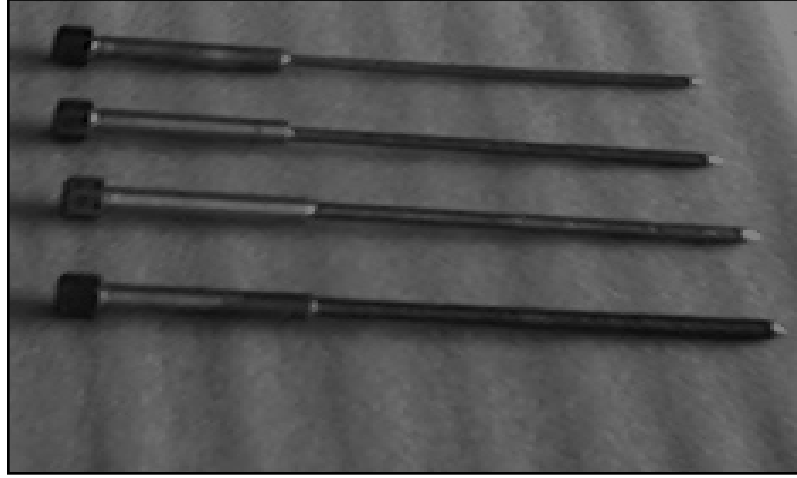
b) 4 nozul



c) 6 nozul

Resim 5.4. Soğuk çıkış ve nozulların olduğu parçalar

Vorteks tüpün sıcak çıkış tarafına 5, 6, 7, 8 mm çapında ve değişik açılarda (6, 7, 8 mm çapındaki vidalardaki açı 60°, 5 mm çapındaki vidada ise 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°) olan vidalar, monte edilmiş ve bu konum L olarak tanımlanmıştır (Resim 5.5).



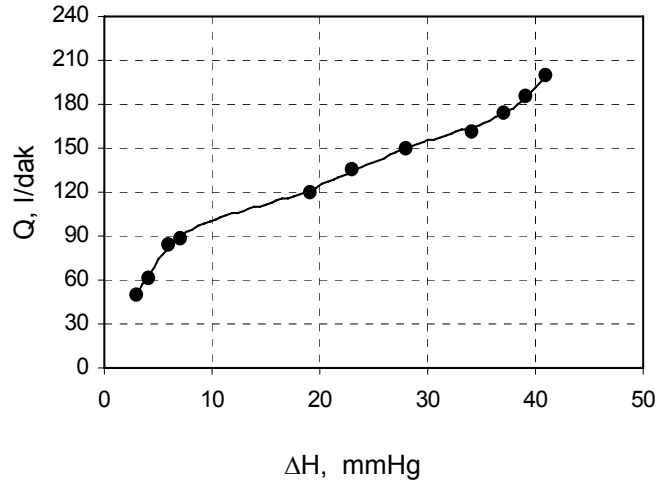
Resim 5.5. 60° konik uca sahip 5, 6, 7, 8 mm çapında olan vidalar

Sistem kütsel akışı sıcak çıkış tarafından ayarlanabilir bir vorteks tüp olarak imal edilmiştir.

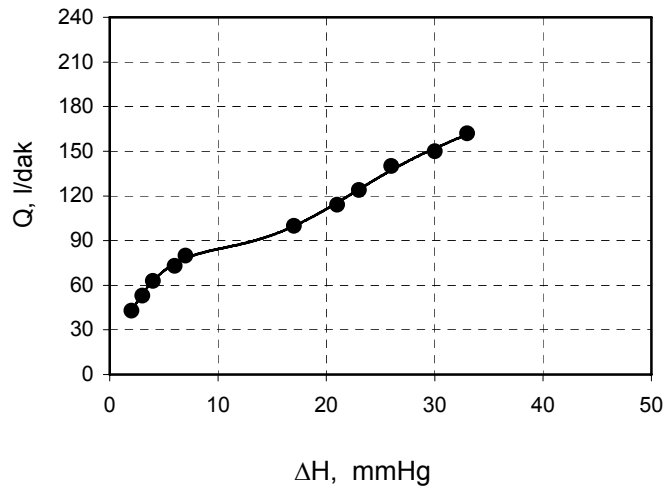
### 5.2.2. Deneysel sistemde kullanılan ölçme aletleri ve kalibrasyonu

Deneysel çalışmalarda hız ölçümleri cıvalı manometrelerle, sıcaklık ölçümleri ise ısıl çiftlerle yapılmıştır. Şekil 5.2-5.3’de cıvalı manometrelerin kalibrasyon eğrileri, Şekil 5.4–5.7’de ısıl çiftlerin kalibrasyon eğrileri verilmiştir. 2. ısıl çiftin ısıtma ve soğutma kalibrasyonu iki kez yapılmıştır (Şekil 5.5, Şekil 5.6).

Şekil 5.2-5.3’de x-ekseni manometrenin kolları arasındaki seviye farkını ( $\Delta P$ )’yi, y-ekseni ise manometre kolları arasındaki seviye farkına karşılık gelen rotametre değerini göstermektedir.

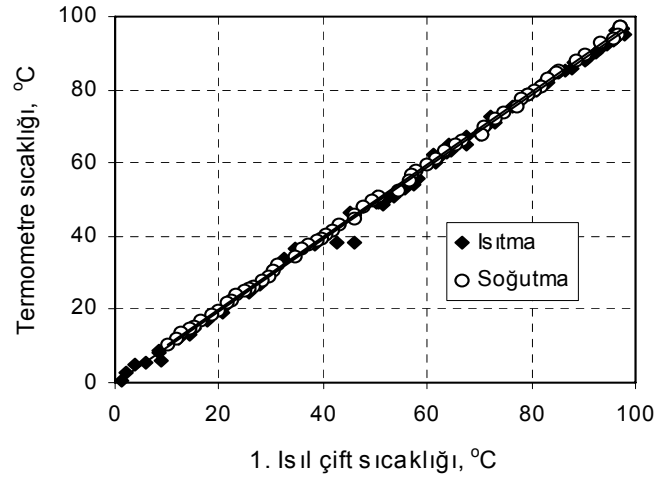


Şekil 5.2. Sıcak akıma ait manometre kalibrasyonu

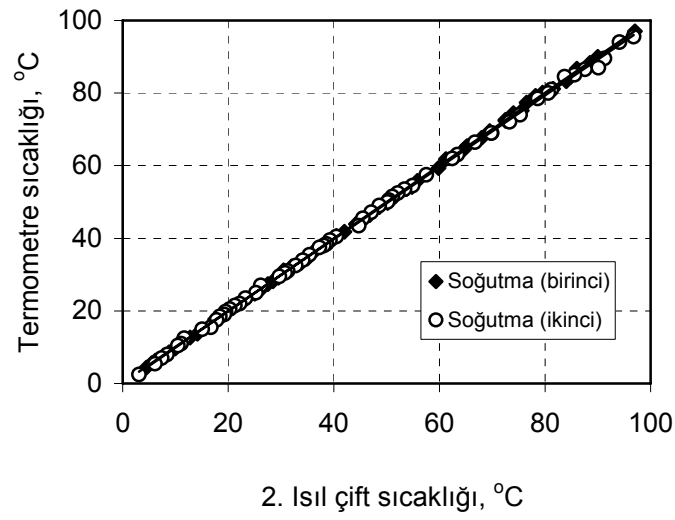


Şekil 5.3. Soğuk akıma ait manometre kalibrasyonu

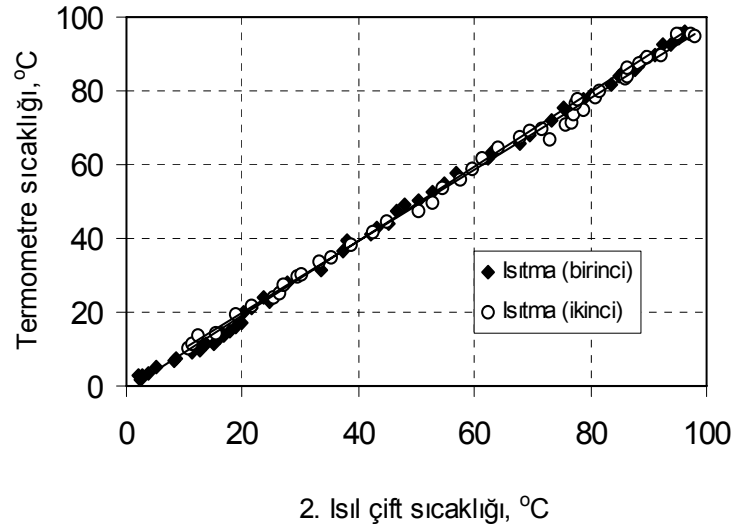
Şekil 5.4-5.7’de x-ekseni ısıl çift sıcaklıklarını, y-ekseni de, ısıl çift sıcaklıklarına karşılık gelen termometre sıcaklıklarını göstermektedir.



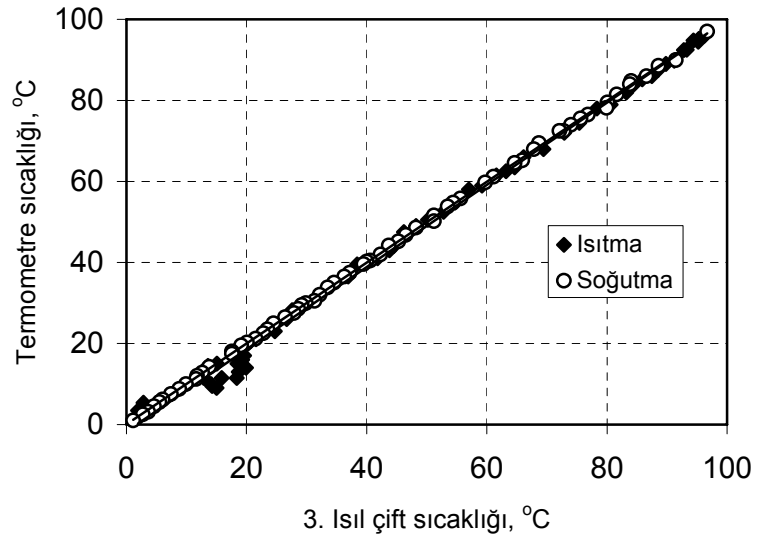
Şekil 5.4. 1. ısıl çift kalibrasyonu



Şekil 5.5. 2. ısıl çift kalibrasyonu birinci ve ikinci birlikte (soğutma)



Şekil 5.6. 2. ısıl çift kalibrasyonu birinci ve ikinci birlikte (ısıtma)



Şekil 5.7. 3. ısıl çift kalibrasyonu

### 5.3. Deneysel Yöntem

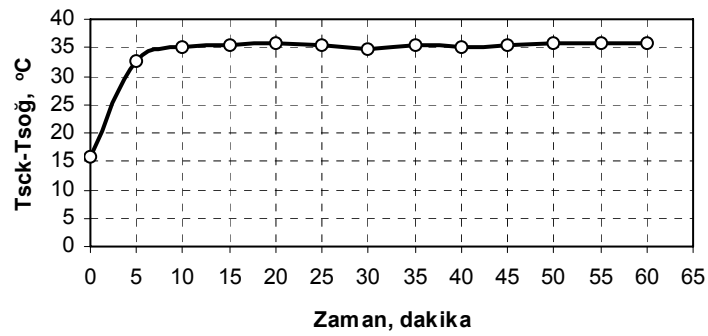
Bu çalışmada giriş ve çıkış akımlarının hız ve sıcaklık değerlerinin girişteki basınca göre değişimleri kullanılarak vorteks tüplerin performansı ve etkinliği deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler yapılırken, öncelikle üzerinde çalışılmak istenilen vorteks tüpün geometrik yapısının özelliği kararlaştırılmıştır. Bu özellik; vorteks tüp uzunluğunun vorteks tüp çapına oranı ( $L/D$ ), nozul sayısı ( $N$ ), hareketli vida çapı ( $d$ ), hareketli vida konumu (tam sıcak çıkış  $L$ , sıcak çıkıştan 1 cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettiği konum  $L-1$ , sıcak çıkıştan 2 cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettiği konum  $L-2$ , sıcak çıkıştan 3 cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettiği konum  $L-3$ ), hareketli vida ucundaki açı ( $\alpha$ ) ve vorteks tüpe giriş basıncı ( $P_{gir}$ )'dir. Daha sonra, deneysel sistem bu yönde çalışır duruma getirilmiştir. Tüm deneylerde, öncelikle sistemin ısıl dengeye gelmesi sağlanmıştır.

Sistemin ısıl dengeye gelmesi şu şekilde gerçekleştirilmiştir. 8 atm çalışma basıncına ayarlanmış olan kompresörden hava nem giderici cihazdan geçtikten sonra hava filitresinden geçerek hava hattına verilmiştir. Daha sonra nozullardan geçerek vorteks tüpe havanın ulaşması sağlanmıştır. Vorteks tüpe girişteki basınç 280 kPa ve sıcak çıkış tarafındaki cıvalı manometre yüksekliği 8 mm'ye ayarlanmıştır. Soğuk çıkış tarafındaki vana ise tam açık konumda bırakılmıştır. Sistem bu konumda çalıştırılarak sıcaklık değişimleri minimum oluncaya kadar beklenilmiştir. Ölçümler 5'er dakika aralıklarla yapılmıştır. Çizelge 5.1'de sistemin ısıl dengeye gelmesi için yapılmış olan çalışmalardan bir tanesi verilmiştir. Çizelge 5.1'de  $P_{gir}$  vorteks tüp girişindeki basınç,  $\Delta P_{sck}$  sıcak akım tarafında bulunan cıvalı manometrenin kolları arasındaki fark,  $\Delta P_{soğ}$  soğuk akım tarafında bulunan cıvalı manometrenin kolları arasındaki fark,  $T_{gir}$  vorteks tüp girişindeki akımın sıcaklığı,  $T_{sck}$  sıcak akımın sıcaklığı ve  $T_{soğ}$  ise soğuk akımın sıcaklığıdır.

Çizelge 5.1'de alınmış olan ilk veriler sistemin çalışmaya başlamasından itibaren 5 dakika sonra alınan değerlerdir. Sistemin ısıl dengeye gelme süresi Şekil 5.8'de verilmiştir. Deney sistemi yaklaşık 10 dakikada ısıl dengeye gelmiştir.

Çizelge 5.1. Sistemin ısııl dengeye gelmesi için yapılmış olan ölçümler

| L/D=15       |                        | D=6, mm                 | N=6                     | Hareketli vidanın konumu=L; $\alpha=60^\circ$ |                  |                  | Tarih:18.08.2004 |                           |         |
|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------|---------|
| Ölçüm sayısı | P <sub>gir</sub> , bar | P <sub>sck</sub> , mmHg | P <sub>soğ</sub> , mmHg | T <sub>gir</sub>                              | T <sub>soğ</sub> | T <sub>sck</sub> | Zaman, saat      | İlave edilen süre, dakika | (T, °C) |
| 1            | 280                    | 6                       | 48                      | 27,2                                          | 19,9             | 35,6             | 14:43            | 5                         | 15,7    |
| 2            | 280                    | 6                       | 48                      | 27,4                                          | 18               | 50,8             | 14:48            | 5                         | 32,8    |
| 3            | 280                    | 6                       | 48                      | 27,9                                          | 18,4             | 53,5             | 14:53            | 5                         | 35,1    |
| 4            | 280                    | 6                       | 48                      | 28,8                                          | 19,1             | 54,4             | 14:58            | 5                         | 35,3    |
| 5            | 280                    | 6                       | 48                      | 27,4                                          | 18,2             | 53,9             | 15:03            | 5                         | 35,7    |
| 6            | 280                    | 6                       | 48                      | 27,6                                          | 18               | 53,6             | 15:08            | 5                         | 35,6    |
| 7            | 280                    | 6                       | 48                      | 28,7                                          | 19,7             | 54,4             | 15:13            | 5                         | 34,7    |
| 8            | 280                    | 6                       | 48                      | 27,7                                          | 18,6             | 53,9             | 15:18            | 5                         | 35,3    |
| 9            | 280                    | 6                       | 48                      | 28,5                                          | 19,4             | 54,6             | 15:23            | 5                         | 35,2    |
| 10           | 280                    | 6                       | 48                      | 28,2                                          | 18               | 53,4             | 15:28            | 5                         | 35,4    |
| 11           | 280                    | 6                       | 48                      | 27,8                                          | 18,4             | 54,1             | 15:33            | 5                         | 35,7    |
| 12           | 280                    | 6                       | 48                      | 28,6                                          | 18,6             | 54,3             | 15:38            | 5                         | 35,7    |
| 13           | 280                    | 6                       | 48                      | 28,2                                          | 18,5             | 54,3             | 15:43            |                           | 35,8    |
|              |                        |                         |                         |                                               |                  |                  |                  | Top=60                    |         |

Şekil 5.8. Deneysel sistemin ısııl dengeye gelmesi, (P<sub>gir</sub>=280 kPa)

Çizelge 5.2'den de görüldüğü gibi, çalışma basınç aralığı ayarlandıktan sonra deneysel sistem 20 dakika daha çalıştırılmıştır. Bu aşamadan sonra istenen manometre ayarları yapılmış ve sıcaklık değişimlerinin minimum olduğu durumlarda ilgili veriler alınmıştır. Çalışılmakta olan basınç aralığındaki ölçümler yapıldıktan sonra bir üst çalışma basıncına geçilerek sistemin yine ısı dengeye gelmesi için 20 dakika beklenilmiştir.

Çizelge 5.2. Çalışma basınç aralığı ayarlandıktan sonra beklenen zaman

| Sıcak ve soğuk taraftaki vanalar tam açık konuma getirilmiştir. |                         |                         |                |                |                |              |             |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|-------------|
| $P_{gir}$ , bar                                                 | $\Delta P_{sck}$ , mmHg | $\Delta P_{soğ}$ , mmHg | $T_{gir}$ , °C | $T_{soğ}$ , °C | $T_{sck}$ , °C | Zaman (saat) | Dakika      |
| 200                                                             | 55                      | -1                      | 28,8           | 21,7           | 45,4           | 15:44        | 5 dak.      |
| 200                                                             | 55                      | -1                      | 27,4           | 25,2           | 29,4           | 15:49        | 5 dak.      |
| 200                                                             | 55                      | -1                      | 28,2           | 28,1           | 29,1           | 15:54        | 5 dak.      |
| 200                                                             | 55                      | -1                      | 27,9           | 28,4           | 28,2           | 15:59        | 5 dak.      |
| 200                                                             | 55                      | -1                      | 28,4           | 29,8           | 29,3           | 16:04        | Top=20 dak. |

Deneysel çalışmalarda öncelikle en iyi performanstaki, vorteks tüp gövdesinin vorteks tüp iç çapına oranı, değişik nozul sayılarındaki performansı araştırılmıştır. Bu çalışma yapılırken; nozul kesit alanı  $0,002 \times 0,002 \text{ m}^2$  olan 2, 4, 6 nozul sayısında, L/D'nin 10, 15, 18 ve 6 mm çapında ve ucundaki açının  $60^\circ$  olan hareketli vida sıcak çıkış tarafına monte edilmiştir. Soğuk çıkış tarafındaki vana tam açık konumda kalırken, akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilmiştir. Çalışma basıncı L/D'nin 10 ve 15 olduğu vorteks tüplerde 200 kPa'dan başlanılmış 20 kPa artırılarak 320 kPa'a kadar sıcak akım kontrol edilerek deneyler yapılmıştır. L/D'nin 18 olduğu vorteks tüpte ise çalışma basıncı 200 kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla 260 kPa'a kadar yükseltilerek ölçümler yapılmıştır. Bu basıncın üzerine çıkılmamıştır.

Deneysel çalışmalarda 2. olarak yapılmış olan çalışma, hareketli vidanın en uygun konumunu tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Bu çalışma yapılırken, vorteks tüplerde optimum performans gösteren L/D oranının tespiti için yapılan çalışmanın sonuçları dikkate alınmıştır (L/D=15). Bu çalışma yapılırken; nozul kesit alanı  $0,002 \times 0,002 \text{ m}^2$  olan 6 nozul sayısında, L/D'nin 15 ve 6 mm çapında ve ucundaki açının  $60^\circ$  olan

hareketli vida sıcak çıkış tarafından itibaren 1'er cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettirilmiştir. Soğuk çıkış tarafındaki vana tam açık konumda kalırken akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilmiştir. Çalışma basıncı, L, L-1 ve L-2'de, 200 kPa'dan başlanılmış 20 kPa artırılarak 320 kPa'a kadar sıcak akım kontrol edilerek deneyler yapılmıştır. L-3'de ise 200 kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla 280 kPa'a kadar yükseltilerek ölçümler yapılmıştır. Bu basıncın üzerine çıkılmamıştır.

Deneyssel çalışmalarda 3. olarak yapılmış olan çalışma, vorteks tüplerde hareketli vida çapının etkisinin deneyssel olarak incelenmesidir. Bu çalışma yapılırken; vorteks tüplerde optimum performans gösteren L/D oranının tespiti ve vorteks tüplerde optimum performans gösteren hareketli vida konumunun tespiti ile ilgili deneyssel sonuçlar dikkate alınmış ve vorteks tüp geometrisi buna göre hazırlanmıştır. Bu çalışma yapılırken; nozul kesit alanı  $0,002*0,002 \text{ m}^2$  ve nozul sayısı 2, 4, 6 olan, parçalar kullanılmıştır. L/D=15 ve 5, 6, 7, 8 mm çaplarında ve ucundaki açının  $60^\circ$  olan hareketli vida sıcak çıkışa monte edilmiştir. Akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilmiştir. Çalışma basıncı, 200 kPa'dan başlanılmış 20 kPa arttırılarak 320 kPa kadar yükseltilerek deneyler yapılmıştır.

4. olarak yapılmış olan deneyssel çalışma, en iyi performans gösteren nozul sayısının tespiti için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma yapılırken; nozul kesit alanı  $0,002*0,002 \text{ m}^2$  olan 2, 4, 6 nozul sayısında ve 5, 6, 7, 8 mm çaplarındaki hareketli vidalar kullanılmıştır. Hareketli vidanın ucundaki konik açı  $60^\circ$ 'dir ve L konumunda tutulmuştur. Çalışma basıncı 200 kPa'dan 320 kPa'a kadar 20 kPa aralıklarda yükseltilmiş ve akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilerek deneyler yapılmıştır.

5. olarak yapılmış olan deneyssel çalışma, hareketli vidanın ucundaki en iyi performans gösteren açının tespiti için yapılmıştır. Bu çalışma yapılırken; nozul kesit alanı  $0,002*0,002 \text{ m}^2$  ve nozul sayısı 4 olan, L/D oranı 15 ve 5 mm çapındaki hareketli vida kullanılmıştır. Hareketli vidanın ucundaki açılar  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ 'dir ve L konumunda tutulmuştur. Çalışma basıncı 200 kPa'dan 320 kPa'a kadar 20 kPa aralıklarda yükseltilmiş ve akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilerek deneyler yapılmıştır.

6. ve son olarak yapılmış olan deneysel çalışmada ise en iyi performans gösteren vorteks tüpde, vorteks tüpün girişindeki basınç yükseltilerek yapılmıştır. En iyi performans gösteren vorteks tüpün geometrik yapısı; nozul kesit alanı  $0,002 \times 0,002 \text{ m}^2$  ve nozul sayısı 4 olan, L/D oranı 15 ve 5 mm çapındaki hareketli vidanın ucundaki açının  $30^\circ$  olduğu ve hareketli vidanın konumunun sıcak çıkışta olduğu vorteks tüpdür. Çalışma basıncı 200 kPa'dan başlanarak 420 kPa'a kadar 20 kPa aralıklarda yükseltilmiştir. Deneyler yapılırken akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilmiştir.

Deneylerde akışkan olarak hava kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, yüksek kapasiteli vidalı kompresör kullanılmıştır. Tüm deneylerde  $P_1$ ,  $T_{gir}$ ,  $T_{sck}$ ,  $T_{soğ}$ , sıcak çıkış tarafındaki manometrenin kolları arasındaki basınç farkı, soğuk çıkış tarafındaki manometrenin kolları arasındaki basınç farkı kullanılarak, ölçümler yapılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak,  $\Delta T_{sck}$ ,  $\Delta T_{soğ}$ ,  $\Delta T$ ,  $Q_{gir}$ ,  $\rho_{gir}$ ,  $\rho_{sck}$ ,  $\rho_{soğ}$ ,  $m_{gir}$ ,  $m_{sck}$ ,  $m_{soğ}$ ,  $V_{sck}$ ,  $V_{soğ}$ ,  $\xi$ ,  $1-\xi$  hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar dikkate alınarak şekiller çizilmiş ve bu şekillere göre yorumlar yapılarak öneriler getirilmiştir. Tezin ilgili bölümlerinde bu konulara yer verilmiştir.

#### 5.4. Deneysel Program

Çizelge 5.3-5.11'de yapılmış deneysel çalışmalar verilmiştir.

Çizelge 5.3. L/D=10; N=2, 4, 6; d=6 mm;  $\alpha=60^\circ$ ; hvk=L'de;  $P_{gir}=200-320 \text{ kPa}$

| L/D | N | $P_{gir}$ , kPa | d, mm | $\alpha$   | Hareketli vida konumu |
|-----|---|-----------------|-------|------------|-----------------------|
| 10  | 2 | 200-320         | 6     | $60^\circ$ | L                     |
| 10  | 4 | 200-320         | 6     | $60^\circ$ | L                     |
| 10  | 6 | 200-320         | 6     | $60^\circ$ | L                     |

Çizelge 5.4.  $L/D=15$ ;  $N=2, 4, 6$ ;  $d=6$  mm;  $\alpha=60^\circ$ ;  $hvk=L'$  de;  $P_{gir}=200-320$  kPa

| <b>L/D</b> | <b>N</b> | <b><math>P_{gir}</math>, kPa</b> | <b>d, mm</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b>Hareketli vida konumu</b> |
|------------|----------|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------------|
| 15         | 2        | 200-320                          | 6            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 4        | 200-320                          | 6            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 6        | 200-320                          | 6            | $60^\circ$                 | L                            |

Çizelge 5.5.  $L/D=18$ ;  $N=2, 4, 6$ ;  $d=6$  mm;  $\alpha=60^\circ$ ;  $hvk=L'$  de;  $P_{gir}=200-260$  kPa

| <b>L/D</b> | <b>N</b> | <b><math>P_{gir}</math>, kPa</b> | <b>d, mm</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b>Hareketli vida konumu</b> |
|------------|----------|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------------|
| 18         | 2        | 200-260                          | 6            | $60^\circ$                 | L                            |
| 18         | 4        | 200-260                          | 6            | $60^\circ$                 | L                            |
| 18         | 6        | 200-260                          | 6            | $60^\circ$                 | L                            |

Çizelge 5.6.  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6$  mm;  $\alpha=60^\circ$ ;  $hvk=L, L-1, L-2, L-3'$  de;  $P_{gir}=200-320$  kPa

| <b>L/D</b> | <b>N</b> | <b><math>P_{gir}</math>, kPa</b> | <b>d, mm</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b>Hareketli vida konumu</b> |
|------------|----------|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------------|
| 15         | 6        | 200-320                          | 6            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 6        | 200-320                          | 6            | $60^\circ$                 | L-1                          |
| 15         | 6        | 200-320                          | 6            | $60^\circ$                 | L-2                          |
| 15         | 6        | 200-260                          | 6            | $60^\circ$                 | L-3                          |

Çizelge 5.7.  $L/D=15$ ;  $N=2, 4, 6$ ;  $d=7$  mm;  $\alpha=60^\circ$ ;  $hvk=L'$ de;  $P_{gir}=200-320$  kPa

| <b>L/D</b> | <b>N</b> | <b><math>P_{gir}</math>, kPa</b> | <b>d, mm</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b>Hareketli vida konumu</b> |
|------------|----------|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------------|
| 15         | 2        | 200-320                          | 7            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 4        | 200-320                          | 7            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 6        | 200-320                          | 7            | $60^\circ$                 | L                            |

Çizelge 5.8.  $L/D=15$ ;  $N=2, 4, 6$ ;  $d=8$  mm;  $\alpha=60^\circ$ ;  $hvk=L'$ de;  $P_{gir}=200-320$  kPa

| <b>L/D</b> | <b>N</b> | <b><math>P_{gir}</math>, kPa</b> | <b>d, mm</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b>Hareketli vida konumu</b> |
|------------|----------|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------------|
| 15         | 2        | 200-320                          | 8            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 4        | 200-320                          | 8            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 6        | 200-320                          | 8            | $60^\circ$                 | L                            |

Çizelge 5.9.  $L/D=15$ ;  $N=2, 4, 6$ ;  $d=5$  mm;  $\alpha=60^\circ$ ;  $hvk=L'$ de;  $P_{gir}=200-320$  kPa

| <b>L/D</b> | <b>N</b> | <b><math>P_{gir}</math>, kPa</b> | <b>d, mm</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b>Hareketli vida konumu</b> |
|------------|----------|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------------|
| 15         | 2        | 200-320                          | 5            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 4        | 200-320                          | 5            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 6        | 200-320                          | 5            | $60^\circ$                 | L                            |

Çizelge 5.10.  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5$  mm;  $\alpha=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ ;  $hvk=L$ 'de;  $P_{gir}=200-320$  kPa

| <b>L/D</b> | <b>N</b> | <b><math>P_{gir}</math>, kPa</b> | <b>d, mm</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b>Hareketli vida konumu</b> |
|------------|----------|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------------|
| 15         | 4        | 200-320                          | 5            | $30^\circ$                 | L                            |
| 15         | 4        | 200-320                          | 5            | $60^\circ$                 | L                            |
| 15         | 4        | 200-320                          | 5            | $90^\circ$                 | L                            |
| 15         | 4        | 200-320                          | 5            | $120^\circ$                | L                            |
| 15         | 4        | 200-320                          | 5            | $150^\circ$                | L                            |
| 15         | 4        | 200-320                          | 5            | $180^\circ$                | L                            |

Çizelge 5.11.  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5$  mm;  $\alpha=30^\circ$ ;  $hvk=L$ 'de;  $P_{gir}=200-420$  kPa

| <b>L/D</b> | <b>N</b> | <b><math>P_{gir}</math>, kPa</b> | <b>d, mm</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b>Hareketli vida konumu</b> |
|------------|----------|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------------|
| 15         | 4        | 200-420                          | 5            | $30^\circ$                 | L                            |

Burada sunulmuş olan deneysel çalışmalardan  $L/D=15$ ,  $N=4$ ,  $d=6$  mm,  $P_{gir}=320$  kPa  $L/D=15$ ,  $N=4$ ,  $d=6$  mm,  $P_{gir}=320$  kPa ait deneysel çalışmaya ait örnek bir hesaplama Ek-7'de verilmiştir.

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Vorteks tüplerden, farklı sıcaklıkta iki akışkan elde edilmektedir. Bunlar sıcak ve soğuk akışkandır. Sıcak ve soğuk akışkanın sıcaklığını etkileyen bir çok faktör vardır. Vorteks tüpün uzunluğunun tüp çapına oranı, nozul sayısı, akışkanın vorteks tüpe girişteki hızı ve basıncı bunlardan bazılarıdır.

Bu çalışma, değişik geometrik yapılardaki karşıt akışlı vorteks tüplerin performanslarını araştırmak için yapılmıştır. Vorteks tüplerin performanslarını incelemek amacıyla kurulan sistemde, soğuk-sıcak ayrışma olayının etkisinin deneysel olarak incelenmesi için, soğuk akımın girişteki akıma oranı olan  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde deneyler yapılmıştır (Bkz. Çizelge 1.1).

Deneyler yapılırken, girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hızlar ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplardan yararlanılarak, sıcak akışkanın sıcaklığı ile girişteki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark ( $\Delta T_{sck} = T_{sck} - T_{sgk}$ ), soğuk akışkanın sıcaklığı ile girişteki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark ( $\Delta T_{soğ} = T_{soğ} - T_{gir}$ ), sıcak akışkanın sıcaklığı ile soğuk akışkanın sıcaklığı arasındaki fark ( $\Delta T = T_{sck} - T_{soğ}$ )'ın iki boyutsuz büyüklük olan  $L/D$  ve  $\xi$ 'ye göre değişimi dikkate alınarak şekiller oluşturulmuştur. Şekiller, çalışma basıncının yükseltilmesiyle, vorteks tüp geometrik yapısının performansını göstermektedir.

Karşıt akışlı vorteks tüplerin performansını araştırmak amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda öncelikle; iç çapı 9 mm ve uzunluğunun çapa oranı 10, 15, 18 olan 3 tane Ranque-Hilsch vorteks tüp, ucundaki açısı  $60^\circ$  ve 6 mm çapında olan hareketli bir vida imal edilmiştir. Vorteks tüplere hava girişi 2, 4, 6 nozul ile verilmiş ve deneysel çalışmalarda akışkan olarak hava kullanılmıştır. Hareketli vida sıcak çıkışta bırakılarak en iyi performans gösteren vorteks tüp gövdesi, deneysel olarak tespit edilmiştir.

En iyi performans gösteren geometrik yapıdaki vorteks tüpte ( $L/D=15$ ), hareketli vida sıcak çıkıştan itibaren 1'er cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettirilerek en iyi performans gösteren hareketli vida konumu tespit edilmiştir. Bu çalışmada hava vorteks tüpe 6 nozul ile sağlanmıştır.

En iyi performans gösteren  $L/D$  oranı, hareketli vida konumu sıcak çıkışta ( $L$ ), hareketli vidanın ucundaki açı ( $60^\circ$ ) sabit tutulmuş ve hareketli vida çapı 5, 7 ve 8 mm'de, değişik nozul sayılarında (2, 4, 6) vorteks tüpün performansı araştırılmıştır.

En iyi hareketli vida çapının, deneysel incelemeler sonucunda 5 mm olduğu görülmüştür. 5 mm çapındaki hareketli vida çapının ucundaki açı  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  ve  $180^\circ$  olarak değiştirilerek,  $L/D$ 'nin 15 nozul sayısının 4 ve hareketli vida tam sıcak çıkışa monte edilerek basıncın etkisinin  $\xi$ 'ye göre etkinliği deneysel olarak incelenmiştir.

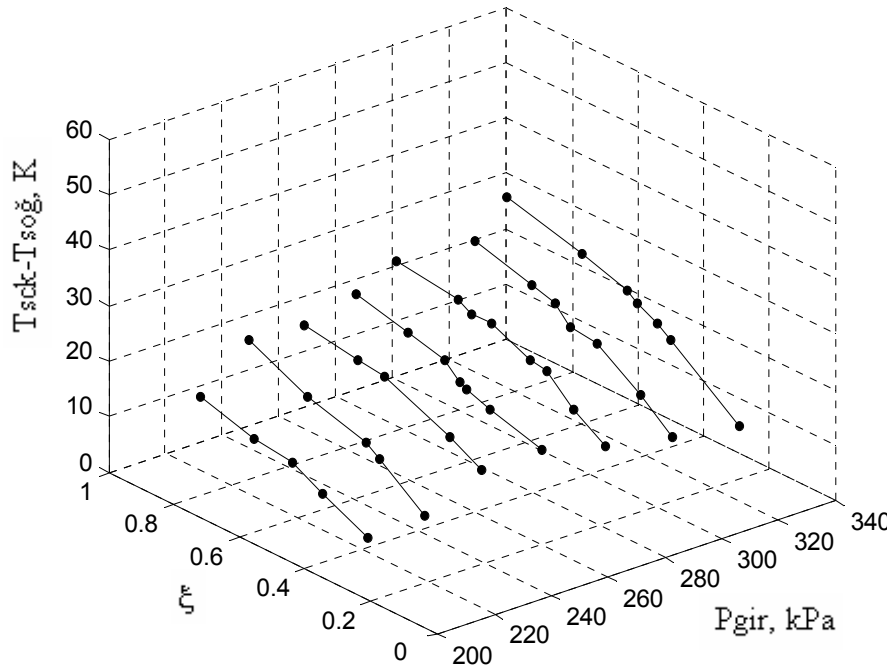
Vorteks tüpe girişteki hava basıncı 200 kPa'dan başlanılarak 20 kPa aralıklarla 320 kPa'a kadar yükseltilerek, giriş akımının ve çıkış akımlarının hız ve sıcaklık ölçümleri kullanılarak vorteks tüplerin performansı deneysel olarak araştırılmıştır. En iyi performans gösteren vorteks tüpü geometrisi tespit edildikten sonra basıncın etkisi deneysel olarak incelenerek bu bölümde sunulmuştur.

### **6.1. $L/D$ Oranının Vorteks Tüp Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi**

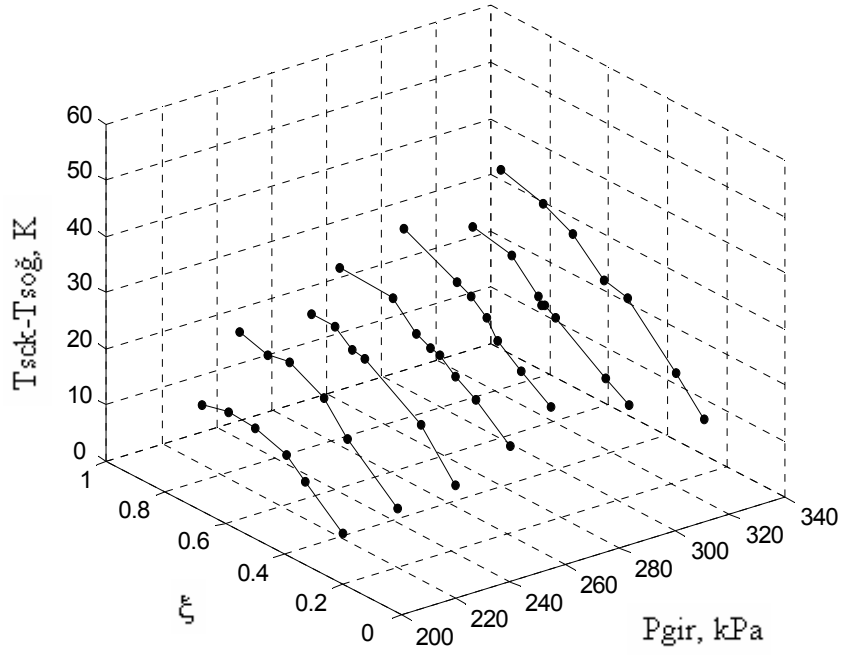
Bu deneysel çalışma, maksimum performans gösteren  $L/D$ 'yi tespit etmek için yapılmıştır. Deneysel sistemde kullanılan vorteks tüpün çapı ( $D$ ) 9 mm ve soğuk çıkış çapı ( $d_{soğ}$ ) 5 mm'dir. Vorteks tüp gövdelerinin uzunlukları ( $L$ ) ise  $10D$ ,  $15D$  ve  $18D$ 'dir. Bu çalışmada kullanılmış olan nozulun kesit alanı  $0,002 \times 0,002 \text{ m}^2$  ve 2, 4, 6 adettir. Hareketli vida sıcak çıkışta ( $L$  konumunda), hareketli vida ucundaki açı  $60^\circ$  ve çapı 6 mm'dir. Vorteks tüp girişindeki basınç 200 kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla 320 kPa'a kadar yükseltilerek deneyler yapılmıştır. Deneyler yapılırken, girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hızlar ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde

edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır.  $\Delta T_{\text{çek}}$ ,  $\Delta T_{\text{soğ}}$  ve  $\Delta T$ 'nin  $\xi$  ile değişimi dikkate alınarak şekiller oluşturulmuştur (Şekil 6.1-6.12). Şekiller, çalışma basıncının yükseltilmesiyle, vorteks tüp geometrik yapısının performansını göstermektedir.

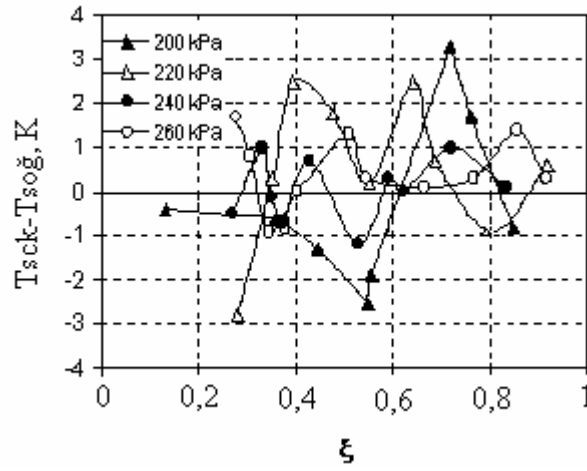
Şekil 6.1-6.9 sırasıyla  $L/D=10, 15, 18$  ve nozul sayısı 2, 4, 6 olan vorteks tüplerde, girişteki basıncın 200 kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla yükseltilmesiyle  $\Delta T$ 'nin,  $\xi$  ile değişimi verilmiştir. Sistem girişindeki basınç artarken nozullardaki hızın da artması beklenir. Yapılmış olan deneylerde de bu durum görülmüştür. Basınç yükselirken kütle debisinin de yükseldiği deneysel olarak gözlenmiştir. Vorteks tüplerin performansları durma noktasının yerine göre değişmektedir. Durma noktasının yeri ise vorteks tüplerin geometrik yapısıyla ilgilidir.



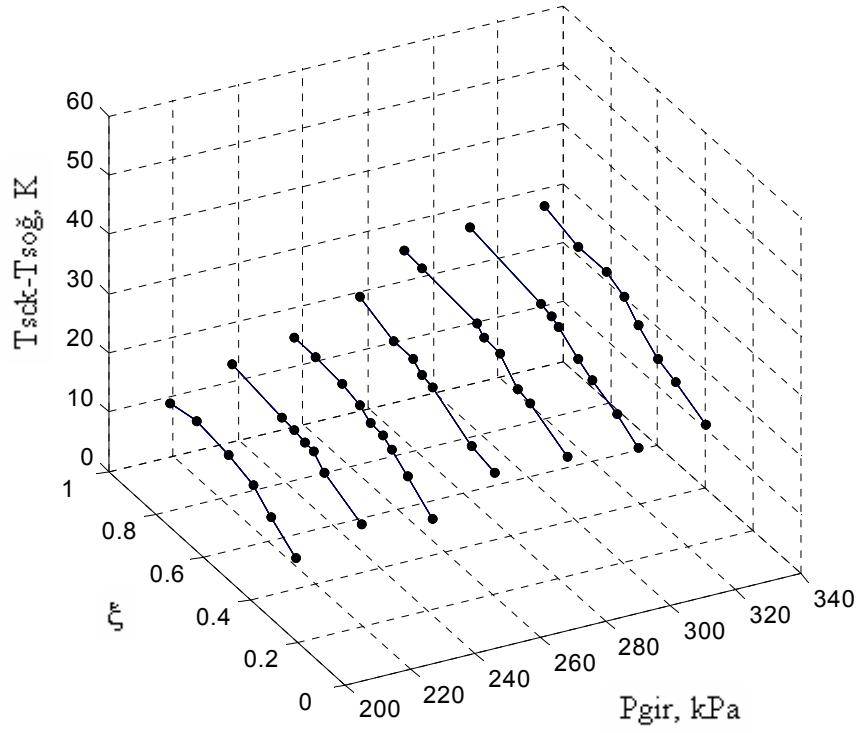
Şekil 6.1.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{\text{gir}}$  ile değişimi,  $L/D=10$ ;  $N=2$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



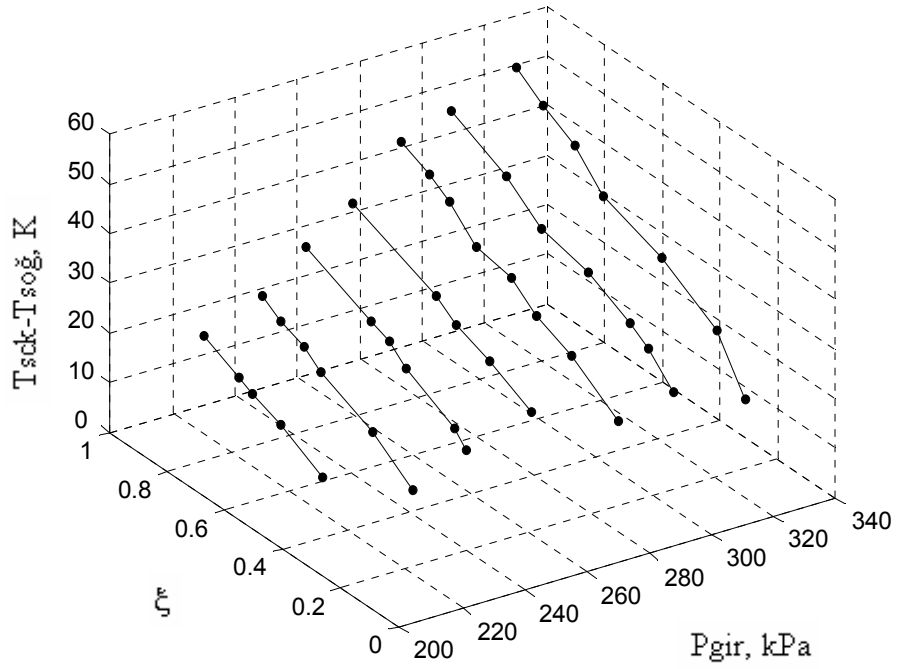
Şekil 6.2.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=2$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



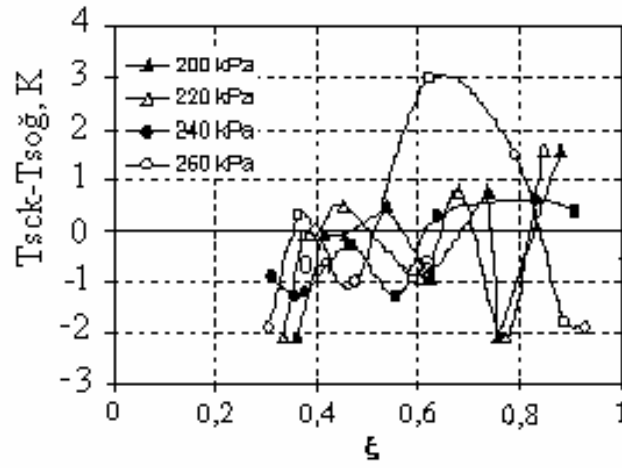
Şekil 6.3.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=18$ ;  $N=2$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



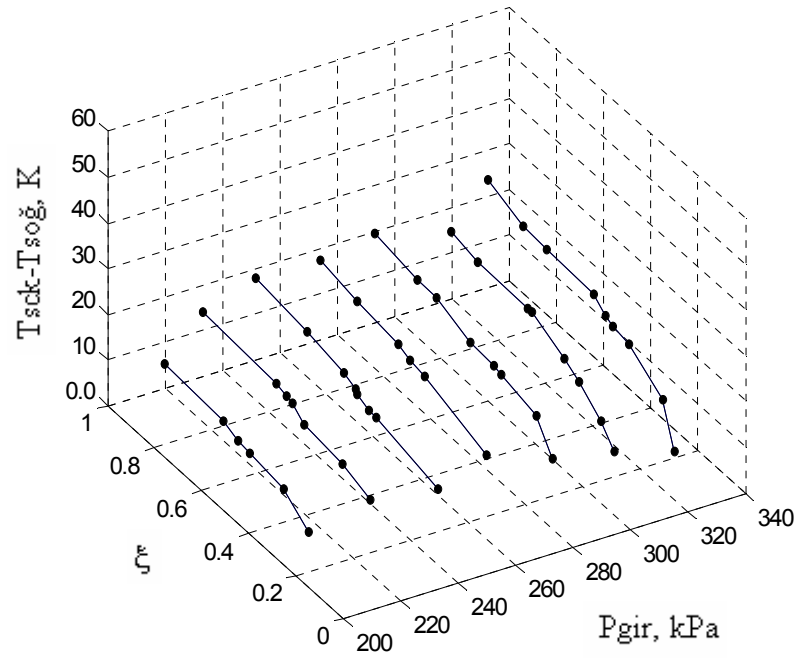
Şekil 6.4.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=10$ ;  $N= 4$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



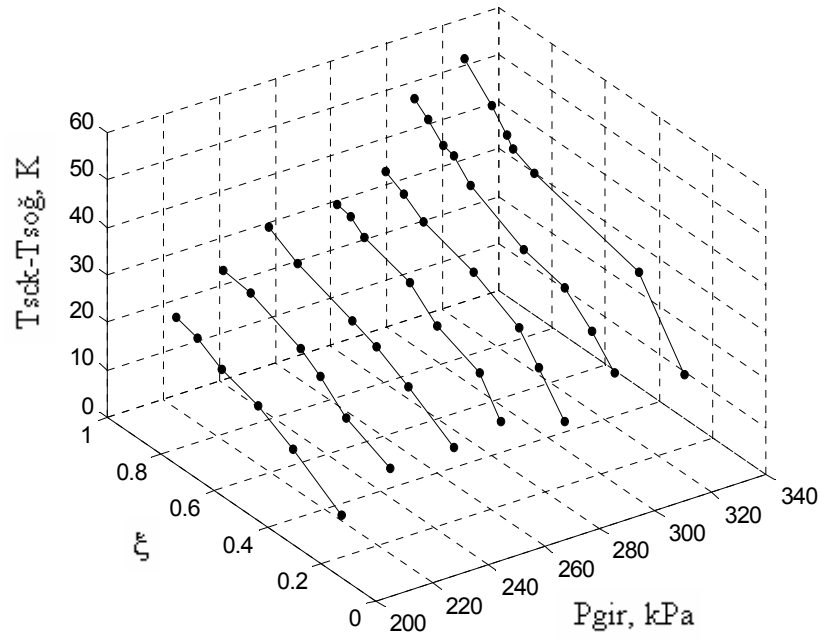
Şekil 6.5.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N= 4$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



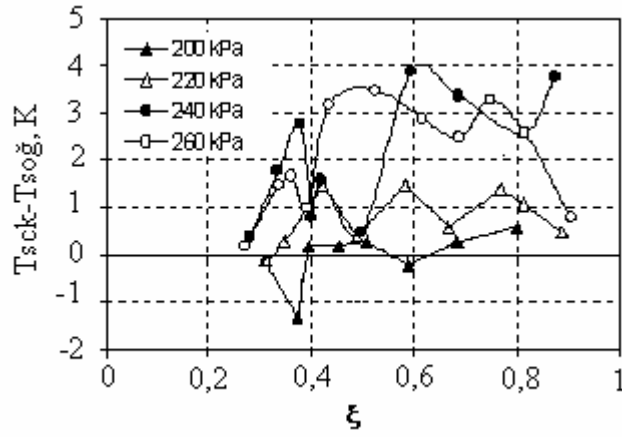
Şekil 6.6.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=18$ ;  $N=4$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



Şekil 6.7.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=10$ ;  $N=6$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



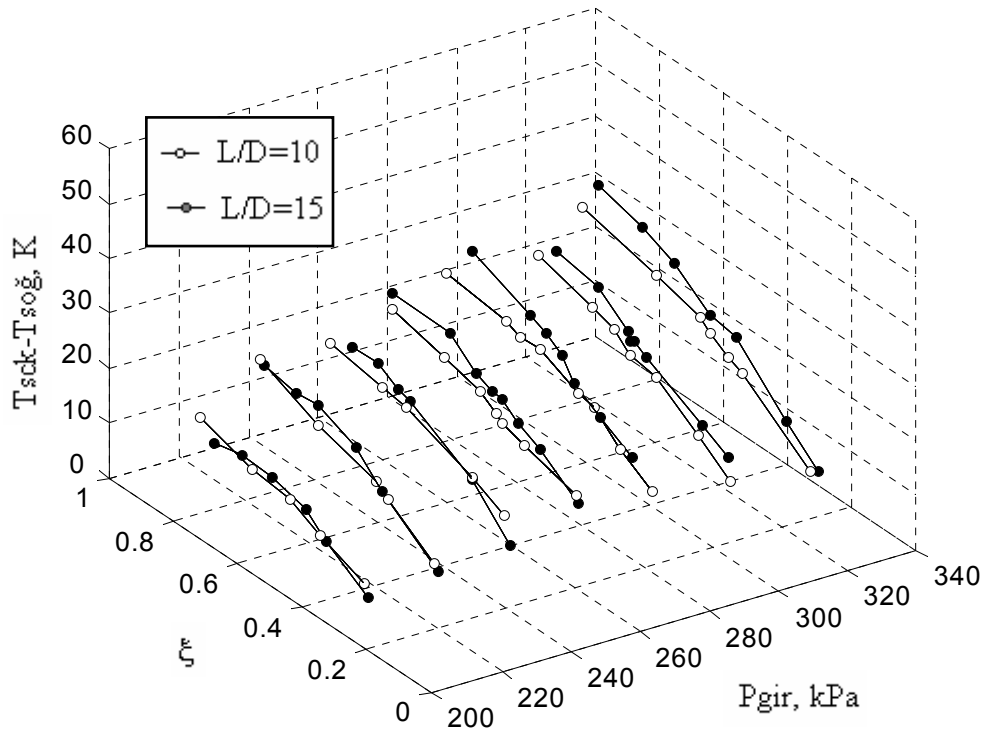
Şekil 6.8.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N= 6$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



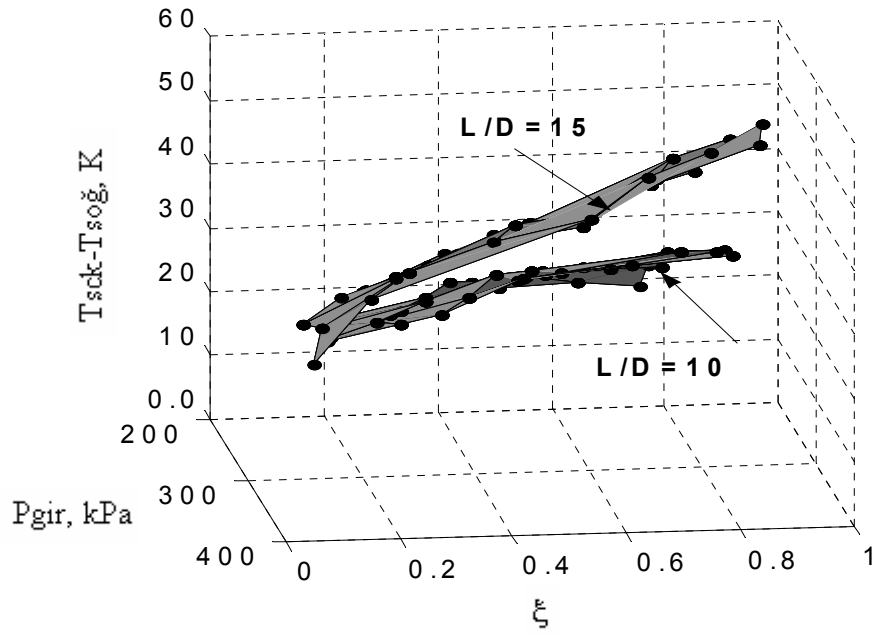
Şekil 6.9.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=18$ ;  $N= 6$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de

Deneysel sonuçların incelenmesinden sıcak ve soğuk akımların sıcaklıkları arasındaki farkın en fazla 56 K olduğu belirlenmiştir. Vorteks tüpün uzunluğunun çapa oranının 18 olduğunda çıkış akımları arasındaki sıcaklık farkının bu akımların akış hızlarına ve giriş basıncına göre çok düzensiz davranış gösterdiği tespit

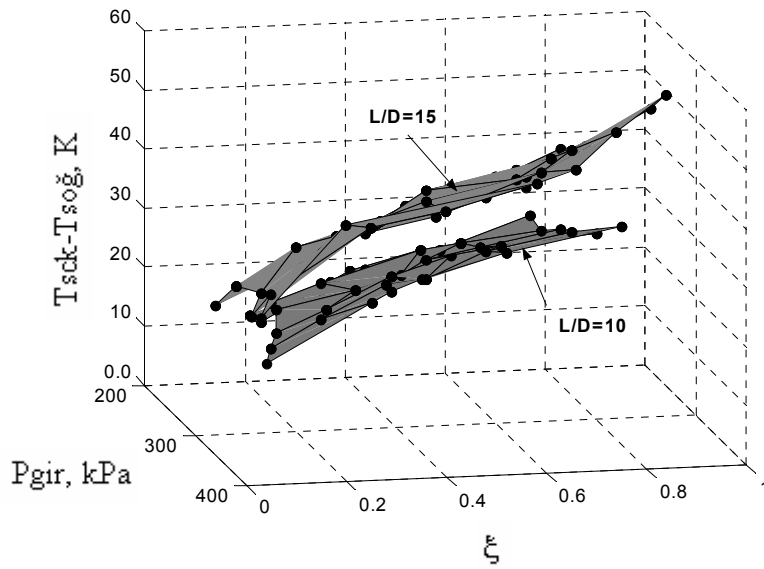
edilmiştir. Buna karşılık vorteks tüpün uzunluğunun çapa oranının 10 ve 15 olduğu durumlarda çıkış akımları sıcaklıkları arasındaki farkın soğuk akımın akış hızıyla ve girişteki basıncın artması ile düzenli bir şekilde arttığı belirlenmiştir. En iyi  $\Delta T$ ,  $L/D=15$  olan geometrik yapıdaki vorteks tüpde oluşmuştur (Şekil 6.10-6.12). Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, vorteks tüpün uzunluğunun çapa oranının 15 olmasının, giriş basıncının mümkün olduğunca yüksek olmasının önerilebileceği ve istenen sıcaklıklara, sıcak çıkış akımının hızını kontrol ederek ulaşılabileceği anlaşılmıştır.



Şekil 6.10.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=10, 15$ ;  $N=2$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



Şekil 6.11.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=10, 15$ ;  $N=4$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



Şekil 6.12.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=10, 15$ ;  $N=6$ ;  $d=6$ ;  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de

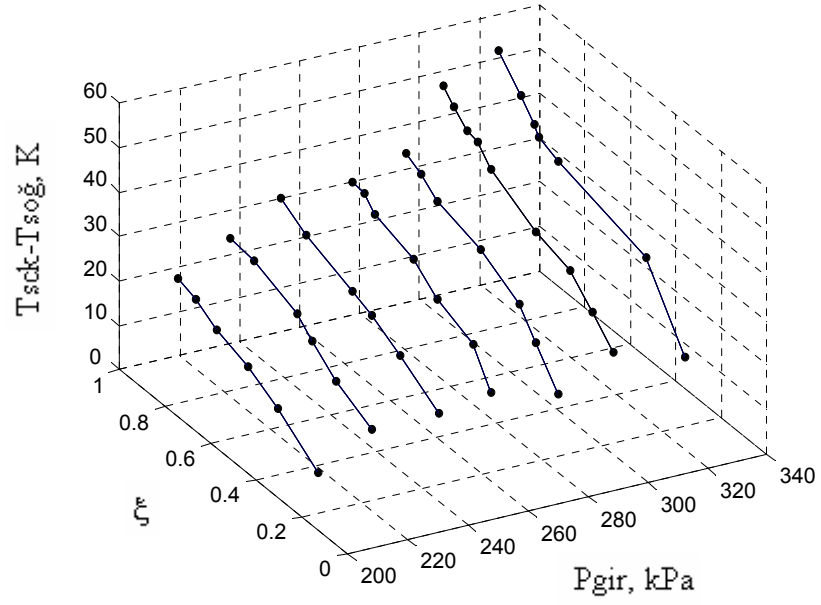
## 6.2. Hareketli Vida Konumunun Vorteks Tüp Performansına Etkisinin DeneySEL İncelenmesi

Bu çalışma, vorteks tüplerde, en iyi performans gösteren hareketli vida konumunu tespit etmek için yapılmıştır. DeneySEL sistemde kullanılan vorteks tüpün çapı 9 mm ve soğuk çıkış çapı 5 mm'dir. Vorteks tüp gövdesinin uzunluğu 15D'dir. Nozulun kesit alanı  $0,002 \times 0,002 \text{ m}^2$  ve nozul sayısı 6'dır. Hareketli vidanın ucundaki aç 60° ve çapı 6 mm'dir. Hareketli vida sıcak çıkıştan itibaren 1'er cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettirilerek en iyi performans gösteren hareketli vida konumu deneySEL olarak tespit edilmiştir.

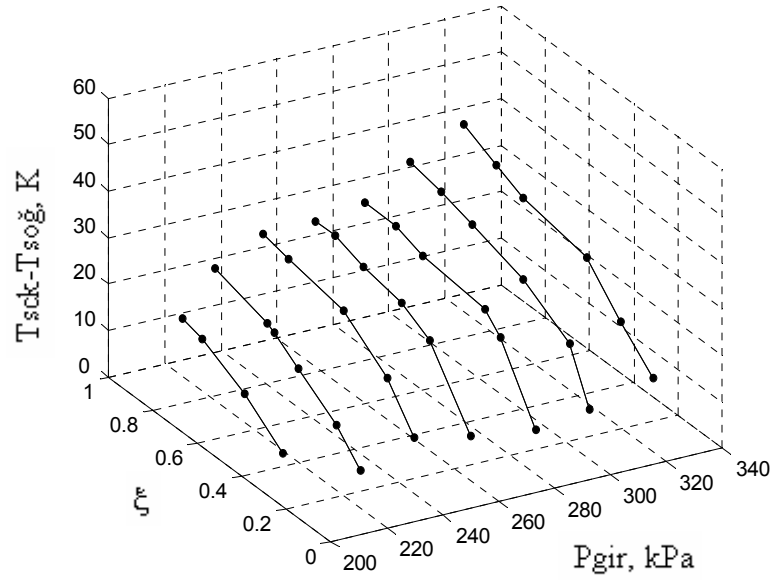
Hareketli vidanın, tam sıcak çıkıştaki konumu L olarak isimlendirilmiştir. L-1 konumu, sıcak çıkıştan 1cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettirildiği konumdur. L-2 konumu, sıcak çıkıştan 2 cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettirildiği konumdur. L-3 konumu ise sıcak çıkıştan 3 cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettirildiği konumdur. L, L-1, L-2 olan geometrik yapıdaki sistemlerde 200 kPa'dan başlayarak 320 kPa'a kadar deneySEL çalışma yapılmıştır. L-3 olan sistemde ise giriş basıncının 200 kPa' dan 20 kPa aralıklarla 280 kPa'a kadar deneyler yapılmıştır. Bu basıncın üzerine çıkılmamıştır.

Deneyler yapılırken, girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hızlar ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır ve bu hesaplamalardan yararlanılarak  $\Delta T$ 'ın  $\xi$  ile değişimi dikkate alınarak şekiller oluşturulmuştur (Şekil 6.8-6.15). Şekiller, çalışma basıncının yükseltilmesiyle, hareketli vida konumlarının performanslarını göstermektedir.

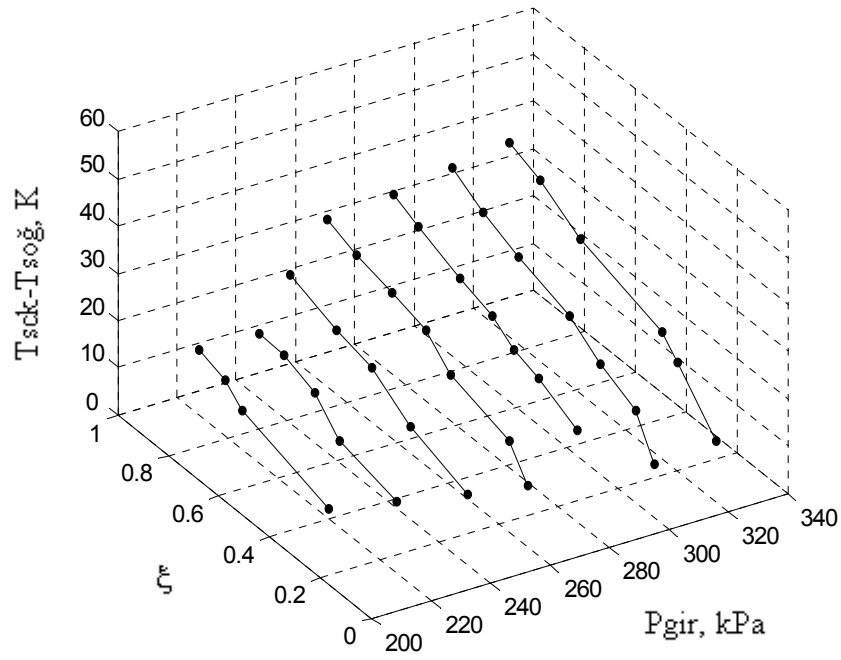
Şekil 6.8-6.15 sırasıyla  $L/D=15$  ve nozul sayısı 6 olan vorteks tüpde, girişteki basıncın 200 kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla yükseltilmesiyle, hareketli vidanın sıcak çıkıştan itibaren 1'er cm soğuk çıkış tarafına doğru hareket ettirilmesiyle  $\Delta T$  nin,  $\xi$  ile değişimleri verilmiştir.



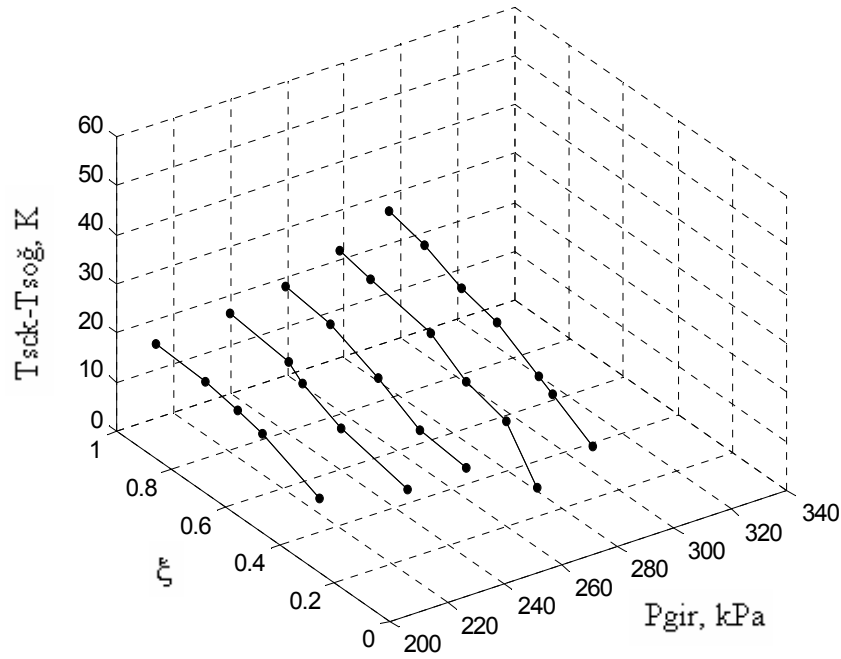
Şekil 6.8.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu=  $L$ 'de



Şekil 6.13.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6\text{mm}$ ; hareketli vida konumu=  $L-1$ 'de

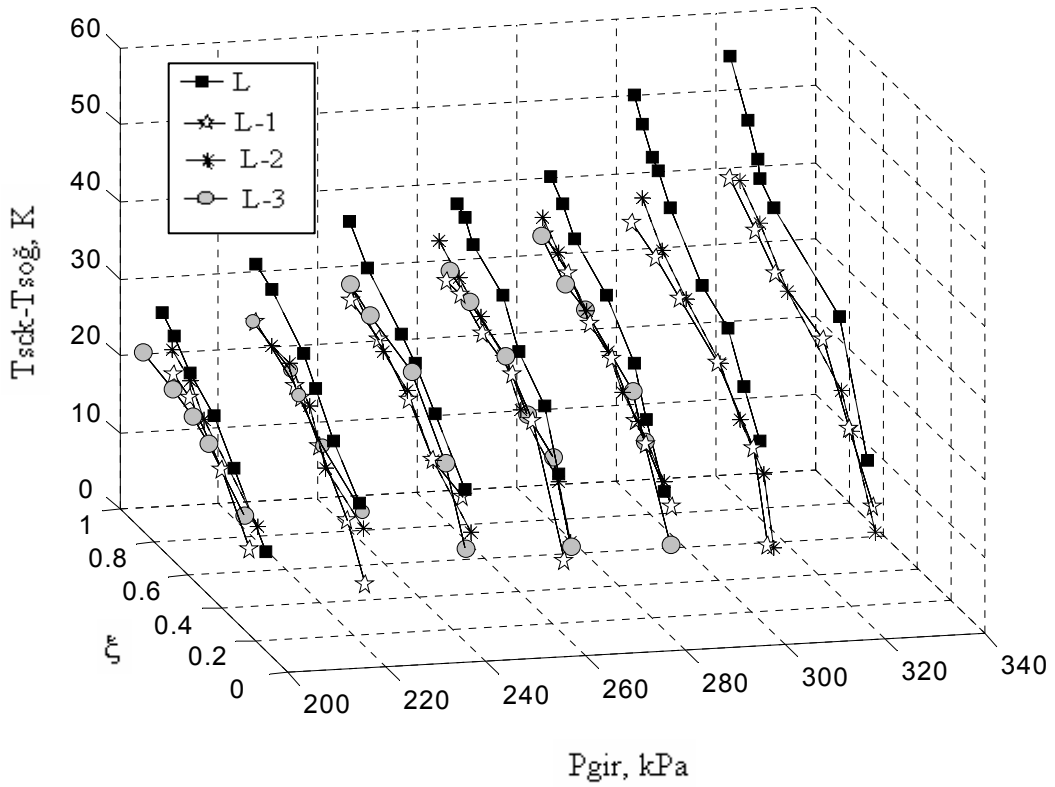


Şekil 6.14.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6mm$ ; hareketli vida konumu= L-2'de



Şekil 6.15.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=6mm$ ; hareketli vida konumu= L-3'de

Şekil 6.16'da, 6 mm çapında olan hareketli vidanın sıcak çıkışta bırakılarak, uzunluğunun çapa oranının 15 olduğu vorteks tüpde ve hareketli vidanın sıcak çıkıştan itibaren 1'er cm soğuk çıkışa doğru hareket ettirilerek yapılmış olan deneysel verilerden hesaplanmış olan  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde ki  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimleri verilmiştir. Deneysel sonuçların incelenmesinden sıcak ve soğuk çıkan akımın sıcaklıkları arasındaki fark, en fazla  $L/D$ 'nin 15 olduğu ve hareketli vida konumunun tam sıcak çıkışta olduğu durumda deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bu fark 320 kPa giriş basıncında  $\xi$ 'nin 0,92 değerinde 56,23K'dir.

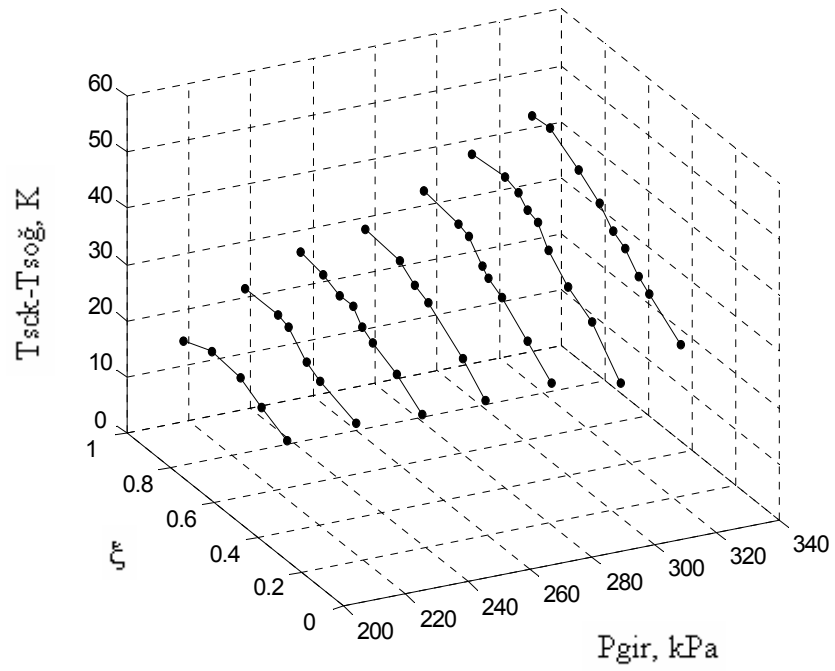


Şekil 6.16.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D = 15$ ;  $N = 6$ ;  $d = 6mm$ ; hareketli vida konumu = L, L-1, L-2, L-3'de

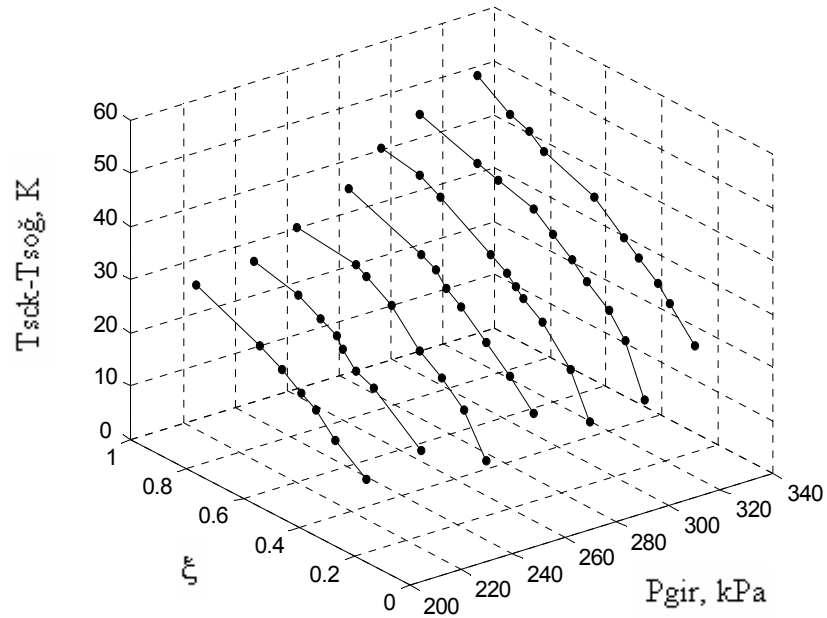
Deneysel sonuçlardan yararlanılarak oluşturulan şekiller değerlendirildiğinde, hareketli vidanın sıcak çıkışta bırakılarak, vorteks tüp uzunluğunun çapa oranının 15 olmasının daha etkin olduğu deneysel olarak görülmüştür.

### 6.3. Hareketli Vida Çapının Vorteks Tüp Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi

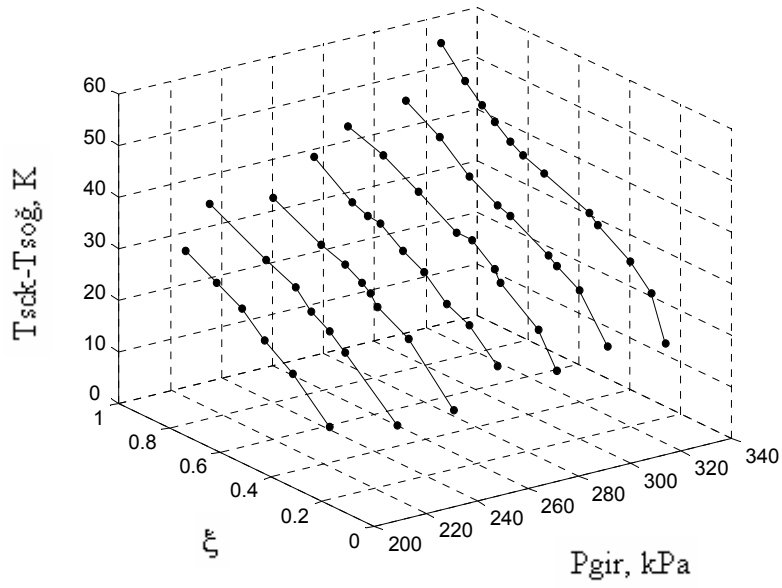
Bu çalışma, vorteks tüplerde, en iyi performans gösteren hareketli vida çapını tespit etmek için yapılmıştır. Deneysel sistemde kullanılan vorteks tüp gövdesinin uzunluğu  $15D$ 'dir. 5, 6, 7, 8 mm çaplarında dört farklı vida ve nozul kesit alanı  $0,002 \times 0,002 \text{ m}^2$  olan 2, 4, 6 nozullarla, hareketli vidalar sıcak çıkışta bırakılarak deneyler yapılmıştır. Hareketli vidaların ucundaki açılar ise  $60^\circ$ 'dir. Deneyler yapılırken, girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hızlar ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır ve bu hesaplamalardan yararlanılarak  $\Delta T$ 'nin  $\xi$  ile değişimi dikkate alınarak şekiller oluşturulmuştur. Şekil 6.17-6.25 sırasıyla  $L/D=15$ , nozul sayısı 2, 4, 6 olan ve  $60^\circ$ 'lik konik uca sahip olan hareketli vidanın sıcak çıkışta bırakılarak, girişteki basıncın 200 kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla yükseltilmesiyle  $\Delta T$  nin,  $\xi$  ile değişimleri verilmiştir. Şekiller, çalışma basıncının yükseltilmesiyle 2, 4, 6 nozuldaki, hareketli vida çaplarının (5, 6, 7, 8 mm) performansını göstermektedir.



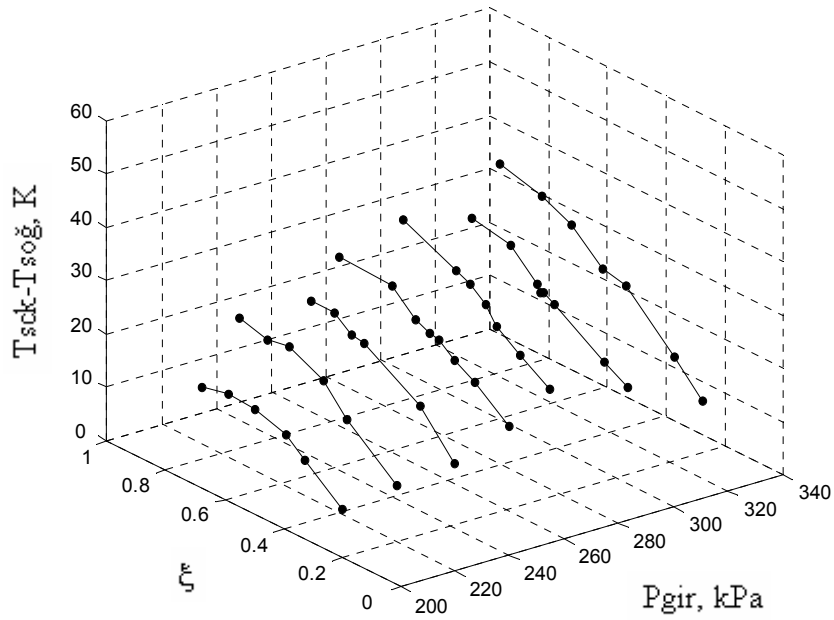
Şekil 6.17.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=5\text{mm}$ ;  $N=2$ ; hareketli vida konumu=L'de



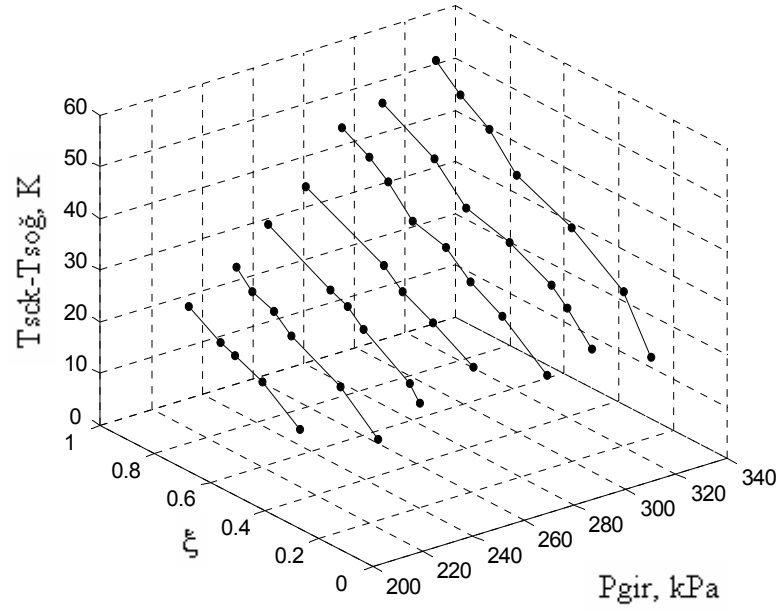
Şekil 6.18.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=5\text{mm}$ ;  $N=4$ ; hareketli vida konumu=L'de



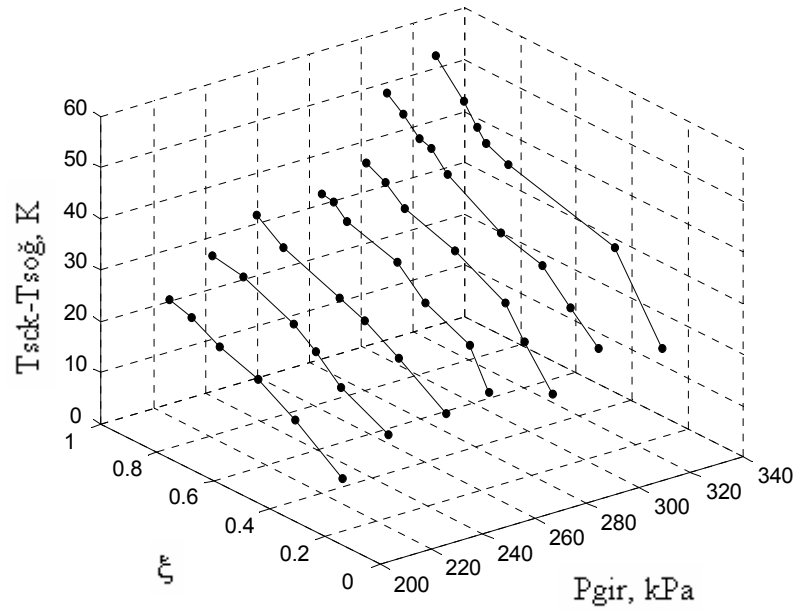
Şekil 6.19.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=5\text{mm}$ ;  $N=6$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



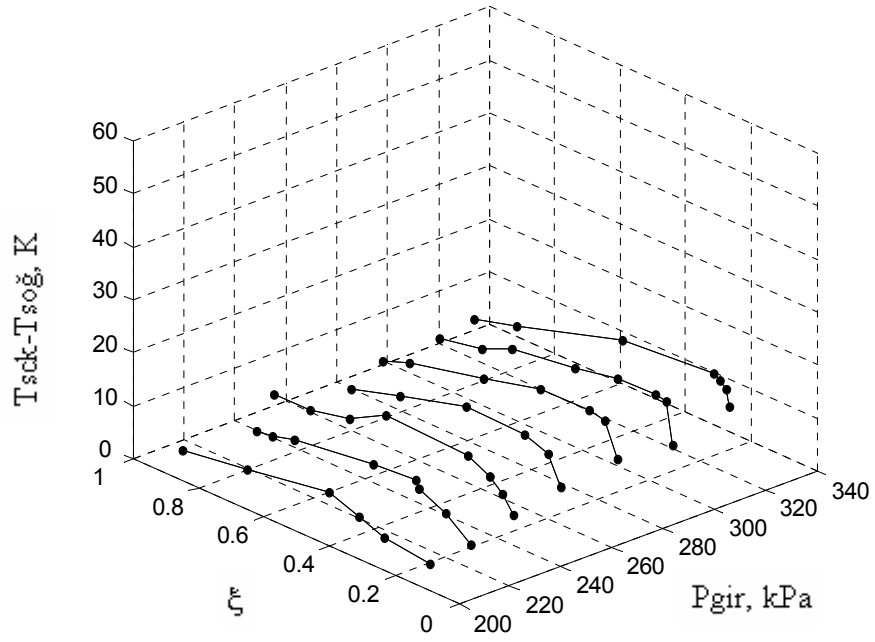
Şekil 6.2.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=6\text{mm}$ ;  $N=2$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



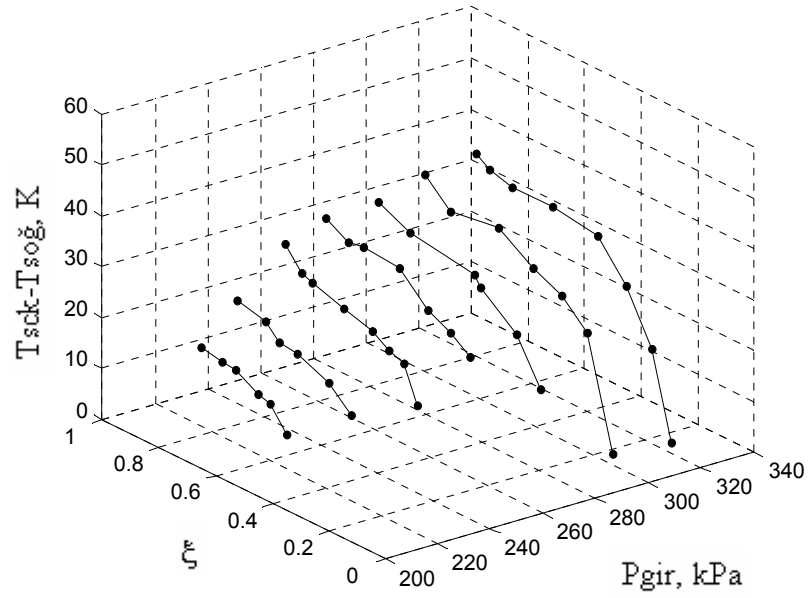
Şekil 6.5.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=6\text{mm}$ ;  $N=4$ ; hareketli vida konumu=L'de



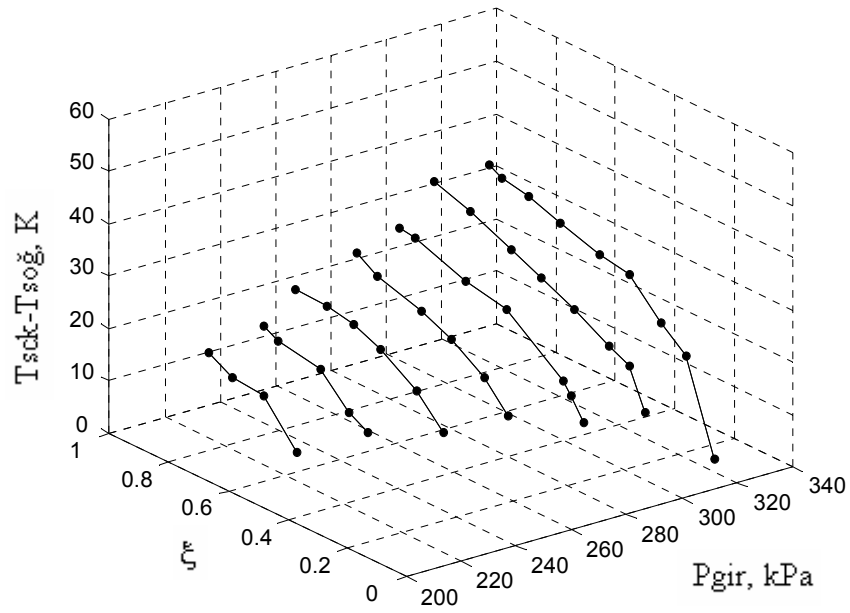
Şekil 6.8.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=6\text{mm}$ ;  $N=6$ ; hareketli vida konumu=L'de



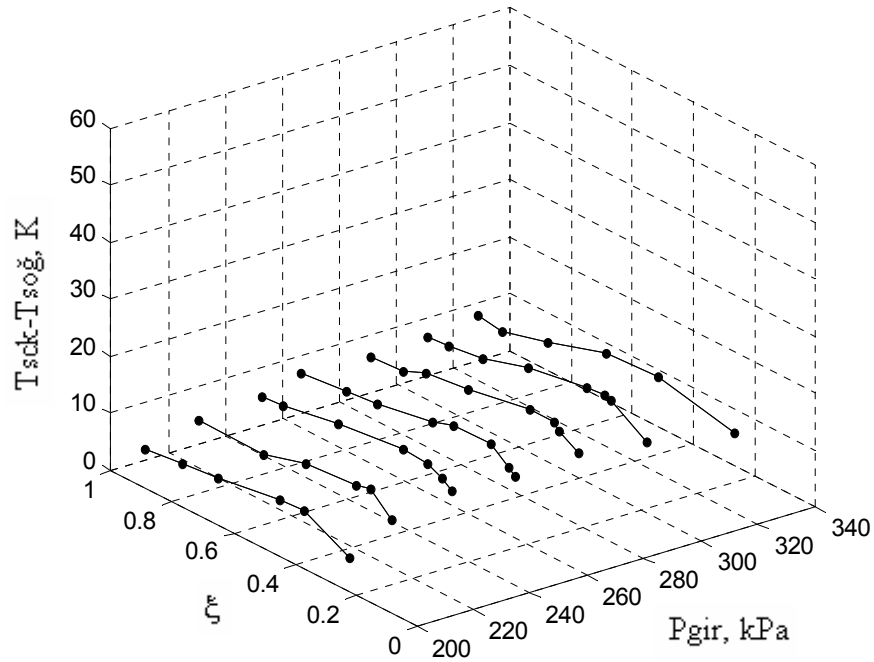
Şekil 6.20.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=7\text{mm}$ ;  $N=2$ ; hareketli vida konumu=L'de



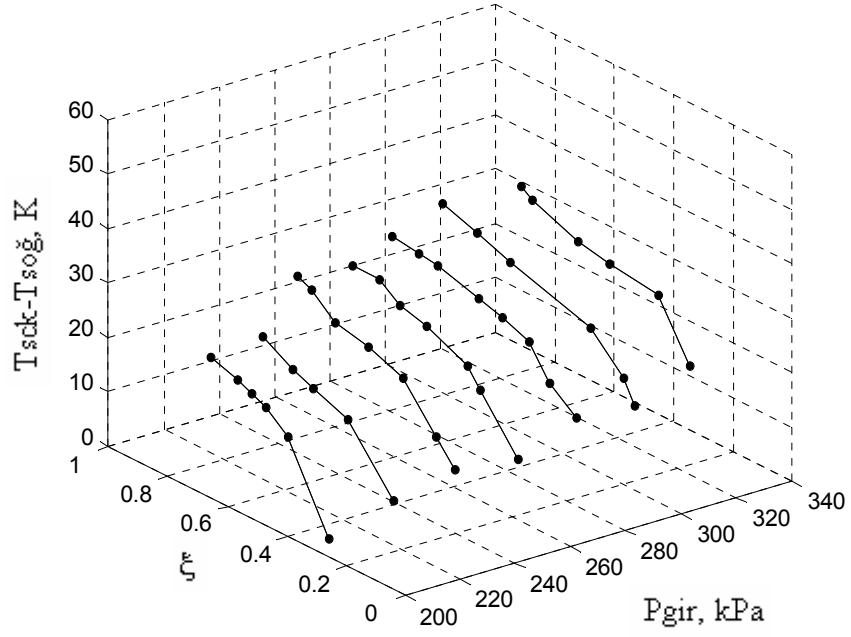
Şekil 6.21.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=7\text{mm}$ ;  $N=4$ ; hareketli vida konumu=L'de



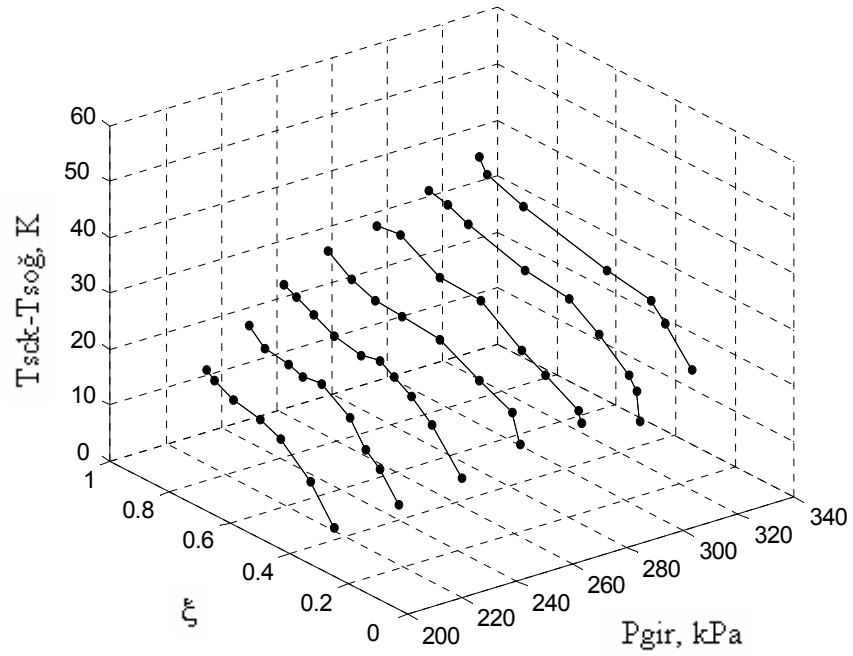
Şekil 6.22.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=7\text{mm}$ ;  $N=6$ ; hareketli vida konumu=L'de



Şekil 6.23.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=8\text{mm}$ ;  $N=2$ ; hareketli vida konumu=L'de

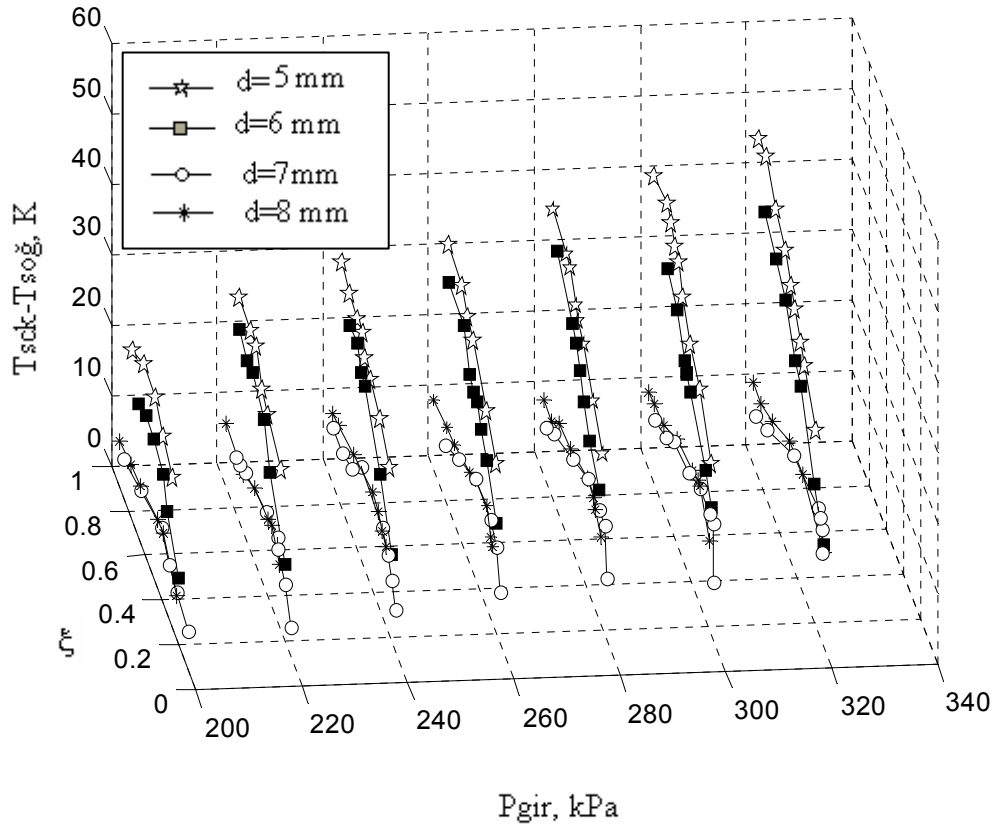


Şekil 6.24.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=8\text{mm}$ ;  $N=4$ ; hareketli vida konumu=  $L$ 'de

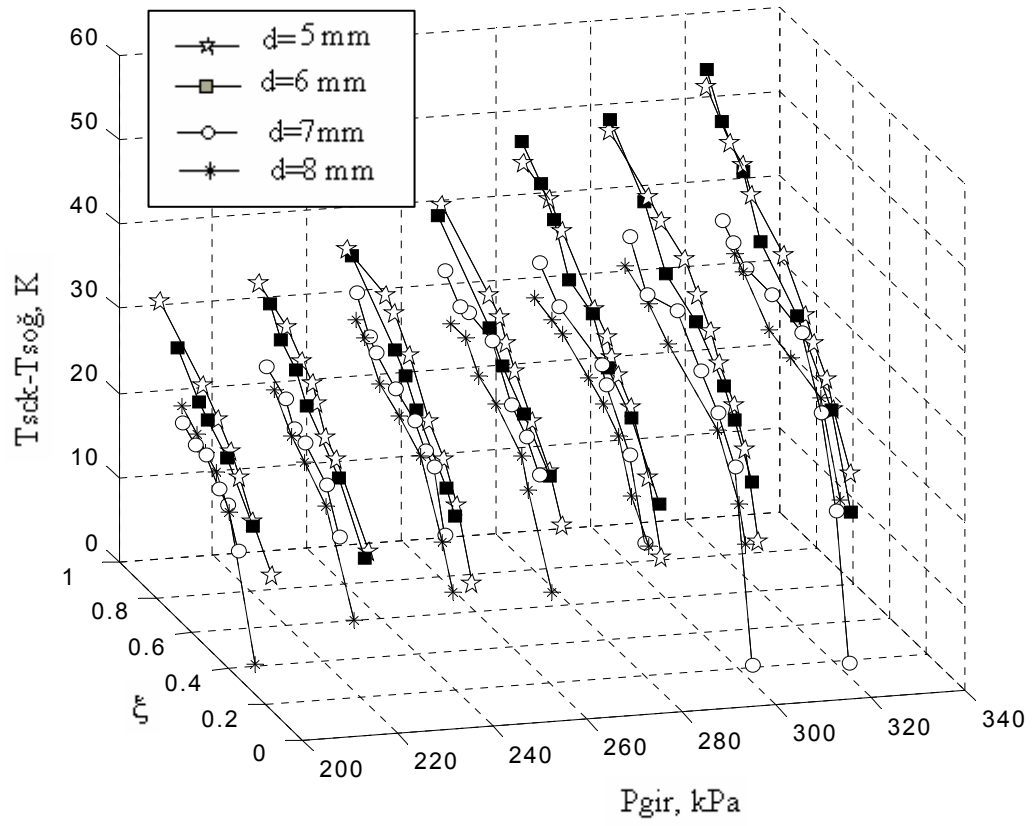


Şekil 6.25.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=8\text{mm}$ ;  $N=6$ ; hareketli vida konumu=  $L$ 'de

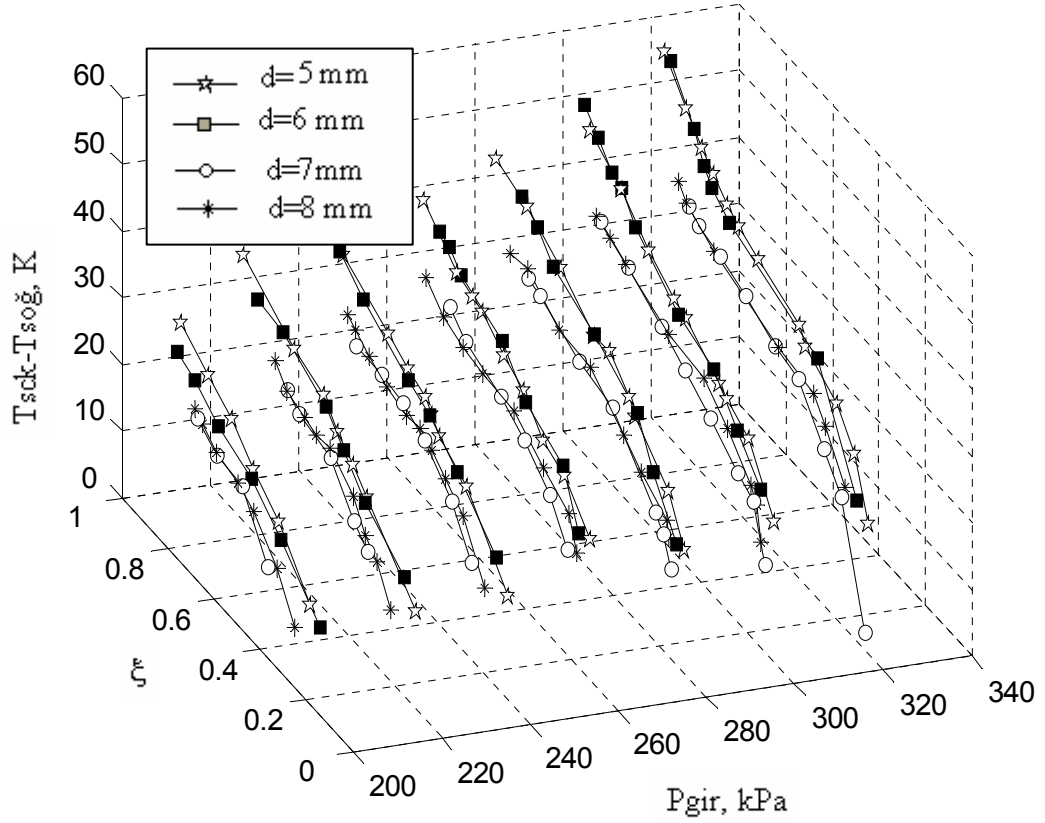
Sistem girişindeki basınç artarken nozullardaki hızda artmıştır. Eşit nozul sayısındaki vorteks tüpte, hareketli vida çapları değiştikçe vorteks tüpün performansıda değişmiştir. Bunlardan en belirginini, 2 nozullu vorteks tüpte görülmüştür. 2 nozullu vorteks tüpte vida çapı 5 ve 6 mm olduğu vorteks tüpün performansı, vida çapının 7 ve 8 olduğu vorteks tüpün performansından daha yüksek olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir. Yukardaki tüm şekiller değerlendirildiğinde, sıcak ve soğuk çıkan akımın sıcaklıkları arasındaki fark en fazla hareketli vida çapının 5 mm olduğu vorteks tüpte oluşmuştur (Şekil 6.26-6.28). Sıcak çıkış kesit alanı büyüdükçe yani hareketli vida çapı küçüldükçe, vorteks tüp performansı artmıştır.



Şekil 6.26.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D = 15$ ;  $d = 5, 6, 7, 8$  mm;  $N = 2$ ; hareketli vida konumu =  $L$ 'de



Şekil 6.27.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=5, 6, 7, 8 \text{ mm}$ ;  $N=4$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de



Şekil 6.28.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $d=5, 6, 7, 8$  mm;  $N=6$ ; hareketli vida konumu=  $L$ 'de

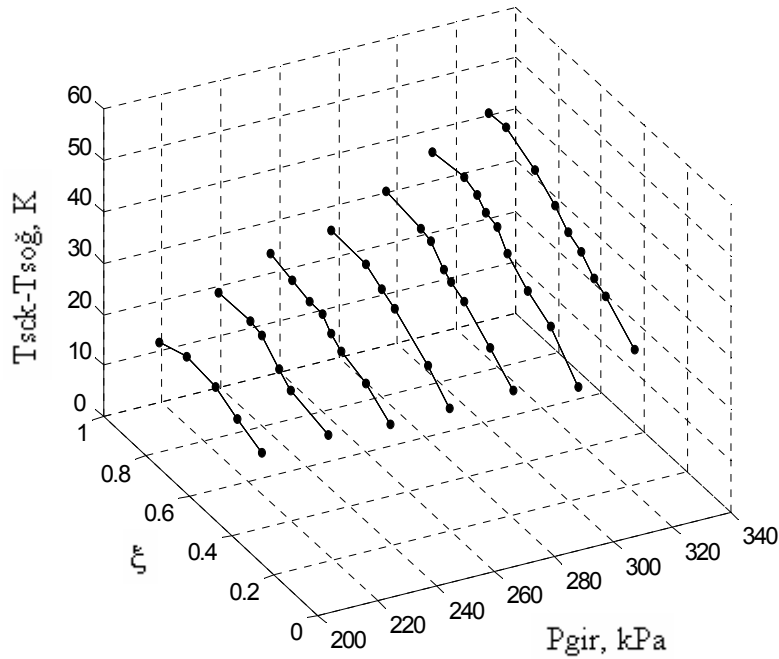
Deneysel sonuçlardan yararlanılarak oluşturulan şekiller değerlendirildiğinde, hareketli vida çapının 5 mm olması ve sıcak çıkış konumunda bırakılması, vorteks tüp uzunluğunun çapa oranının 15 olmasının daha etkin olduğu deneysel olarak görülmüştür.

#### 6.4. Nozul Sayısının Vorteks Tüp Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi

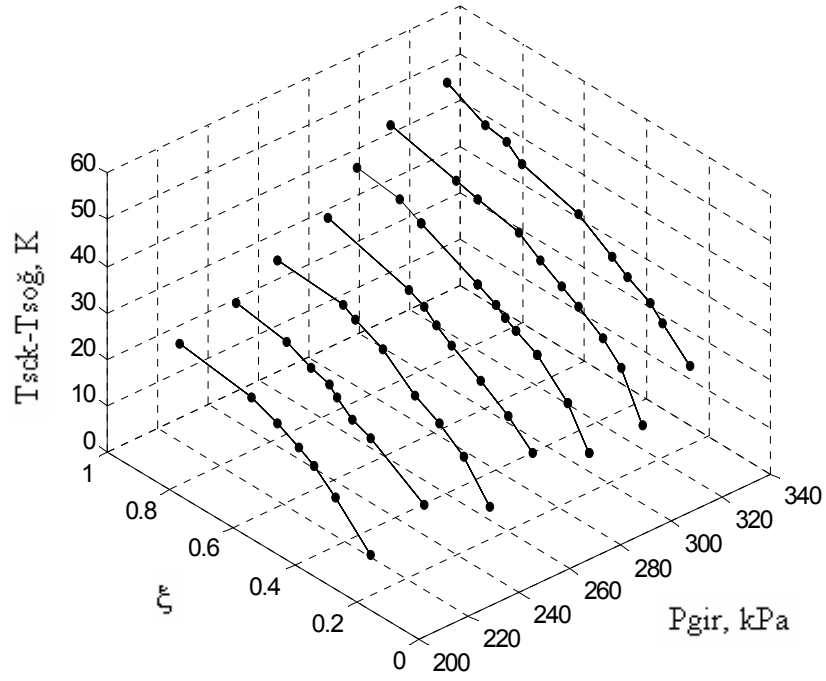
Bu çalışma, vorteks tüplerde en iyi performans gösteren nozul sayısını tespit etmek için yapılmıştır. Deneysel sistemde kullanılan vorteks tüp gövdesinin uzunluğu  $15D$ 'dir.  $60^\circ$ 'lik konik uca sahip olan 5 mm çapında hareketli vida, sıcak çıkış konumunda bırakılarak deneyler yapılmıştır. Kompresörden sağlanan hava vorteks tüpe, nozullar aracılığıyla gönderilmiştir. Bu çalışmada, nozul kesit alanı

0,002\*0,002 m<sup>2</sup> ve nozul sayısı 2, 4, 6 olan üç farklı nozul sayısı kullanılarak, en iyi performans gösteren nozul sayısı deneysel olarak araştırılmıştır.

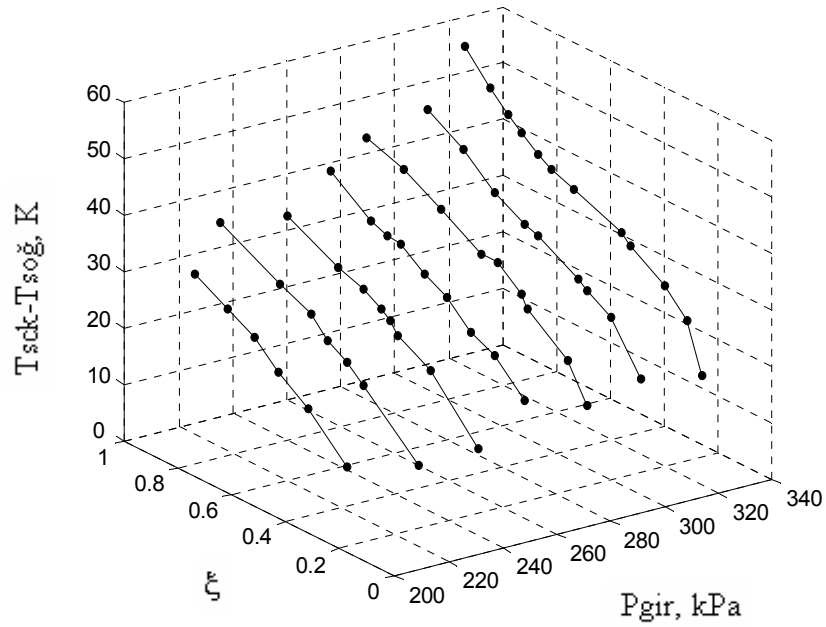
Deneyler yapılırken, girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hızlar ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalardan yararlanılarak  $\Delta T$ 'in  $\xi$  ile değişimi dikkate alınarak şekiller oluşturulmuştur. Şekil 6.17-6.19 sırasıyla  $L/D=15$ , nozul sayısı 2, 4, 6 olan ve 60°'lik konik uca sahip olan 5 mm çapındaki hareketli vidanın sıcak çıkış konumunda bırakılarak, girişteki basıncın 200 kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla yükseltilmesiyle,  $\Delta T$ 'nin,  $\xi$  ile değişimleri verilmiştir. Şekiller, çalışma basıncının yükseltilmesiyle 2, 4, 6 nozulun performansını göstermektedir.



Şekil 6.17.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=2$ ;  $d=5mm$  ve  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de

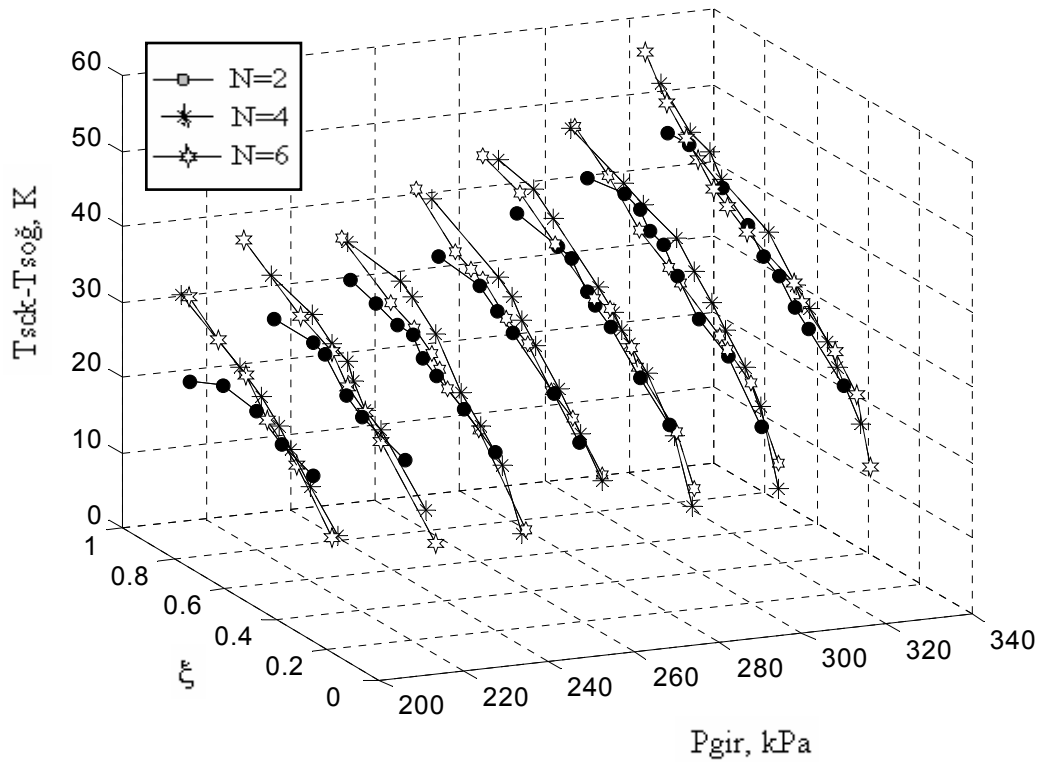


Şekil 6.18.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de



Şekil 6.19.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=6$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de

Vorteks tüp girişindeki basıncın artması, soğuk akımın kütle debisinin girişteki akıma oranı olan  $\xi$ 'nin de artmasına neden olmuştur.  $\xi$ 'nin artması da 2, 4, 6 nozullu vorteks tüpün performansını arttırmıştır. 2, 4, 6 nozulun performansı (Şekil 6.29) birlikte değerlendirildiğinde, en iyi performansın, nozul sayısının 4 olduğu vorteks tüpte gerçekleştiği deneysel olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.29.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=2, 4, 6$ ;  $d=5mm$  ve  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=  $L$ 'de

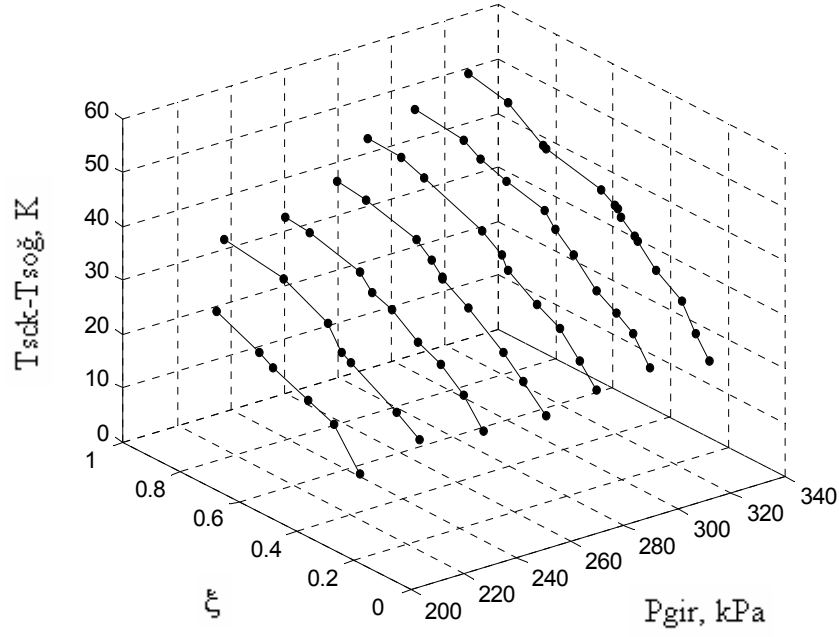
Deneysel sonuçlardan yararlanılarak oluşturulan şekiller değerlendirildiğinde, hareketli vida çapının 5 mm olması ve sıcak çıkış konumunda bırakılması, vorteks tüp uzunluğunun çapa oranının 15 olması ve havanın 4 nozul ile sağlanmasının daha etkin olduğu deneysel olarak görülmüştür.

### **6.5. Hareketli Vidanın Ucundaki Açının Vorteks Tüp Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi**

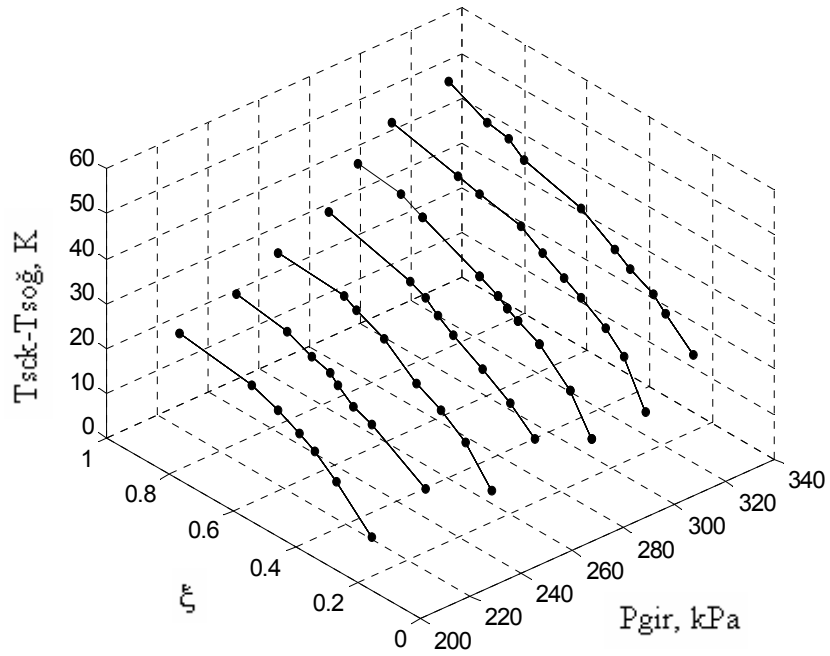
Bu çalışma, vorteks tüplerde, en iyi performans gösteren hareketli vidanın ucundaki açığı deneysel olarak tespit etmek için yapılmıştır. Deneysel sistemde kullanılan vorteks tüpün çapı 9 mm'dir. Vorteks tüp gövdesinin uzunluğu 15D'dir. Nozulun kesit alanı 0,002\*0,002 m<sup>2</sup> ve nozul sayısı 4'tür. Hareketli vida çapı 5 mm, ucundaki açı 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180° ve sıcak çıkışta bırakılmıştır.

Vorteks tüp girişindeki basınç, 200 kPa'dan başlayarak 320 kPa'a kadar 20 kPa aralıklarla yükseltilerek deneyler yapılmıştır. Deneyler yapılırken, girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hızlar ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalardan yararlanılarak  $\Delta T$ 'nin  $\xi$  ile değişimi dikkate alınarak şekiller oluşturulmuştur (Şekil 6.30- 6.34). Şekiller, çalışma basıncının yükseltilmesiyle, hareketli vidanın ucundaki açılarının performanslarını göstermektedir.

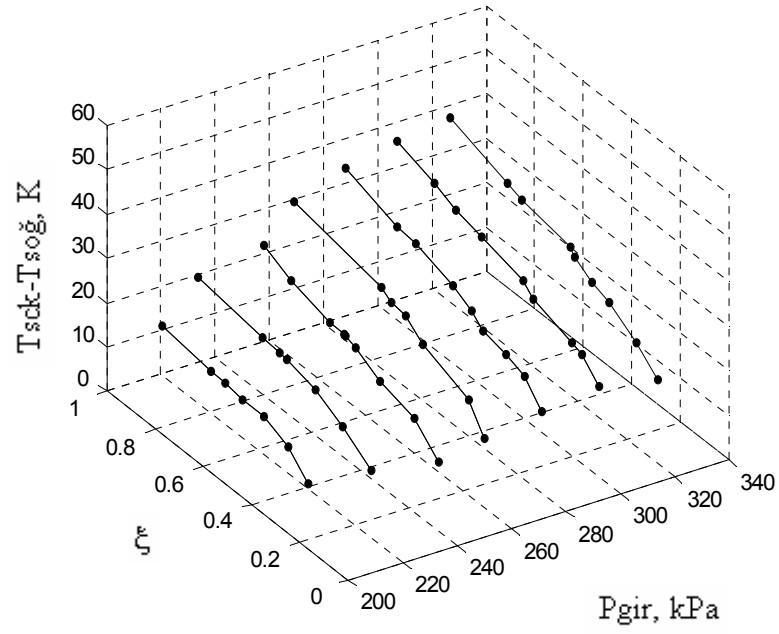
Şekil 6.30-6.34 sırasıyla, çapının 5 mm, ucundaki açılarının 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180° olan ve sıcak çıkışta bırakılan hareketli vidanın, sıcak akım sıcaklığı ile soğuk akım sıcaklığı arasındaki farkın  $\xi$  ile değişimleri verilmiştir. Bu vorteks tüpün geometrik yapısı, L/D=15 ve nozul sayısı 4'tür.



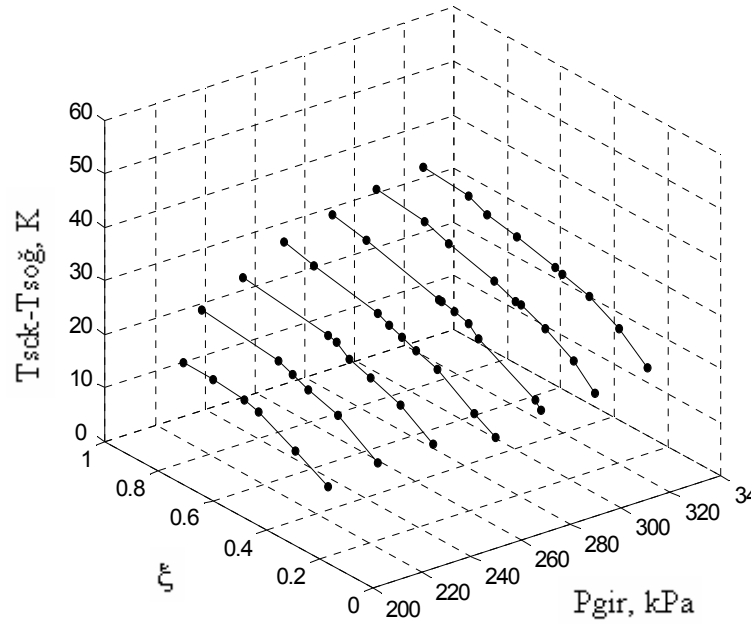
Şekil 6.30.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de



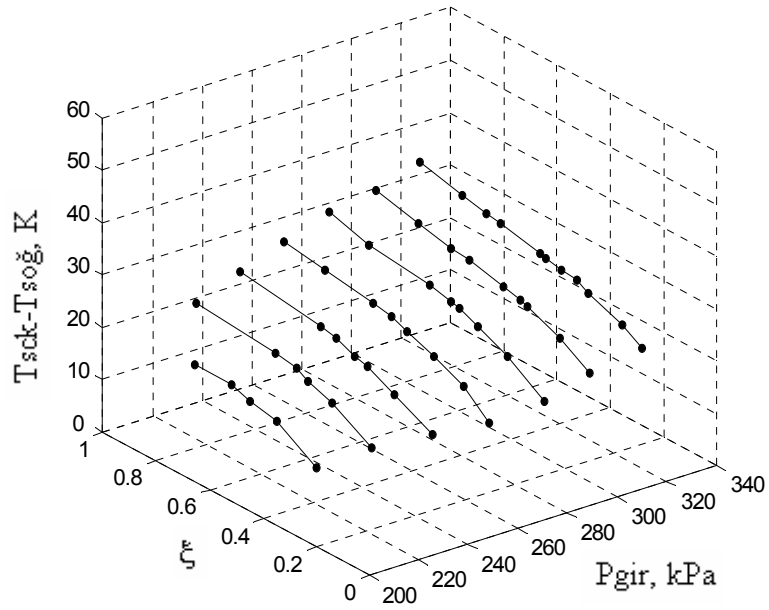
Şekil 6.18.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=60^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de



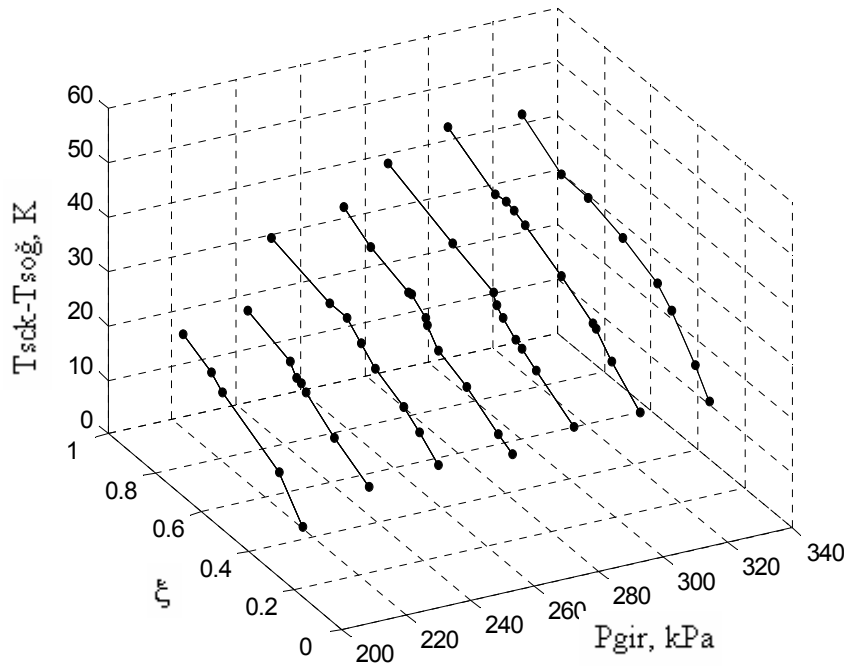
Şekil 6.31.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=90^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de



Şekil 6.32.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=120^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de

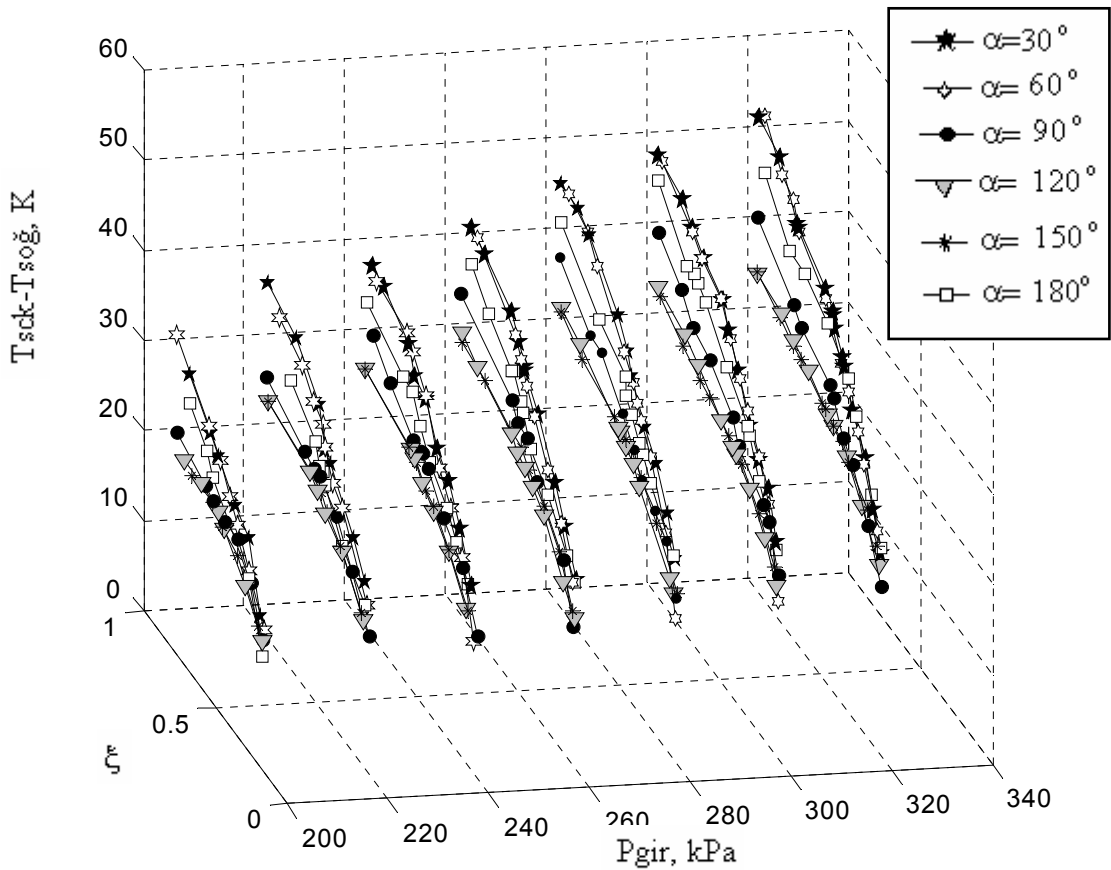


Şekil 6.33.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=150^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de



Şekil 6.34.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=180^\circ$ ; hareketli vida konumu=L'de

Deneysel sonuçların incelenmesinden, sıcak akım sıcaklığı ile soğuk akım sıcaklığı arasındaki fark en fazla hareketli vida ucundaki açının  $30^\circ$  ve  $60^\circ$  olduğu vorteks tüpte tespit edilmiştir (Şekil 6.35).



Şekil 6.35.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de

Deneysel sonuçlardan yararlanılarak oluşturulan şekiller değerlendirildiğinde, 5 mm çapındaki hareketli vida ucundaki açının  $30^\circ$  veya  $60^\circ$  olması ve sıcak çıkış konumunda bırakılması, vorteks tüp uzunluğunun çapa oranının 15 olması ve havanın 4 nozul ile vorteks tüpe gönderilmesi, akımın ise sıcak çıkış tarafından kontrol edilmesinin, daha etkin olduğu deneysel olarak görülmüştür.

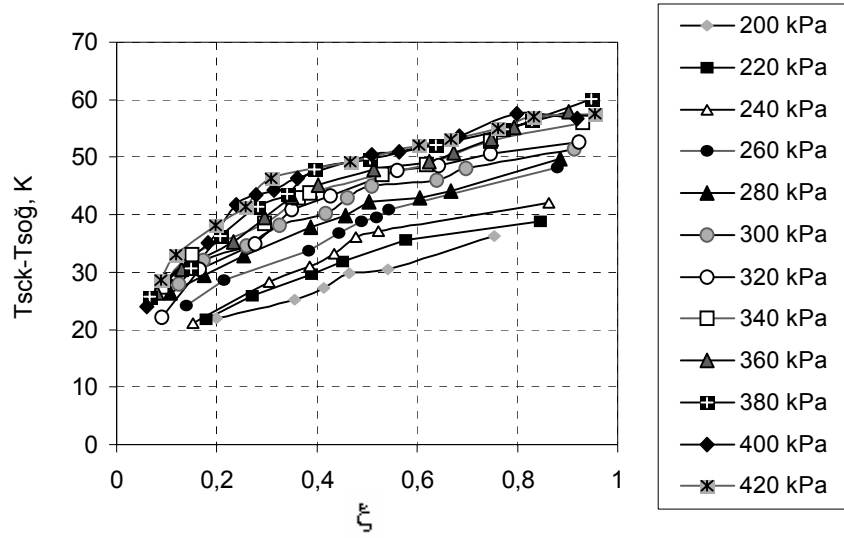
## 6.6. Vorteks Tüp Girişindeki Basıncın Yükseltilmesinin Vorteks Tüp Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi

Bu çalışma, vorteks tüplerde, en iyi performans gösteren vorteks tüp geometrik yapısı tespit edildikten sonra basınç 200 kPa'dan başlayarak 420 kPa'a kadar 20 kPa aralıklarla yükseltilerek, basıncın vorteks tüp performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

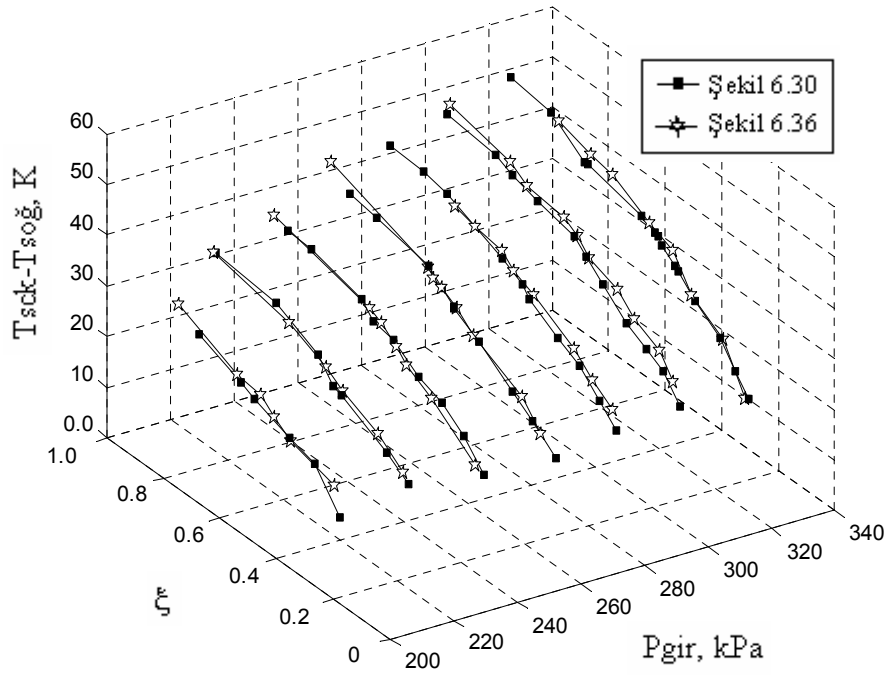
Deneysel sistemde kullanılan vorteks tüp gövdesinin uzunluğu 15D'dir. 5mm çapında hareketli vida ve nozul kesit alanı  $0,002*0,002 \text{ m}^2$  ve nozul sayısı 4, hareketli vida sıcak çıkışta bırakılarak deneyler yapılmıştır. Hareketli vidanın ucundaki açı ise  $30^\circ$ 'dir. Deneyler yapılırken, girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hızlar ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır ve bu hesaplamalardan yararlanılarak  $\Delta T$ 'ın  $\xi$  ile değişimi dikkate alınarak şekil oluşturulmuştur (Şekil 6.36).

Şekil 6.36 incelendiğinde, 380 kPa basınca kadar vorteks tüpün, sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark olan  $\Delta T$  sürekli artış göstermiş, 380 kPa ile 420 kPa arasında ise bu artışlar fazla olmamıştır

Şekil 6.37'de ise en iyi performans gösteren vorteks tüp geometrik yapısı deneysel olarak araştırırken, yapılmış olan “Hareketli Vidanın Ucundaki Açının Vorteks Tüp Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi” başlıklı çalışmadaki Şekil 6.30 ile Şekil 6.36 aynı şekil üzerinde (Şekil 6.37) mukayese edilerek iki kez yapılmış olan deneysel verilerin birbiri ile tutarlılığı incelenmiştir. Şekil 6.37 incelendiğinde yapılmış olan deneylerin birbirine çok yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

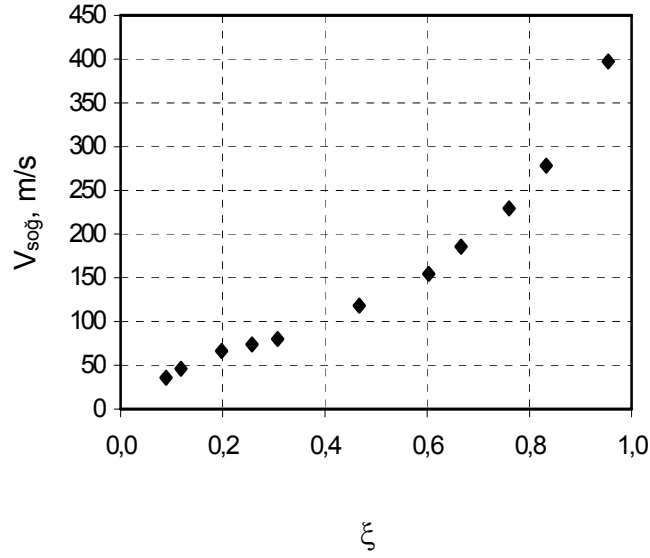


Şekil 6.36.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de

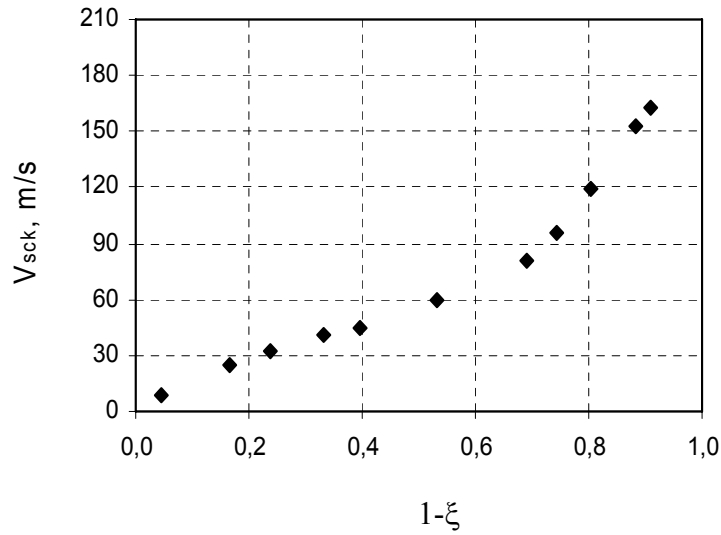


Şekil 6.37.  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi, önce ve sonra yapılan deneylerin birbiri ile mukayesesi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de

Şekil 6.38 ve Şekil 6.39’da, soğuk akım ve sıcak akımın hızlarının  $\xi$  ve  $1-\xi$  ile değişimi verilmiştir.



Şekil 6.38  $V_{soğ}$ 'un  $\xi$  ile değişimi;  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de,  $P_{gir}=420\text{ kPa}$

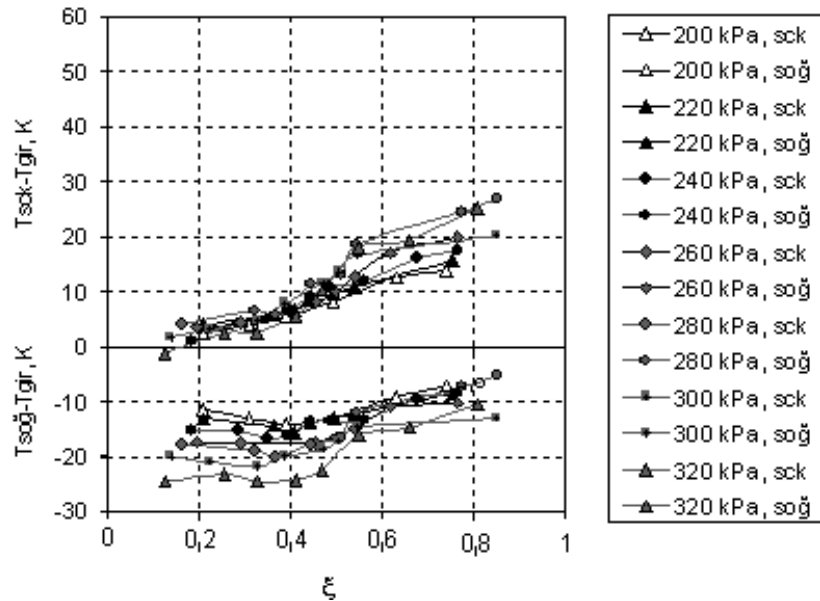


Şekil 6.39.  $V_{sck}$ 'ın  $\xi$  ile değişimi;  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=5\text{mm}$  ve  $\alpha=30^\circ$ ; hareketli vida konumu= $L$ 'de,  $P_{gir}=420\text{ kPa}$

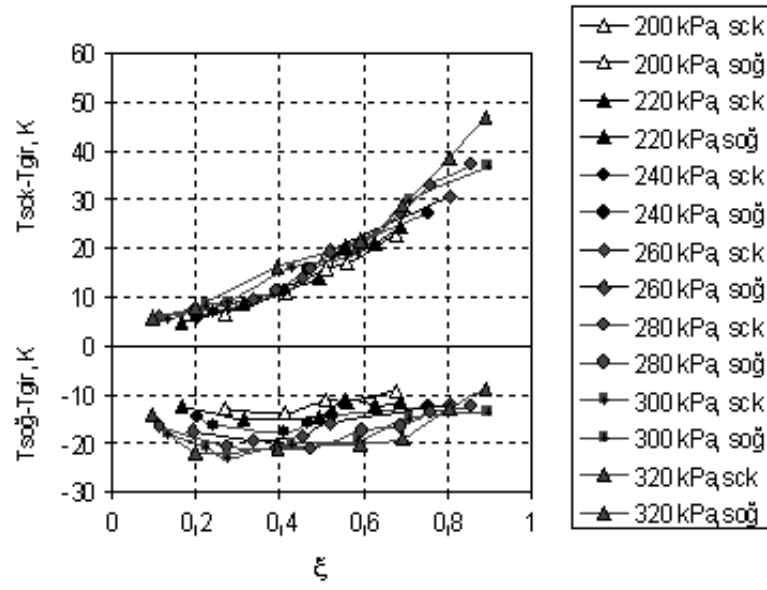
### 6.7. Vorteks Tüplerde Soğuk Sıcak Ayrışma Olayının Deneysel İncelenmesi

Bu çalışma, aynı nozul sayısındaki vorteks tüplerinde ısıtma ve soğutma performanslarının  $L/D$  ile nasıl bir etkileşim gösterdiğini incelemek için yapılmıştır. Vorteks tüplerin ısıtma ve soğutma sıcaklık performanslarını incelemek için, sıcak akışın sıcaklığı ile girişteki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark  $\Delta T_{sck}$  ve soğuk akışın sıcaklığı ile girişteki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark  $\Delta T_{sgk}$ 'ın  $\xi$  ile değişimi dikkate alınarak şekiller çizilmiştir (Şekil 6.40 -6.41). Bu şekiller, çalışma basıncının yükseltilmesi ile vorteks tüpe kompresör aracılığı ile gönderilen ortam sıcaklığındaki akışkanın, geometrik yapıya bağlı olarak ne kadar ısındığı ve soğuduğu hakkında bilgi vermektedir.

Eşit nozul sayısındaki vorteks tüplerin  $L/D$  oranı değiştikçe ısıtma ve soğutma sıcaklık performansları da değişmiştir.  $L/D=15$  olan vorteks tüpde ısıtma performansının,  $L/D=10$  olan vorteks tüpe göre, daha fazla olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.40-6.41).



Şekil 6.40. Isınma ve soğuma sıcaklıklarının  $\xi$  ile değişimi,  $L/D=10$ ;  $N=4$ ;  $d=6$  mm



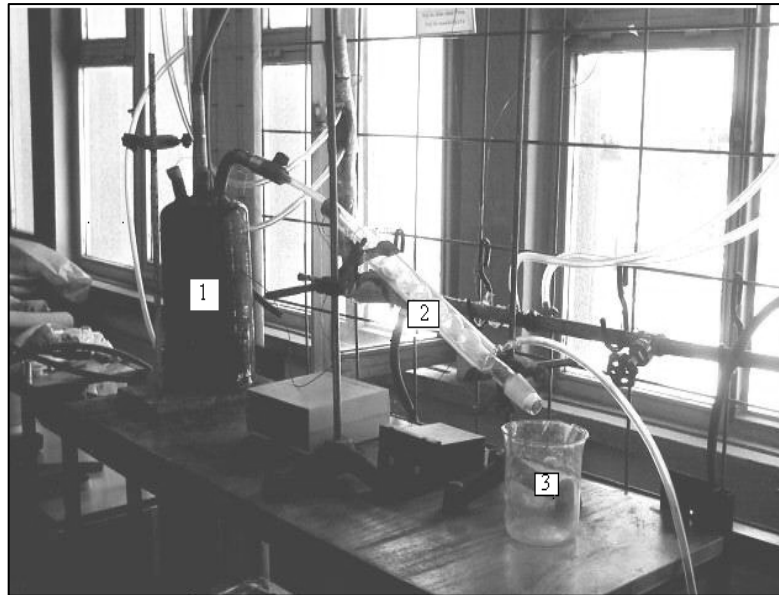
Şekil 6.41. Isınma ve soğuma sıcaklıklarının  $\xi$  ile değişimi,  $L/D=15$ ;  $N=4$ ;  $d=6$  mm

## 7. VORTEKS TÜP UYGULAMALARI

Bu çalışmada, en iyi performans gösteren vorteks tüp, etanol-su karışımının damıtılması işleminde kullanılmıştır. Ayrıca, vorteks tüpünde akışkan olarak hava, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, ve N<sub>2</sub> kullanılarak enerji ayrıştırma olayı farklı gazlarla incelenerek soğuma ve ısınma yönünden birbiriyle mukayese edilmiştir.

### 7.1. Vorteks Tüpün Distilasyon İşlemlerinde Kullanımı

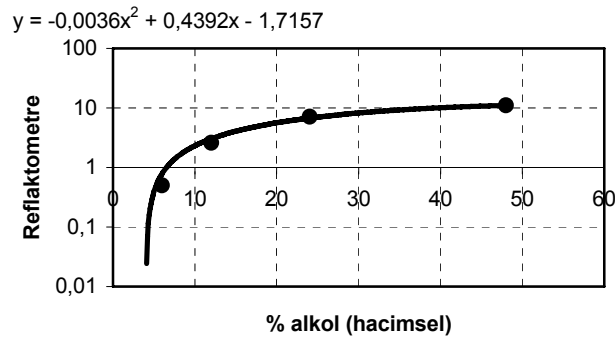
Laboratuvarda bir sıvının içinde çözünmüş olabilecek öteki maddelerden ayrıştırılarak arıtılması gerektiğinde kullanılan en kolay yöntem damıtmadır. Damıtma sıvının buharlaşınca kadar ısıtılıp daha sonra yükselen buharın bir soğutma yöntemiyle yeniden sıvılaştırılmasıdır. Böylece sıvı buhar basıncı yüksek olan bileşen cinsinden zenginleşmiş olur. Kaynama noktaları değişik iki sıvının ayrıştırılmasında, damıtma yöntemi kullanıldığında işleme ayrımsal damıtma adı verilir. Bir bileşenin buhar basıncı yalnız sıcaklığa bağlıdır.



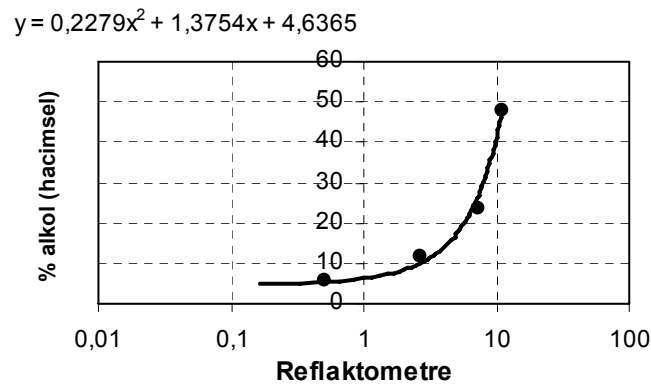
Resim 7.1. Vorteks tüp yardımı ile damıtma sistemi

1. Etanol-su karışımının bulunduğu kap
2. Kondenser 3. Beher

Resim 7.1’de görülen sistemde, damıtma işlemi yapılmıştır. Bu çalışmada, en iyi performans gösteren vorteks tüpü, etanol-su karışımının damıtılması işleminde kullanılmıştır. Bu işlem yapılırken saflık oranı % 96 olan etanoldan 157 gr ve 1343 gr’da saf sudan alınarak ağırlıkça %10’luk bir etanol karışımı hazırlanmıştır. Resim 7.1’den de görüldüğü gibi bir kondenser karışımın bulunduğu kaba eğik olarak bağlanmıştır. Vorteks tüpünden elde edilen soğuk akım kondensere ters olarak bağlanmıştır. Yine vorteks tüpünden elde edilen sıcak akım ise karışımın bulunduğu kabın içine gönderilerek kabarcıklar oluşturularak damıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Damıtma ürünü beherden damlalıklıkla alınarak reflaktometre ile saflık derecesi ölçüldüğünde 2,2 olduğu görülmüştür. İlerde vorteks tüpü ile damıtma işleminin iyileştirilmesi için çalışma yapılması hedeflenmektedir.



a)

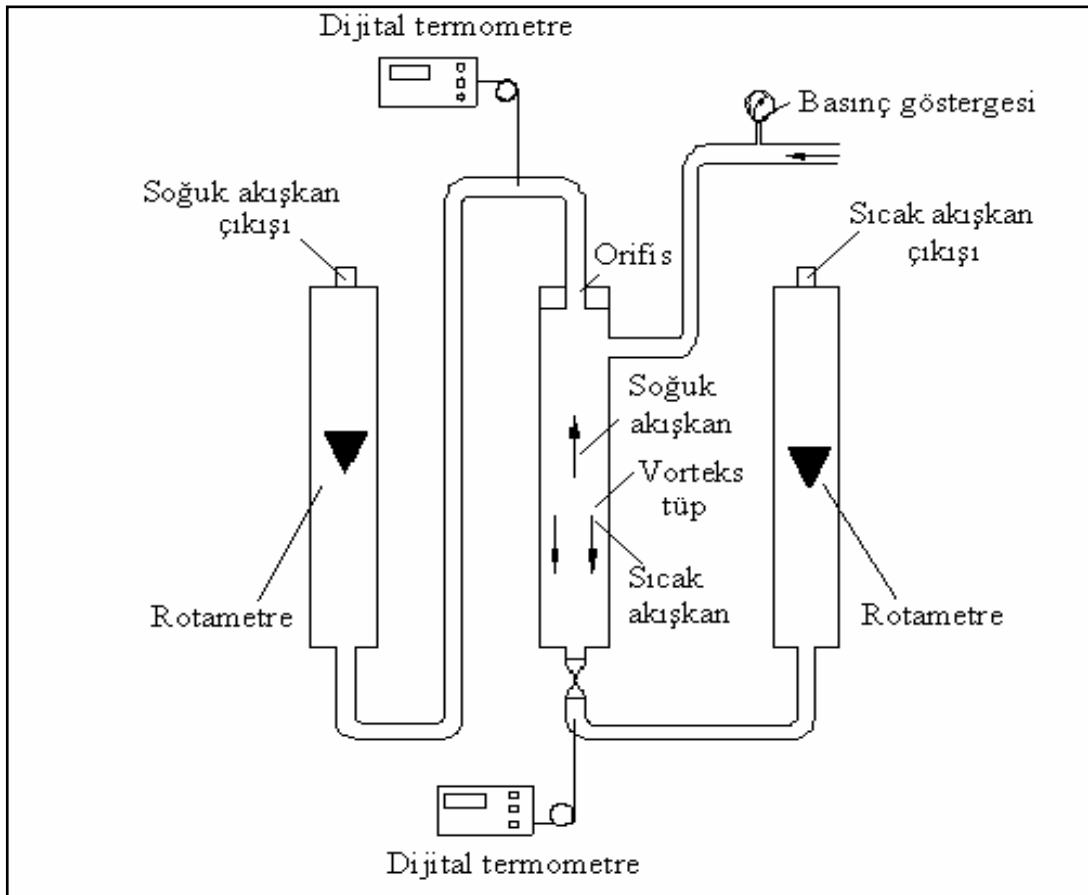


b)

Şekil 7.1. Etanol-su-konstrasyon reflaktiv indeks kalibrasyon eğrileri

## 7.2. Vorteks Tüpün Farklı Gazlara Uygulanması

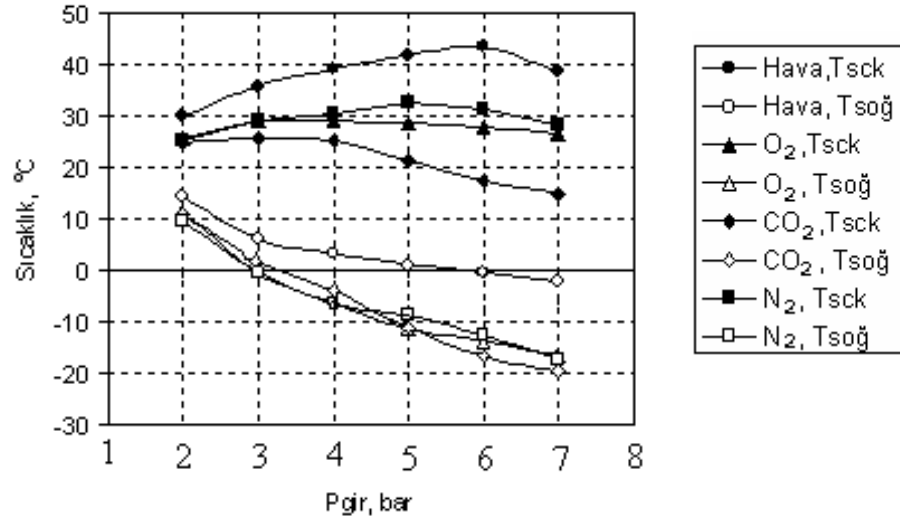
Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi soğutma laboratuvarında yapılmıştır. Vorteks tüpünde akışkan olarak hava,  $O_2$ ,  $CO_2$ , ve  $N_2$  kullanılarak enerji ayrıştırma olayı farklı gazlarla deneysel olarak incelenmiştir. Şekil 7.2’de görülen deney düzeneğinde, hiç bir hareketli parçası bulunmayan vorteks tüpde, sıcak çıkış tarafındaki vana tam açık konumda bırakılmış ve vorteks tüp girişindeki basınç 200 kPa’dan başlayarak 100 kPa aralıklarla 700 kPa’a kadar yükseltilerek deneyler yapılmıştır. Deneysel verilerden yararlanılarak şekiller çizilmiştir (Şekil 7.3-7.4).



Şekil 7.2. Farklı gazlara uygulanan vorteks tüp deney düzeneği

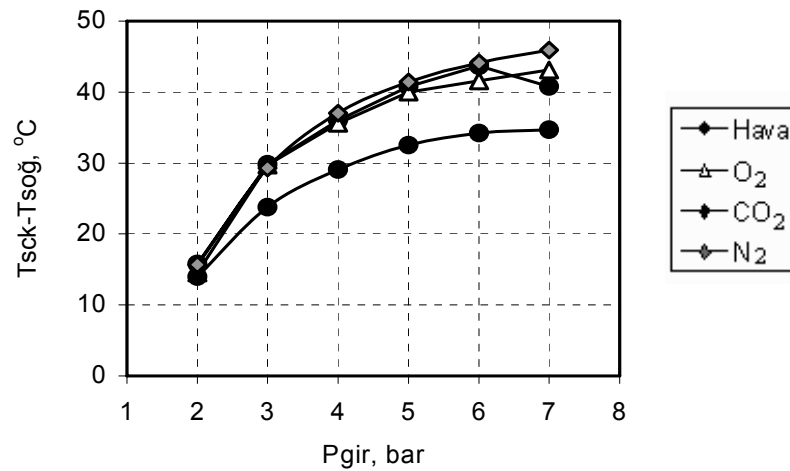
Şekil 7.3’de hava,  $O_2$ ,  $CO_2$ , ve  $N_2$  sıcak akışkanın sıcaklığı ve soğuk akışkanın sıcaklıklarının girişteki basınca göre değişimi verilmiştir. Şekil 7.3 incelendiğinde,

sıcak akışkanın sıcaklığını en fazla havada, en az ise CO<sub>2</sub>'de oluşturmuştur. Ancak CO<sub>2</sub>'in en az ısınmasına rağmen en fazla soğuma olayı CO<sub>2</sub> gazında görülmüştür.



Şekil 7.3. Sıcak ve soğuk akışkan sıcaklıklarının  $P_{gir}$  ile değişimi

Şekil 7.4'de, hava, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>'nin sıcak akışkanın sıcaklığı ile soğuk akışkanın sıcaklığı arasındaki fark olan  $\Delta T$ 'nin vorteks tüpün giriş basıncı ile değişimleri verilmiştir. Şekil 7.4 incelendiğinde,  $\Delta T$ 'nin en fazla N<sub>2</sub>'de en az ise CO<sub>2</sub>'de olduğu görülmektedir.



Şekil 7. 4.  $\Delta T$ 'nin  $P_{gir}$  ile değişimi

## **8. BULANIK MANTIK YÖNTEMİYLE VORTEKS TÜP PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Beceriler insanlar tarafından zamanla kazanılır. Fakat makinalara bunu öğretmek çok zordur. Makinaların önceden belirlenmiş belli yetenekleri, bazı değerlerin belirlenen düzeyleri aşması durumunda, mekanik veya elektriksel düzenlemelerle kontrol edilebilir. Örneğin bir odanın belirli bir sıcaklıkta tutulması, iklimlendirici pervanesinin devrini artırıp azaltarak gerçekleştirilebilir. Oda sıcaklığı belirli bir değere eriştiğinde, pervaneyi çeviren elektrik motoruna elektrik akımı verilir ve motor döner, sıcaklık belirli bir değerin altına indiğinde akım kesilir ve motor durur. Sonuçta odanın ısısı istenen sıcaklık civarında bir salınım yapar.

Makineler "azıcık", "çok", "eh işte", "kararınca" gibi terimleri anlamazlar. Bu yüzden makinelere belirli büyüklükler tam olarak tanıtılır. Matematiksel olarak makinalar için bir parametrenin değeri ya vardır ya da yoktur. Yani makinalar, Aristo'dan bu yana gelen bir mantık ile çalışırlar. Ancak altmışlı yıllarda, ilk kez "bulanık mantık" kavramı ortaya atıldı. Buna göre var ya da yok yerine, bir miktar vardan, bir miktar da yoktan oluşan kemiyetlerden söz edilmeye başlandı. İşte bu yeni mantık ve uzman sistemler yardımı ile makinalar, zamanımızda çok farklı bir biçimde çalışır oldu.

Makinalara yüklenen kontrol işlevlerinde, insanın düşünme tarzı örnek alınmaya başlandı. İnsanın sinir sistemini örnek alan bu uzman sistemler sayesinde de makinalar eğitildi ve işletmede ortaya çıkabilecek bütün ayrıntılar makinalara tanıtıldı. Buna göre çalışan iklimlendirici aygıtı oda sıcaklığına göre motor devrini ayarlayabilmektedir. Bu tür kontroller ile nükleer santraller, ütü, çamaşır makinası, Japonya'daki Sandai kentinin metrosu çalıştırılmaktadır (29).

Bulanık mantık teorisi, klasik küme teorisine alternatif olarak L.A. Zadeh tarafından 1964 yılında ortaya atılmıştır. Zadeh bu çalışmasında, klasik küme teorisinin tanımlayamadığı kümelerden hareket ederek, bu tanımlara ulaşmanın yollarını aramıştır. Zadeh'e göre gerçek dünyada bir kümenin (uzayın) elemanları arasındaki ilişkiler kesin olarak tanımlanamamaktadır. Bundan dolayı sözü edilen kümede ortaya atılan problemler kolaylıkla çözülememektedir. Klasik küme teorisinden

kaynaklanan bu problem, klasik mantığın kabulü olan var-yok çiftinin ara değerlerini tanımlamakla yok edilebilir. Bulanık mantık ve bulanık küme teorisinin ortaya atılmasından sonra Zadeh 1973'de yayınladığı çalışmalarında, bulanık küme teorisinin en büyük yaklaşıklıkla insanın karar verme sistemini modelleyebilecek yeterlilikte olduğunu ortaya atmıştır (30).

Burada sunulmuş olan çalışmada, 4 nozullu  $L/D=10$  ve 15 olan vorteks tüplerin farklı giriş basınçlarında ki performanslarının deneysel verileri kullanılarak bulanık mantık yöntemi uygulanmıştır. Bulanık mantık yönteminden elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler kullanılarak yapılan analiz sonuçları mukayese edilmiştir. Bu yapılan çalışma ile, belirsizliklerin de hesaba katıldığı bir yöntem sunularak tartışılmıştır.

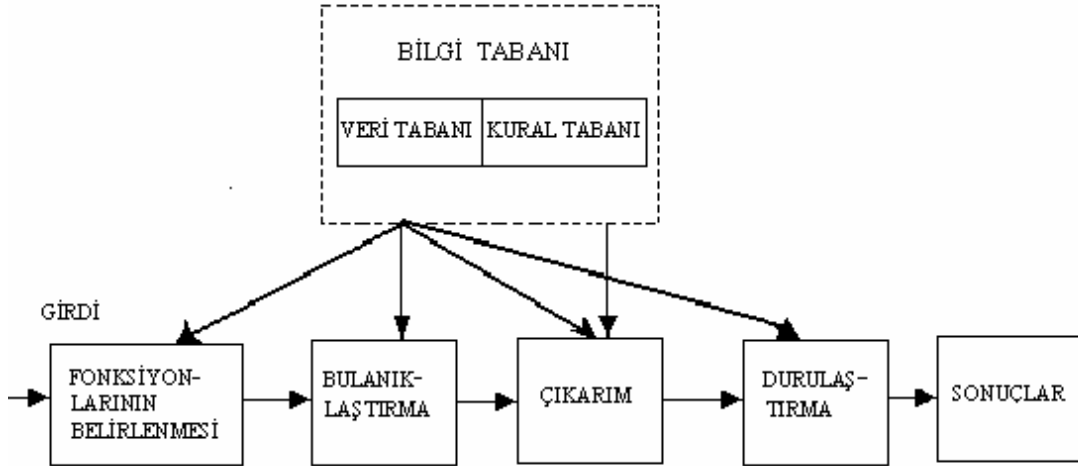
### 8.1. Bulanık Mantık Metodu

Son 30-40 yıllık dönemde yapılan bilimsel atılımların hemen hepsi belirsizlik ilkelerini ve bunlara bağlı geliştirilen yöntemleri içermektedir. Son 30 yıla kadar kullanılan Aristo mantığı (belirgin mantık) yerini belirsizlik içeren ve Lütfü Asker Zadeh tarafından bulanık mantık denilen mantık yapısına bırakarak değişik alanlarda kullanılır hale gelmiştir (31). Bulanık mantık metodunda kullanılan işlem akış şeması Şekil 8.1'de gösterilmiştir.

Bulanık kümenin her elemanı, küme içerisinde bir üyelik değerine sahiptir ve bu değerler  $[0,1]$  aralığında değişmektedir.  $U$  evrensel kümenin sonlu sayıda  $U_1, U_2, \dots, U_n$  kümelerinden oluşan bulanık herhangi bir  $A$  kümesi için aşağıdaki bağıntı Zadeh'in açılımı ilkesine göre  $\mu_A(U_i)$  üyelik fonsiyonu olmak üzere:

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(U_i)}{U_i} \quad [8.1]$$

şeklinde yazılır (32). Bulanık üyelik fonksiyonları çeşitli şekillerde olabilir, fakat en çok kullanılan üçgen üyelik fonksiyonudur.



Şekil 8.1. Bulanık mantık metodunda kullanılan işlem akış şeması (31)

Bulanık mantık ile modelleme yapılırken girdi ve çıktı değişkenleri genelde kullanımı basit olan üçgen üyelik fonksiyonları ile alt kümelerle ayrılarak bulanıklaştırılır. Bunun için çok küçük, küçük, orta, büyük ve en büyük gibi, değişkenlere bağlı olarak sözel ifadeler kullanılır. Daha sonra işlem sırası, girdi ve çıktı üyelik fonksiyonları arasındaki ilişkiyi belirleyen kuralların bulunduğu kural tabanının oluşturulmasına gelir. Kural tabanı oluşturulurken ya mevcut verilerden hareket edilir veya tecrübelerden yararlanılır. Kural tabanı sözel cümleciklerden oluşur. Bulanık mantık ile modellemede, kural tabanı bir çeşit mantıksal ifade olan EĞER-İSE yapısıyla oluşturulur. EĞER kısmı, girdi bulanık kümelerinden, İSE kısmı çıktı bulanık kümesinden değişkenleri içerir.

EĞER-İSE ifadeleri VE ya da VEYA bağlaçları ile birbirine bağlanır. Örneğin  $X_1$  ve  $X_2$  girdi değişkeni,  $Y$  çıktı değişkeni olmak üzere, tüm değişkenlerin “küçük”, “orta” ve “büyük” gibi üçer alt kümesi olduğu kabul edilirse, yazılabilecek kurallardan birisi:

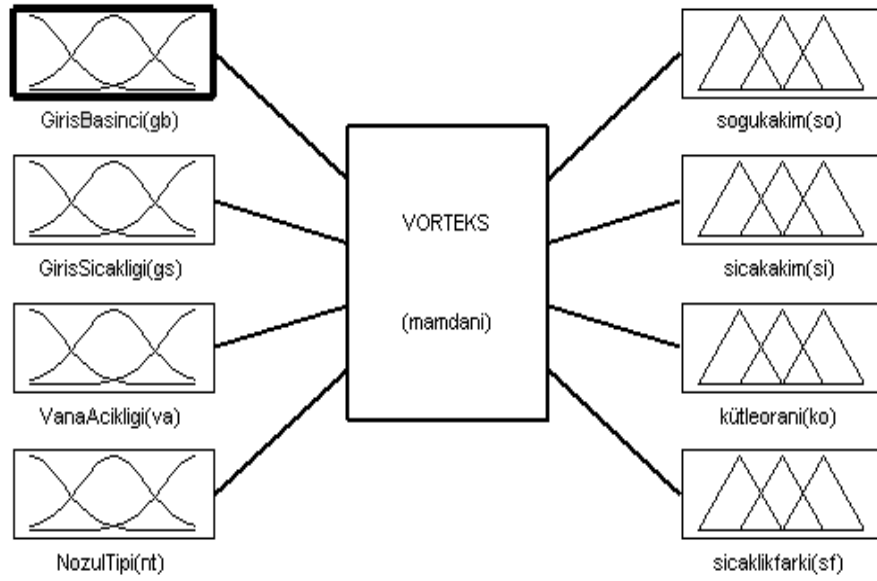
“EĞER  $X_1$  küçük ve  $X_2$  orta ise  $Y$  büyüktür.” şeklinde olabilir.

Bir bulanık küme işleminin sonucundaki bulanık kümenin tek sayı haline dönüştürülmesi işlemine durulaştırma adı verilir. En çok kullanılan durulaştırma yöntemleri, en büyük üyelik ilkesi, ağırlıklı ortalama yöntemi, ağırlık merkezi yöntemi, ortalama en büyük yöntemi, toplamların merkezi en büyük alanın merkezi, en büyük ilk veya son üyelik derecesidir (31). Bu çalışmada ki durulaştırma işlemlerinde ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır.

## **8.2. Vorteks Tüp Performansının Bulanık Mantık İle Belirlenmesi**

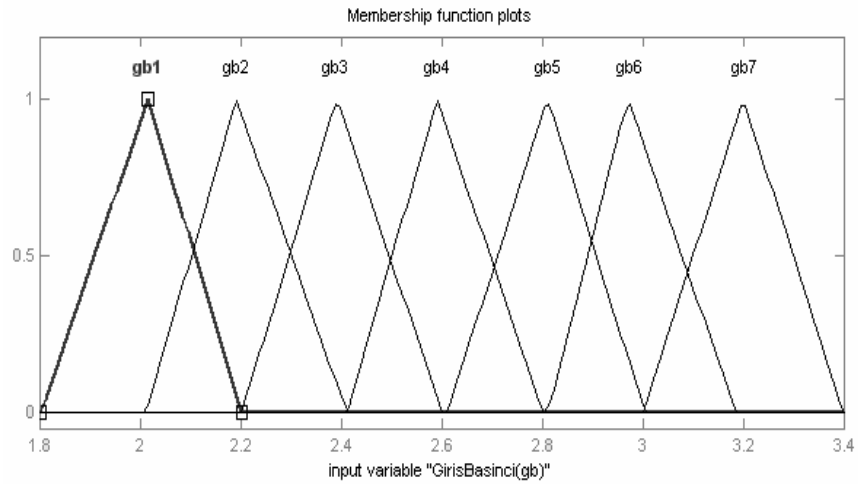
Bu çalışmada basınclandırılmış olan havayı biri sıcak diğeri soğuk olan iki farklı akışa ayıran vorteks tüp performansı bulanık mantık metodu ile modellenmiştir. Bu amaçla önceden belirtilen deneysel çalışmaların verileri kullanılmıştır. Modellemede Giriş Basıncı (gb), Giriş Sıcaklığı (gs), Vana Açıklığı (va), L/D Oranı (nt) girdi, Soğuk Akım Sıcaklığı (so), Sıcak Akım Sıcaklığı (si), Kütle Oranı (ko) ve Sıcaklık Farkı (sf) çıktı olarak dikkate alınmıştır (33).

Modellemede Şekil 8.2’de gösterildiği gibi, önce girdi ve çıktı değişkenlerinin üyelik fonksiyonları belirlenerek bulanıklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Soğuk Akım Sıcaklığı (so), Sıcak Akım Sıcaklığı (si), Kütle Oranı (ko) ve Sıcaklık Farkı (sf) çıktılarına etki eden girdilerden, Giriş Basıncı (gb) 7, Giriş Sıcaklığı (gs) 5, Vana Açıklığı (va) 9 ve L/D Oranı (nt) 2; çıktılar ise Soğuk Akım Sıcaklığı (so) 5, Sıcak Akım Sıcaklığı (si) 7, Kütle Oranı (ko) 9 ve sıcaklık farkı (sf) 7 alt kümeye ayrılmış ve üçgen üyelik fonksiyonları belirlenmiştir (33).

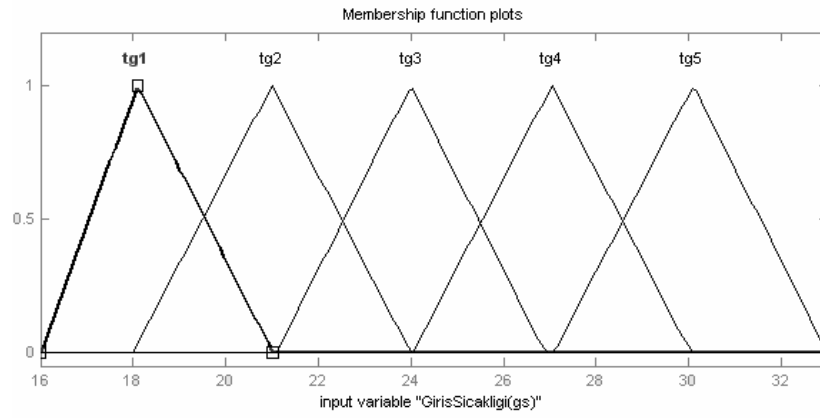


Şekil 8.2. Vorteks tüp performansının bulanık mantık metodu ile modellemesi (33)

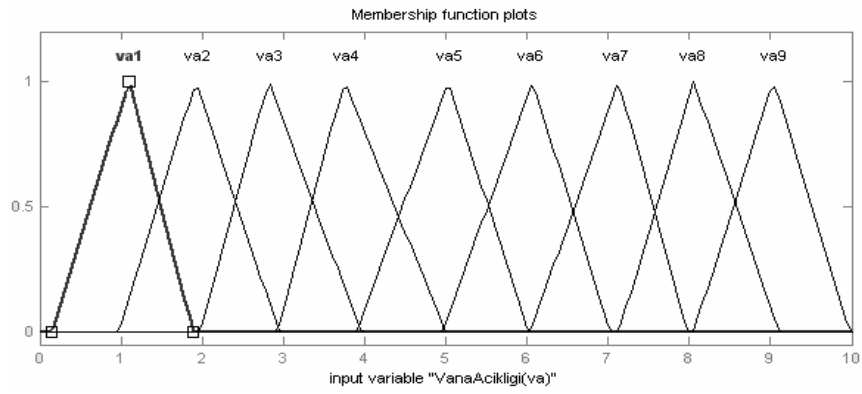
Değişkenlerin kaç alt kümeye ayrılacağı problemin yapısıyla ilgilidir. Üçgen üyelik fonksiyonları Şekil 8.3-8.10'da verilmiştir.



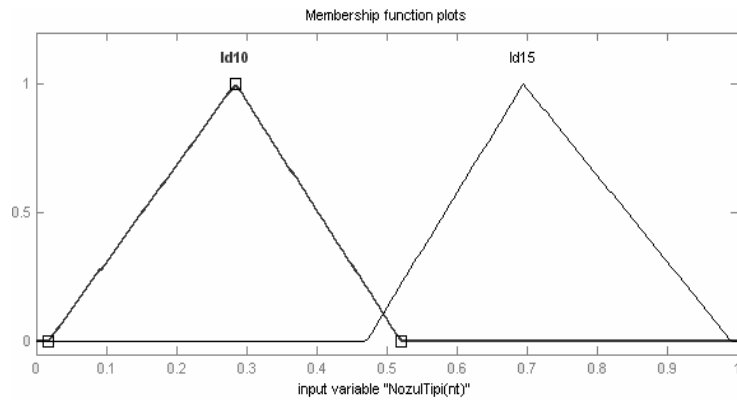
Şekil 8.3. Giriş basıncı (gb)



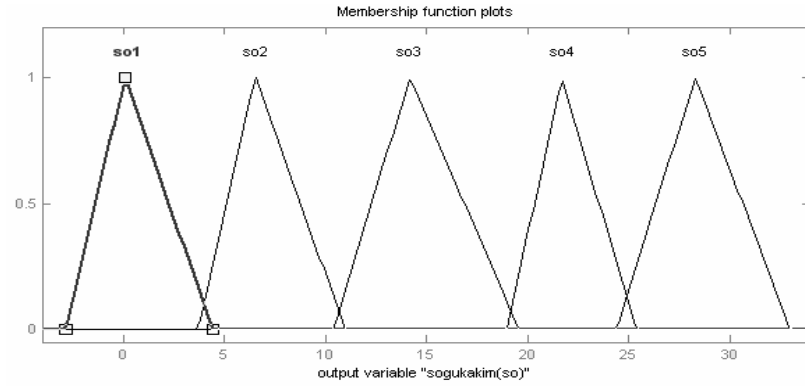
Şekil 8.4. Giriş sıcaklığı (gs)



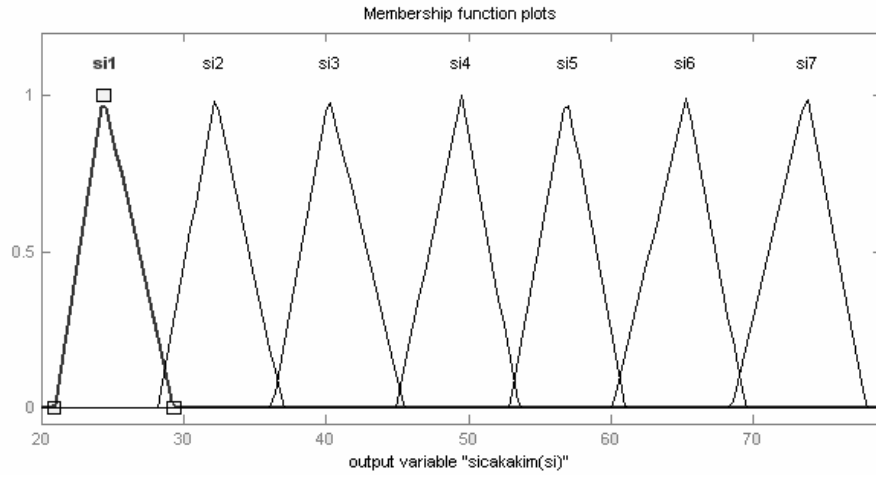
Şekil 8.5. Vana açıklığı (va)



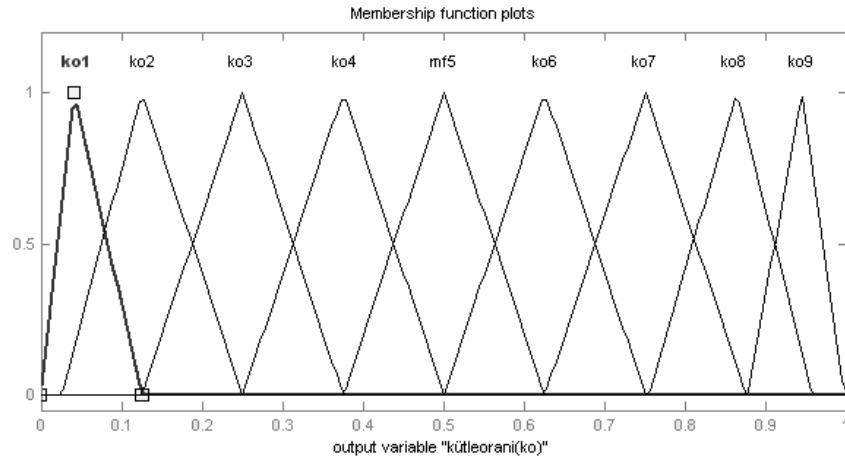
Şekil 8.6. L/D oranı (nt)



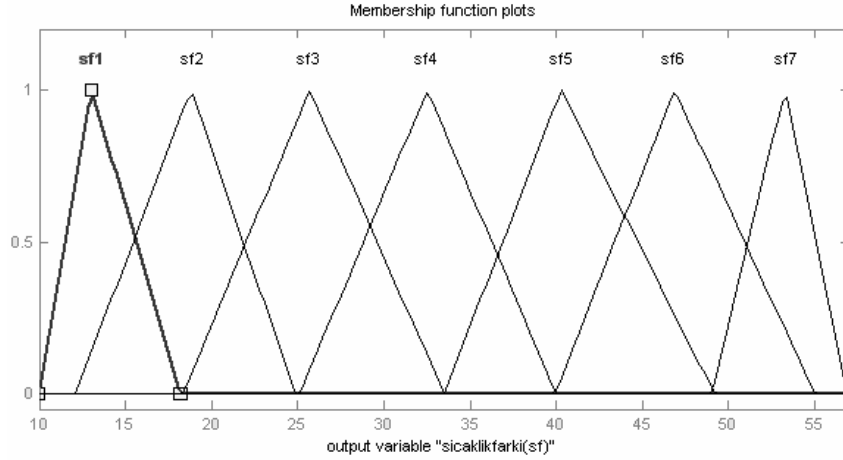
Şekil 8.7. Soğuk akım sıcaklığı (so)



Şekil 8.8. Sıcak akım sıcaklığı (si)



Şekil 8.9. Kütle oranı (ko)

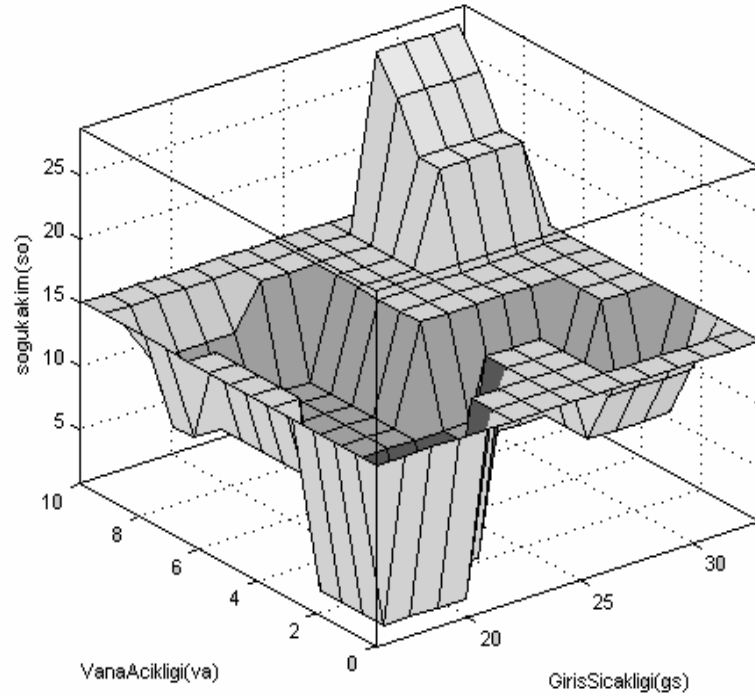


Şekil 8.10. Sıcaklık farkı (sf)

Bulanıklaştırma işleminin ardından kural tabanı oluşturulmuştur. Kural tabanı aşağıda bir örnekte gösterilmiştir. Bu çalışma için toplam 109 adet kural yazılmıştır.

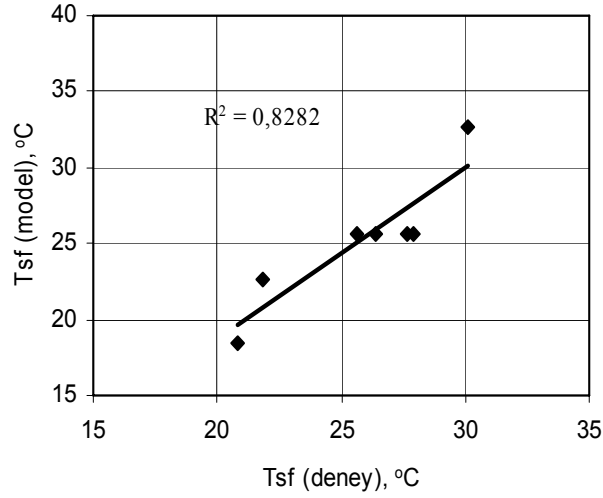
Eğer  $gb=gb3$  ve  $gs=gs2$  ve  $va=va1$  ve  $nt=nt1$  İSE  $so=so2$  ve  $si=si7$  ve  $ko=ko4$  ve  $sf=sf5$

Alt kümeler ve kural tabanı yardımıyla elde edilen bulanık çıkarımların, bulanık sayılardan kesin sayılara dönüştürülmesi için uygulanan durulaştırma işleminde ağırlık merkezi yöntemi uygulanmıştır. Bu amaçla, Matlab programlama dili Fuzzy Logic Toolbox'ı kullanılmıştır. Bu işlemlerin tümü öğrenme safhası olarak adlandırılır. Öğrenme safhasında, bulanık mantık metodu ile elde edilen modelin çalıştırılması ile elde edilen üç boyutlu değişimi gösteren grafiksel yüzeyin bir örneği Şekil 8.11. 'de gösterilmiştir.



Şekil 8.11. Bulanık mantık metodu ile elde edilen üç boyutlu değişimi gösteren grafiksel yüzey (33)

Değişik girdi değişkenleri ve oluşturulan bulanık mantık modeli kullanılan tahmin safhasında Soğuk Akımın Sıcaklığı (so), Sıcak Akımın Sıcaklığı (si), Kütle Oranı (ko) ve Sıcaklık Farkı(sf) değerleri elde edilmiştir. Bulanık mantık metodundan elde edilebilen ve deneysel olarak verilen değerlerden birisi olan Sıcaklık Farkı (sf) değerlerinin karşılaştırması Şekil 8.12’de verilmiştir. Çıktıların ve metodun uygunluğu, korelasyon katsayısı ile tespit edilebilir. Korelasyon katsayısı Şekil 8.12’de görüldüğü gibi 0,8282 olarak bulunmuştur. Bu değer kural tabanında daha fazla sayıda kural yazılarak 0,999 değerine yaklaştırılabilir.



Şekil 8.12. Tahmin safhasında deneysel (sf) değerleri ile modelden elde edilen (sf) sıcaklık farkı değerleri arasındaki ilişki (33)

Bu çalışmada, vorteks tüp performansı bulanık mantık metodu ile modellenmiştir. Modellemede vorteks tüpe giren havanın giriş basıncı, giriş sıcaklığı ile vorteks tüp vana açıklığı ve L/D oranı, giriş parametreleri olarak alınmıştır. Modelleme sonunda vorteks tüp performansını belirleyen soğuk akım sıcaklığı, sıcak akım sıcaklığı, kütle akımı ve sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklık farkı değerleri elde edilmiştir. Deneysel verilerden elde edilen 100 adet veri modelde öğrenme safhasında, kalan 9 adet veride test (tahmin) safhasında kullanılmıştır. Bulanık mantık metodu, modellemeye uzman görüşünün katılabilmesine de olanak sağlamaktadır. Ancak bu çalışmada uzman görüşü kullanılmamış sadece deneysel veriler üzerinden kural çıkarımı yapılmıştır. Bulanık mantıkla modelleme sonucu elde edilen korelasyon katsayısı 0,8282 olarak elde edilmiştir. Bu değer kural tabanına uzman görüşünü de katarak daha fazla kural yazılarak artırılabilir. Yapılan çalışma ile bulanık mantık metodu kullanılarak yapılan modellemeden hassas sonuçlar elde edilebileceği ve metodun tüm deneysel çalışmalara uyarlanabileceği ortaya konmuştur. Bu çalışma, tüm deneysel verilerle birlikte uzman görüşü de dahil edilerek çalışmanın içeriği genişletilecektir.

## 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, değişik geometrik yapılardaki karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüpü üzerinde *analitik, sayısal ve deneysel* olarak yapılmıştır. Burada sonuçların değerlendirilmesi yapılmış ve ileride yapılacak olan çalışmalara yardımcı olmak amacıyla öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmanın *analitik bölümünde*; küçük kapasiteli ve sınırlı ısıtma veya soğutma gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek ve sadece yüksek basınçta havaya ihtiyaç gösteren basit bir cihaz olan vorteks tüplerin performansı termodinamik açıdan incelenmiştir. Termodinamik açıdan inceleme yapılırken, karşıt akışlı vorteks tüplere termodinamiğin 1. ve 2. yasası uygulanmıştır. Yapılan ön hesaplamalar sonunda, vorteks tüpten çevreye olan ısı kaybının çok küçük olduğu ve bu sistemin adyabatik olarak kabul edilebileceği anlaşılmıştır. Bu sebepten dolayı, vorteks tüpler için termodinamiğin 1. yasası ile işlem yapılırken dış yüzeyden ısı kaybı ihmal edilmiştir. Vorteks tüpün giriş, soğuk ve sıcak çıkışların kesit alanları dikkatle ayarlanıp, yaklaşık  $v_1 \approx v_2 \approx v_3$  yapılarak, kinetik enerji terimlerinin katkısı yaklaşık sıfır alınmış ve enerji eşitliğinin entalpi eşitliğine dönüştüğü görülmüştür.

Vorteks tüpler çoğunlukla gazlar için uygulanır. Bu çalışmada da akışkan olarak hava kullanılmıştır. Buna ek olarak havanın ideal gaz gibi davrandığı varsayımı yapılmış, ideal gazlar için geçerli olan hal denklemi kullanılmıştır. Termodinamiğin 2. yasasının genel ifadesi  $\Delta S_{toplam} = \Delta S_{sistem} + \Delta S_{çevre} > 0$ 'dır. Bu ifade sıcak ve soğuk olmak üzere iki çıkışı olan vorteks tüplere uygulanmıştır.  $P_1, V_1, T_1$  ilk halinden  $P_2, V_2, T_2$  son haline giden bir ideal gaz için, ideal gaz denklemi yazılmış, giren ve çıkan akımlar kütle ve molar birimler cinsinden boyutsuz büyüklük olan  $\xi$  ve  $1-\xi$  olarak tanımlanmıştır. Ayrıca sıcak ve soğuk çıkışın her ikisi de atmosfere açık olduğundan  $P_2 \approx P_3$  olarak kabul edilmiştir. Belirli bir  $\xi$  değerinde, istenilen soğuk akım sıcaklığı olan  $T_2$ 'yi ve yine belirli bir  $1-\xi$  değerinde istenilen sıcak akım sıcaklığı olan  $T_3$ 'e ulaşmak için,  $P_1/P_2$ 'nin ne olması gerektiği yönünde boyutsuz ifadeler geliştirilmiştir.

Yukarıda açıklanan termodinamik analizi, adyabatik ve adyabatik olmayan vorteks tüpler için değişik şartlarda ve kolayca yapabilmek için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu program sayesinde istenilen parametrik çalışma bilgisayarda yapılabilir ve değişik parametrelerin etkileri irdelenir hale getirilmiştir.

Vorteks tüpler için ekserji denkliği ile hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalarla ilgili olarak ekserji analizi için bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu bilgisayar programı, vorteks tüpe girişteki basıncı 200 kPa'dan başlayarak 20 kPa aralıklarla 320 kPa'a kadar yükseltilerek yapılmış olan değişik geometrik yapıdaki vorteks tüplere uygulanmıştır. Bilgisayar programından elde edilen sonuçlar doğrultusunda en fazla giren ekserji, en fazla çıkan ekserji, kayıp ekserji ve 2. yasa verimi hesaplanmıştır.

Vorteks tüpe girişteki basıncın yükselmesi, kütle debisinin artmasına neden olmuştur. Girişteki basıncın yükselmesiyle  $e_{gir}$ 'de artmıştır. Sıcak çıkış tarafındaki sıcaklık artarken, sıcak çıkış tarafındaki ekserji de artmıştır. Girişteki basınç yükselirken  $e_{soğ}$ 'da yükselmiştir. Vorteks tüp girişindeki basıncın artması, nozullardaki hızında artmasına neden olmuştur. Basınç yükselirken sıcak ve soğuk akışın kütleli debileri de artmıştır. Sıcak akışkanın kütleli debisi ve soğuk akışın kütleli debileri basınçla beraber yükseldikçe  $\Delta T = T_{sck} - T_{soğ}$ 'de yükselmiştir. Vorteks tüp girişteki basıncın aynı kalmasına karşılık  $\xi$ 'nin değişik değerlerinde, tersinmezlik hızı farklı olmuştur. Vorteks tüp girişteki basıncın artmasıyla  $e_{gir}$ 'de sürekli artmıştır. 2. yasa veriminin, vorteks tüpe giriş basıncı olan  $P_{gir}$ 'in düşük değerlerinde daha fazla,  $P_{gir}$ 'in artan değerlerinde ise daha düşük çıkmasına neden olmuştur. 2. yasa verimi, vorteks tüplerde çok düşük değerler almaktadır. Bunun nedeni vorteks tüplerde gerçekleşen süreçlerin tersinmez oluşundandır. Ancak vorteks tüplerde amaç faydalı iş enerjisinde (sıkıştırılmış akışkanın enerjisinden) faydalanılarak noktasal olarak ısıtma veya soğutma yapmaktır.

Problemin *sayısal çözümü*, PHOENICS sayısal akışkanlar dinamiği (SAD) paket programı kullanılarak yapılmıştır. Problem PHOENICS'te, çözülürken değişik

başlıklar altında incelenmiştir. Bunlar; sıcak taraf açık soğuk taraf kapalı laminar akış, sıcak ve soğuk taraf açık laminar akış, sıcak taraf açık soğuk taraf kapalı sıkıştırılabilir laminar akış, sıcak ve soğuk taraf açık sıkıştırılabilir laminar akış, sıcak taraf açık soğuk taraf kapalı sıkıştırılabilir türbülanslı akış, sıcak taraf ve soğuk taraf açık sıkıştırılabilir türbülanslı akıştır.

Problemin PHOENISC’te sayısal çözümü neticesinde elde edilen veriler sonucunda, oluşturulan hız vektörleri ve sıcaklık konturlarına ait şekiller çizilmiştir. Sayısal çözümleme neticesinde oluşturulan bu şekiller incelendiğinde, vorteks tüplerde gerçekleşen fiziksel olayların benzerlerinin olduğu görülmüştür.

*Deneyisel çalışmalar* yapılırken, iki farklı özellikte iki deneysel sistem kurulmuştur. Deneysel çalışmalarda ilk olarak vorteks tüplerin çalışırılığını test etmek amacıyla, her iki çıkıştan (sıcak ve soğuk çıkış) kütsel akışı ayarlanabilir bir vorteks tüp imal edilmiş ve bu sistemde ön çalışma olarak nitelendirilen deneyler yapılmıştır. Kurulan bu sistemde, akım sıcak ve soğuk taraftan ayrı ayrı kontrol edilerek vorteks tüplerin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel veriler kullanarak yapılan hesaplamalar neticesinde akımın sıcak çıkış tarafından kontrol edildiğinde, vorteks tüplerin performanslarının daha yüksek olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir. Vorteks tüplerin performanslarını incelemek için kurulan ikinci deneysel sistemde, bu gözlemden yararlanılmış ve akım sıcak çıkış tarafından kontrol edilmiştir.

Vorteks tüplerin performanslarını incelemek amacıyla kurulan ikinci deneysel sistemde (bu sistemde ki vorteks tüpde iki farklı özellikte 2 nozul bulunmaktadır, Bkz. Resim 5.1) sıcak-soğuk ayrışma olayının etkisinin deneysel olarak incelenmesi için, soğuk akımın girişteki akıma oranı olan  $\xi$ ’nin değişik değerlerinde deneyler yapılmıştır (Bkz. Çizelge 1.1).

Eşit nozul sayısındaki vorteks tüplerin L/D oranı değıştikçe ısıtma ve soğutma sıcaklık performansları da değışmiştir. L/D=15 olan vorteks tüpde ısıtma performansının L/D=10 olan vorteks tüpe göre daha fazla olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.

Deneysel sonuçlardan yararlanılarak oluşturulan şekiller değerlendirildiğinde, 5 mm çapındaki hareketli vida ucundaki açının  $30^\circ$  veya  $60^\circ$  olması ve sıcak çıkış konumunda bırakılması, vorteks tüp uzunluğunun çapa oranının 15 olması ve havanın 4 nozul ile vorteks tüpe gönderilmesi, akımın ise sıcak çıkış tarafından kontrol edilmesinin, daha etkin olduğu deneysel olarak görülmüştür.

En iyi performans gösteren vorteks tüp geometrik yapısı tespit edildikten sonra basınç 200 kPa'dan başlayarak 420 kPa'a kadar 20 kPa aralıklarla yükseltilerek basıncın, vorteks tüp performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel verilerden yararlanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde, 380 kPa basınca kadar vorteks tüpün, sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark olan  $\Delta T$  sürekli artış göstermiş, 380 kPa ile 420 kPa arasında ise  $\Delta T$ 'ler çok az değişim göstermiştir. Bu nedenle deneysel çalışmalarla tespit edilmiş olan en iyi performans gösteren vorteks tüpün en iyi çalışma basıncı 380 kPa olduğu görülmüştür. Bu şartlar dikkate alınarak, en iyi performans gösteren vorteks tüpü, etanol-su karışımının damıtılması işleminde kullanılmıştır.

Ayrıca vorteks tüpünde akışkan olarak *hava*,  $O_2$ ,  $CO_2$ , ve  $N_2$  kullanılarak enerji ayrıştırma olayı *farklı gazlarla* incelenmiştir. Bu çalışma yapılırken, vorteks tüp girişindeki basınç 200 kPa'dan başlayarak 100 kPa aralıklarla 700 kPa'a kadar yükseltilerek deneyler yapılmış ve deneysel verilerden yararlanılarak şekiller çizilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, sıcak akışkanın sıcaklığını en fazla havada, en az ise  $CO_2$ 'de oluşmuştur. Ancak  $CO_2$ 'in en az ısınmasına rağmen en fazla soğuma olayı  $CO_2$  gazında olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Yine şekiller incelendiğinde, sıcak akışkanın sıcaklığının en fazla havada olmasına rağmen soğuk akışkanın sıcaklığının en az havada olduğu görülmektedir. Hava,  $O_2$ ,  $CO_2$  ve  $N_2$ 'nin sıcak akışkanın sıcaklığı ile soğuk akışkanın sıcaklığı arasındaki fark olan  $\Delta T$ 'nin vorteks tüpünün giriş basıncına göre değişimleri açısından incelendiğinde  $\Delta T$ 'nin en fazla  $N_2$ 'de en az ise  $CO_2$ 'de olduğu görülmektedir.

Vorteks tüpün performansı *bulanık mantık metodu* ile de modellenmiştir. Modellemede, vorteks tüpe giren havanın giriş basıncı, giriş sıcaklığı ile vorteks tüp vana açıklığı ve  $L/D$  oranı, giriş parametreleri olarak alınmıştır. Modelleme sonunda vorteks tüp performansını belirleyen soğuk akım sıcaklığı, sıcak akım sıcaklığı, kütle akımı ve sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklık farkı değerleri elde edilmiştir. Deneysel verilerden elde edilen 100 adet veri modelde öğrenme safhasında, kalan 9 adet veride test (tahmin) safhasında kullanılmıştır. Bu çalışmada, deneysel veriler üzerinden kural çıkarımı yapılmıştır. Bulanık mantıkla modelleme sonucu elde edilen korelasyon katsayısı 0,8282 olarak elde edilmiştir ve yapılmış olan tüm deneysel veriler kullanılarak korelasyon katsayısının yükseltileceği hedeflenmektedir. Bulanık mantık metodu kullanılarak yapılan modellemeden, hassas sonuçlar elde edilebileceği ve metodun tüm Ranque-Hilsch vorteks tüpüyle yapılan deneysel çalışmalara uyarlanabileceği ortaya konmuştur.

Yapılmış olan bu çalışmanın sonuçları dikkate alınarak *ilerde yapılabilir olan çalışmalara* ışık tutmak amacıyla şu öneriler yapılabilir.

- Nozul sayısı 3, 5, 7, 8 olarak
- Nozul kesit alanı 1x1 ya da 3x3 mm
- Hareketli vida çapı 3, 4 mm,
- Hareketli vidanın üzerine diş açmadan,
- $L/D=11,12,13,14$  olarak,
- Soğuk  ıkış tarafındaki  ap=4, 6, 7 mm,
- Bu çalışmada, en iyi performans gösteren vorteks tüp kaskad tipi şekline dönüştürülerek,

- Vorteks tüpün gövdesi yatayla 30°, 60°, 90°, 120°, 150° ve 180° açı yapacak şekilde ayarlanıp, bu a ıların vorteks tüp performansına etkileri birbiriyle mukayese edilerek, deneysel olarak araştırılabilir.
- Vorteks tüplerdeki oluşan enerji ayrışma olayında, t p cidarındaki sürtünmenin etkisi büyüktür. Bu nedenle pürüzlülük katsayısı farklı olan malzemelerden vorteks tüp gövdeleri imal edilerek, bu olayın vorteks tüp performansına etkisi deneysel olarak incelenebilir.
- Vorteks tüp girişindeki havanın nem miktarı yükseltilip-azaltılarak birbirine göre mukayese edilerek vorteks tüp performansları etkisi araştırılabilir.
- De i ik özellikteki deneylerde, akış görüntüleme tekniği kullanılarak durma noktasının yeri, sıcak ve soğuk akış fiziksel olarak gözlenerek incelenebilir.
- Bulanık mantıkta ise deneysel veri sayısı arttırılarak, korelasyon katsayısı 0,99'a yakla tırılabilir.

Burada, karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüpüne yönelik analitik, sayısal, deneysel ve bulanık mantık yöntemini içeren bir çalışma ortaya konmuştur. Karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüpüyle ilgili literatür araştırmaları sonucunda bu tür bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, yapılmış olan bu çalışma, yapılabilecek olan diğer çalışmalara ışık tutması hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Özgür, A. E., “Vorteks Tüplerin Çalışma Kriterlerine Etki Eden Faktörlerin ve Endüstrideki Kullanım Alanlarının Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 1-70 (2001).
2. Hartnett, J. P., Eckert, E. R., “Experimental Study of The Velocity and Temperature Distribution in a High-Velocity Vortex Type-Flow”, **Trans. of ACME**, 79:751-755 (1957).
3. Gulyaev, A. I., “Vortex Tubes and The Vortex Effect”, **Soviet Physics-Technical Physcs**, 10(10):1441-1149 (1966).
4. Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F., Seher D., “An Investigation of Energy Separation in A Vortex Tube”, **Int. Journal of Heat Mass Transfer**, 26(3):341-348 (1983).
5. Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F., Seher, D., “A Similarty Relation for Energy Separation in A Vortex Tube”, **Int. Journal of Heat Mass Transfer**, 27(6): 911-920 (1984).
6. Balmer, R. T., “Pressure-Driven Ranque-Hilsch Temperature Separation in Liquids”, **Journal of Fluids Engineering**, 110:161-164 (1988).
7. Piralishvili, S. A., Ployaev, V. M., “Flow and Thermodynamic Characteristics of Energy Separation in A Double-Circuit Vortex Tube-An Experimental Investigation”, **Experimental Thermal and Fluid Science**, 12:399-410 (1996).
8. Ahlborn, B., Camire, J., Keller, J. U., “Low-Pressure Vortex Tubes”, **Appl. Phys.**, 29:1469-1472 (1996).
9. Saidi, M. H., Yazdi, M. R., “Exergy Model of A Vortex Tube System with Experimental Result”, **Exergy**, 24:625-632 (1999).
10. Fröhlingdorf, W., Under, H., “Numerical Investigations of Compressible Flow and The Energy Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube”, **Int. Journal of Heat and Mass Transfer**, 42(3): 415-422 (1999).
11. Ahlborn, B., Keller, J. U., Staudt, R., Treitz, G., Rebhan, E., “Limits of Temperature Separation in A Vortex Tube”, **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 27: 480-488 (1994).
12. Ahlborn, B. K., Jeffrey, M. G., “The Vortex Tube as A Classic Thermodynamic Refrigeration Cycle”, **Journal of Applied Physics**, 88(6):3645-3653 (2000).

13. Ahlborn, B. K., Gordon, J. M., "Secondary Flow in A Vortex Tube", ***Fluid Dynamics Research***, 21:73-86 (1997).
14. Behera, U., Paul, P. J., Kasthuriangan, S., Karunanithi, R., Ram, S. N., Dinesh, K., Jacob, S., "CFD Anlysisis and Experimental Investigations Towards Optimizing The Parameters of Ranque-Hilsch Vortex Tube", ***International Journal Heat and Mass Transfer***, 48:1961-1973 (2005).
15. Saidi, M. H., Valipour, M. S., "Experimental Modeling of Vortex Tube Refrigerator", ***Applied Thermal Engineering***, 23: 1971-1980 (2003).
16. Gao, C. M., Bosschaart, K. J., Zeegers, J. C., de Waele, ATAM, "Experimental Study on A Simple Ranque-Hilsch Vortex Tube", ***Cryogenics***, 45:173-183 (2005).
17. Aljuwayhel, N. F., Nellis, G. F., Klein, S. A., "Parametric and Internal Study of The Vortex Tube Using A CFD Model", ***International Journal of Refrigeration***, 28: 442-450 (2005).
18. Skye, H. M., Nellis, G. F., Klein, S. A., "Comprasion of CFD Analysis to Empirical Data in A Commercial Vortex Tube", ***International Journal of Refrigeration***, 1-10 (2005).
19. Choi, H. Z., Lee, S. W., Jeong, H. D., "A Comparison of The Cooling Effect of Compressed Cold Air and Coolant for Cylindrical Grinding with A CBN Wheel", ***Journal of Materials Processing Technology***, 111: 265-268 (2001).
20. Hajdik, B., Lorey, M., Steinle, J., Thomas, K., "Vortex Tube can Increase Liquid Hydrocarbon Recovery at Plant Inlet", ***Oil and Gas Journal***, 88-94 (1997).
21. Bruno, T. J., "Applications of The Vortex Tube in Chemical Analysis", ***Elsevier Science Publishers B. V.***, Amsterdam, 3:195-207 (1992).
22. Bruno, T. J., "Chromatographic Cryofocusing and Cryotrapping with The Vortex Tube", ***Journal of Chromatographic Science***, 32:112-115 (1994).
23. Cockerill, T., "The Ranque-Hilsch Vortex Tube", Doktora Tezi, ***Cambridge Universit, Engineering Departmen***, Sunderland, 1-243 (1995).
24. Dincer, K., Başkaya, Ş., Üçgül, İ., Uysal, B. Z., "Giriş ve Çıkış Kütlesel Debilerinin Bir Vorteks Tüpün Performansına Etkisinin Deneyisel İncelenmesi", ***ULIBTK' 03 14. Ulusal Isı Bilim ve Tekniği Kongresi***, 6-12 (2003).
25. Lin, S., Chen, J., Vatistası, G. H., "A Heat Transfer Relation for Swirl Floe in a Vortex Tube", ***J. Chem Eng***, 68: 944-947 (1990).

26. Çengel, Y. A., Boles, M. A., Derbentli, T., “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik”, *Mc Graw-Hill-Literatür Yayınları*, 1-867 (1996).
27. Üçgül, İ., Koyun, T., Akarslan, F., Şenol, R., “ Kabin Tipi Bir Konveksiyon Kurutucuda Kurutma İşleminin Ekserji Analizi”, *ULIBTK’ 03 14. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, 425-431 (2003).
28. Doğan, A., “Alt ve Üst Yüzeylerine Ayrık Isıtıcılar Yerleştirilmiş Dikdörtgen Kesitli Bir Kanalda Karışık Konveksiyonla Isı Transferinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-172 (2003).
29. internet: ABCECE Bilim Bulanık Mantık, [http: // yunus. hacettepe. edu. tr /~ abece/ bilim/dusunce10.htm](http://yunus.hacettepe.edu.tr/~abece/bilim/dusunce10.htm), 1(2005)
30. Civelek, Ö., “Daresel Plakaların Nöro-Fuzzy Tekniği ile Analizi”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1(2): 13-31 (1999).
31. Demirpençe, H., “Dolgu Barajların Yıkılmasıyla Oluşan Maksimum Taşkın Debinin Bulanık ile Modellenmesi”, *Mühendislikte Modern Yöntemler Sempozyumu, MMYS’ 2001*, 72-80 (2001).
32. Nabiye, V., “Yapay Zeka”, *Seçkin Kitapevi*, 1-724 (2003).
33. Dincer, K., Üçgül, İ., Başkaya, Ş., SİVRİOĞLU, M., Uysal, B. Z., “Bulanık Mantık Yöntemiyle Vorteks Tüp Performansının İncelenmesi”, *ULIBTK’05 15. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, 608-613 (2005).
34. Uysal, B. Z., “Akışkanlar Mekaniği”, *Alp Yayınları*, 1-432 (2003).

**EKLER**

**EK-1. LİTERATÜR ÇİZELGELERİ**

Literatürde yer alan vorteks tüplerle ilgili yapılmış olan çalışmalar teorik, nümerik ve deneysel yönden irdelenmiş ve çalışma şartlarında ilave edilerek çizelgelere dönüştürülerek, Ek-Çizelge 1.1-1.2 verilmiştir.

Ek-Çizelge 1.1. Literatürde vorteks tüple ilgili çalışmalar

| Yazar | Deneyisel, Teorik, Sayısal                                                 | L                                                                            | D       | dsöğ   | $\delta$ (nozül çapı) | Akışkan               | Pgir                     | Psöğ                                                                                                                  | Pçek | Tgir                                                                                                          | Tsöğ | Tçek | Hızlar                         |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|--------------------------------|
| 1.    | Deneyisel                                                                  | 30 inç                                                                       | 3 inç   | 1 inç  | 3/8 inç (8 adet)      | Hava                  | 10, 15, 20 psi           |                                                                                                                       |      |                                                                                                               |      |      | Ugir = 360-800 FT/sec          |
| 2.    | Teorik                                                                     |                                                                              |         |        |                       |                       |                          |                                                                                                                       |      |                                                                                                               |      |      |                                |
| 3.    | Deneyisel                                                                  | L=20 D (352 mm)                                                              | 17,6 mm | 6,5 mm | 4,1 mm                | Hava                  | 1,5-2,0-2,5-3,0-4,0-5,0  | Bu kısımdaki gerekli olan bilgiler 1,5 – 2,0 – 2,5 – 3 – 4 – 5 bar giriş basınçlarına göre grafikler ile verilmiştir. |      |                                                                                                               |      |      |                                |
| 4.    | Teorik-Deneyisel                                                           | L=20 D (352 mm)                                                              | 17,6 mm | 6,5 mm | 4,1 mm                | Hava, Oksijen, Helyum | 1,5-2,0-2,5-3,0-4,0-5,0  |                                                                                                                       |      | Bu kısımdaki gerekli olan bilgiler 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5 bar giriş basınçlarına göre grafikler ile verilmiştir |      |      |                                |
| 5.    | Deneyisel                                                                  | Ticari amaçla üretilmiş (Vortec Corp. Model 106) vorteks tüp kullanılmıştır. |         |        |                       | Sıvı su               | 103 MPa                  |                                                                                                                       |      |                                                                                                               |      |      | Ugir=30 lpm                    |
| 6.    | Deneyisel (Bu çalışmada vorteks tüp yardımcı eleman olarak kullanılmıştır) |                                                                              |         |        |                       | Hava                  | 0,5-0,69 – 0,7 – 0,8 MPa |                                                                                                                       |      |                                                                                                               |      |      | Vgir=0,4 m <sup>3</sup> /dak ) |

## Devamı

|     |                                                               |                                         |         |                                                        |                                |        |                  |                                                                           |             |       |         |        |                                                 |
|-----|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------|--------------------------------|--------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------|-------|---------|--------|-------------------------------------------------|
| 7.  | Deneysel                                                      | L=23 D, 38<br>D, 54 D                   | 18 mm   | $A_{cold}=33 \text{ mm}^2$                             | $A_{nozul} = 14, \text{ mm}^2$ | Hava   | 0,3 MPa          |                                                                           |             | 290 K | 260 K   | 330 K  | $U_{gir} \approx 15-108 \text{ m/s}$            |
| 8.  | Deneysel<br>(Vorteks tüpü yardımcı eleman olarak kullanılmış) |                                         |         | $d_{soğ}=0,5 \text{ cm},$<br>$d_{cal}=0,65 \text{ cm}$ |                                | Hava   | 0,65 MPa         |                                                                           |             |       | - 40 °C | 210 °C |                                                 |
| 9.  | Deneysel-Teorik                                               | 1300 Prinç, 900 Prinç, 1300 mm Perspeks | m 24 mm | 1/2 inç                                                | 6 mm 4mm 6mm                   | Hava   | 276 kPa- 300 kPa | $P_{gir}/P_{soğ} = 2,4 - 2,73 - 2,97 - 3,4 - 5 - 5,17 - 6,89 \text{ kPa}$ |             | 25 °C |         |        | $V_{\theta}=300 \text{ m/s}, V_r=4 \text{ m/s}$ |
| 10. | Deneysel                                                      | 60 cm                                   | 25,4 mm |                                                        |                                | Hava   | 3 bar            | 0,3 atm                                                                   | 0,3-0,8 atm | 290 K | 260 K   | 320K   | $U_{soğ}= 50 \text{ m/s}$                       |
| 11. | Deneysel<br>(Bu çalışmada 3 adet vorteks tüp kullanılmıştır)  | 500-500-1000 mm                         | 30 mm   | 4,3- 1-1mm                                             |                                | He- II |                  |                                                                           |             | 1,8 K |         |        |                                                 |

## Devamı

|     |                                           |                                                                                                                                                                                                    |           |                |                                            |                   |           |                    |          |               |                                                  |           |                                                             |
|-----|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------|--------------------------------------------|-------------------|-----------|--------------------|----------|---------------|--------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------|
| 12. | Deneysel                                  | L=9 d <sub>1</sub> ,<br>d <sub>1</sub> =30mm<br>α=70°<br>(V. Tüpün<br>soğuk çıkışı<br>ve sıcak<br>çıkışı<br>arasında 70<br>°C ‘lik aç<br>farkı vardır.<br>Sıcak çıkış<br>tarafı daha<br>geniştir.) |           |                | Sıcak çıkış= 1 inç; L/d <sub>1</sub> =9    |                   | Hava      | 0,4-; 0,5; 0,6 MPa |          |               | 298 K                                            |           |                                                             |
| 13. | Deneysel<br>Teorik-                       | 30.4 cm                                                                                                                                                                                            | 25.4 mm   | Rsoğ=4,1<br>mm |                                            | Hava              |           |                    |          |               | 270 K                                            | 300 K     |                                                             |
| 14. | Deneysel                                  | Bu çalışmada gas<br>istasyonundan<br>yararlanılmıştır.                                                                                                                                             |           |                |                                            | LPG               | 183 psig  | 116 psig           | 125 psig | 9 °C          | 2 °C                                             | 7 °C      |                                                             |
| 15. | Teorik                                    | 520 mm                                                                                                                                                                                             | (47x2) mm | (17,5x2)mm     | A <sub>nozul</sub> =363<br>mm <sup>2</sup> | Hava              | 2 bar     | 1,013 bar          | 1,38 bar | 274,3 K-294 K | 274 K                                            | (294+6) K | V <sub>r,i</sub> =19,4 m/s,<br>V <sub>A,i</sub> =199 m/s    |
| 16. | Deneysel                                  | 100-150-200<br>mm                                                                                                                                                                                  |           |                | 1-1,5 mm                                   | Hava              | 3-5-6 bar |                    |          |               | TΔ=3,5,6<br>bar için<br>garafikle<br>verilmiştir |           |                                                             |
| 17. | Deneysel-<br>Teorik<br>(farklı<br>dizayn) | 140 mm                                                                                                                                                                                             | 44 mm     |                | 2,5 mm                                     | Hava,<br>nitrojen |           |                    |          |               |                                                  |           | 100 m/s,<br>225 m/s                                         |
|     | Sayısal                                   | 0,1 m                                                                                                                                                                                              | 44 mm     |                |                                            |                   |           |                    |          |               |                                                  |           | W <sub>teget</sub> = 100 m/s,<br>W <sub>radval</sub> =3 m/s |

## Devami

[illegible]



**Ek-Çizelge 1.2. Makale no, makale yazar(lar)ı, makale ismi, makale yayın tarihi**

| <b>Makale No</b> | <b>Makale Yazar(lar)ı</b>                                    | <b>Makale ismi</b>                                                                                   | <b>Makale Yayın Tarihi</b> |
|------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <b>1.</b>        | J. P. Hartnett and R. G. Eckert                              | Experimental Study of the velocity and Temperature Distribution in a High- Velocity Vortex-Type Flow | 1957                       |
| <b>2.</b>        | B. C. Khanra and A. K. Raychaudhuri                          | Variational Treatment of an Isolated Vortex Tube In Type-II Superconductor                           | 1972                       |
| <b>3.</b>        | K. Stephan, S. Lin, M. Durst, F. Huang and D. Seher          | An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube                                               | 1983                       |
| <b>4.</b>        | K. Stephan, S. Lin, M. Durst, F. Huang and D. Seher          | A Similarity Relation for Energy Separation in a Vortex Tube                                         | 1984                       |
| <b>5.</b>        | R. T. Balmer                                                 | Pressure-Driven Ranque-Hilsch Temperature Separation in Liquids                                      | 1988                       |
| <b>6.</b>        | Thomas J. Bruno                                              | Applications of the Vortex Tube in Chemical Analysis                                                 | 1992                       |
| <b>7.</b>        | B. Ahlborn, J. U. Keller, R. Staudt, G. Treitz and E. Rebhan | Limits of Temperature Separation in a Vortex Tube                                                    | 1994                       |
| <b>8.</b>        | Thomas J. Bruno                                              | Chromatographic Cryofocusing and Cryotrapping with the Vortex tube                                   | 1994                       |
| <b>9.</b>        | Tim Cockerill                                                | Doktora Tezi                                                                                         | 1995                       |
| <b>10.</b>       | B. Alborn, J Camire and J U Keller                           | Low- pressure vortex tubes                                                                           | 1996                       |
| <b>11.</b>       | T Okamura, M. Matsuda and S. Kabashima                       | Performance of a closed type fountain effect pump.                                                   | 1996                       |

## Devamı

|     |                                                           |                                                                                                                            |      |
|-----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 12. | Sh. A. Piralishvili V. M. Polyayev                        | Flow and Thermodynamic Characteristics of Energy Separation in a Double-Circuit vortex Tube- An Experimental Investigation | 1996 |
| 13. | Boye Ahlborn, Stuart Groves                               | Secondary flow in a vortex tube                                                                                            | 1997 |
| 14. | Brock Hadjik, Manfred Lorey, Jürgen Steinle, Keith Thomas | Vortex Tube can Increase Liquid Hydrocarbon Recovery at Plant Inlet                                                        | 1997 |
| 15. | W. Fröhlingsdorf, H. Unger                                | Numerical Investigations of the Compressible Flow and the Energy Separation in the Ranque – Hilsch Vortex Tube             | 1998 |
| 16. | M.H. Saidi, M. R. Allaf Yazdi                             | Exergy model of a vortex tube system with experimental results                                                             | 1998 |
| 17. | A Gutsol and J. A. Bakken                                 | A New Vortex Method of Plasma Insulation and Explanation of the Ranque Effect                                              | 1998 |
| 18. | Manohar R. Kulkarni and Chetan R. Sardesai                | Enrichment of Methane Concentration via Separation of Gases using Vortex Tube                                              | 2002 |
| 19. | Boye K. Ahlborn, Jeffrey M. Gordon                        | The Vortex Tube as a Classic Thermodynamic Refrigeration Cycle                                                             | 2000 |
| 20. | Akira Umemura and Koichi Tomita                           | Rapid Flame Propagation in a Vortex Tube in Perspective of Vortex Breakdown Phenomena                                      | 2001 |
| 21. | H. Z. Choi , S.W. Lee, H.D. Jeong                         | A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel           | 2001 |
| 22. | D.W. Guillaume and J.L. Jolly III                         | Demonstrating the Achievement of Lower Temperatures with Two-Stage Vortex Tubes                                            | 2001 |
| 23. | V. A. Plotnikov, L. A. Tarasova, and O. A. Troshkin       | Gas Dynamics of a Swirling Flow                                                                                            | 2002 |

**Devamı**

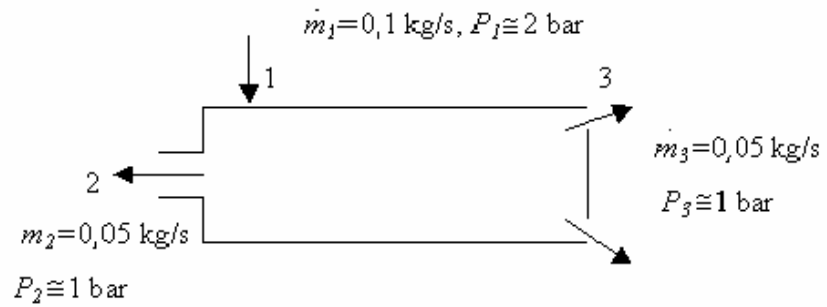
|            |                                                                      |                                                                                               |                  |
|------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b>24.</b> | Manohar R. Kulkarni and Chetan R. Sardesai                           | Enrichment of Methane Concentration via Separation of Gases using Vortex Tube                 | 2002             |
| <b>25.</b> | Brock Hajdik, Jungen Steinle, Beb Erdol, Manfred Lorey, Keith Thomas | Increasing Liquid Hydrocarbon Recovery from Natural Gas: Evaluation of the Vortex-Tube Device | (Yıl verilmemiş) |
| <b>26.</b> | M. H. Saidi, M.S. Valipour                                           | Experimental modeling of vortex tube refrigerator                                             | 2003             |
| <b>27.</b> | N. F. Aljuwayhel, G. H. Nellis, S.A. Klein                           | Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model                            | 2005             |
| <b>28.</b> | M.H. Skye, G.F. Nellis, S.A. Klein                                   | Comparison of CFD analysis to empirical data in a commercial vortex tube                      | 2005             |

## EK-2. VORTEKS TÜPE TERMODİNAMİĞİN 1. VE 2. YASASININ UYGULANMASINDA ÖRNEK HESAPLAMA

Vorteks tüpün termodinamik analizi sonucunda sunulmuş olan eşitliklerle ilgili örnek hesaplama burada yapılmıştır.

### Ek-2.1. Örnek Hesaplama

Örnek hesaptaki çözümü esas alınan sistemin genel görünüşü Ek-Şekil 2.1’de verilmiştir.



Ek-Şekil 2.1. Problemin geometrik yapısı

Ek-Şekil 2.1’de ki sistem için, Eş. 3.2 yazılarak işlem yapıldığında,

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad [3.2]$$

$$0,1 \text{ kg/s} = (0,05 + 0,05) \text{ kg/s}$$

elde edilir. Vorteks tüpe giriş, soğuk ve sıcak çıkış tarafındaki molar büyüklükler

$$\dot{n}_1 = \frac{0,1}{29} = 3,448 \cdot 10^{-3} \text{ kmol/s} = 3,448 \text{ mol/s}$$

$$\dot{n}_2 = \frac{0,05}{29} = 1,724 \cdot 10^{-3} \text{ kmol/s} = 1,724 \text{ mol/s}$$

$$\dot{n}_3 = \frac{0,05}{29} = 1,724 \cdot 10^{-3} \text{ kmol/s} = 1,724 \text{ mol/s}$$

olarak hesaplanmıştır.

### Ek-2.1.1. Vorteks tüpe termodinamiğin 1. yasasının uygulanması

Eş. 3.9 yazılarak, Ek-Şekil 2.1’de ki sistem için gerekli işlem yapılırsa

$$\dot{m}_1 T_1 = \dot{m}_2 T_2 + \dot{m}_3 T_3$$

$$0,1 \cdot 293 = 0,05 \cdot T_2 + 0,05 \cdot T_3$$

$$2 \cdot 293 = T_2 + T_3$$

$$586 = T_2 + T_3 \quad [\text{Ek-2.1}]$$

### Ek-2.1.2. Vorteks tüpe termodinamiğin 2. yasasının uygulanması

Eş. 3.13 ile problem için gerekli işlemler yapılmış ve Ek-Eş. 2.2 elde edilmiştir.

$$\Delta S_{\text{Toplam}} = \frac{0,05}{29} \left( 29 \ln \frac{T_2}{T_1} - 8,314 \ln \frac{1}{3} \right) + \frac{0,05}{29} \left( 29 \ln \frac{T_3}{T_1} - 8,314 \ln \frac{1}{3} \right) > 0$$

$$\Delta S_{\text{Toplam}} = 50 \ln \frac{T_2}{T_1} + 15,748 + 50 \ln \frac{T_3}{T_1} + 15,748$$

$$\Delta S_{\text{Toplam}} = 50 \left( \ln \frac{T_2}{293} + \ln \frac{T_3}{293} \right) + 31,496 > 0$$

$$\Delta S_{\text{Toplam}} = 50 [\ln(T_2 T_3) - 2 \ln 293] + 31,496 > 0$$

$$\ln(T_2 T_3) - 11,36 > \frac{31,496}{50}$$

$$\ln(T_2 T_3) - 11,36 > 0,63$$

$$\ln(T_2 T_3) > -0,63 + 11,36$$

$$\ln(T_2 T_3) > 10,73$$

$$(T_2 T_3) > 45\,707$$

[Ek-2.2]

Yukarıdaki hesaplamalardan çıkartılan sonuç; vorteks tüpe termodinamiğin 1. yasasının uygulanmasından soğuk ve sıcak akımların sıcaklıklarının toplamı için Ek-Eş. 2.1'in ve termodinamiğin 2. yasasının uygulanmasından, soğuk ve sıcak akımlarının sıcaklıklarının çarpımı Ek-Eş. 2.2'den bulunabilir. Ek-Eş. 2.1 ve Ek-Eş. 2.2'nin ortak çözümünden, sıcak ve soğuk akımların sıcaklıkları ( $T_2$  ve  $T_3$ ) elde edilir.

Ek-Eş. 2.1 ve Ek-Eş. 2.2'nin ortak çözümü

$$T_3 = 586 - T_2$$

$$T_2 (586 - T_2) > 45\,707$$

$$586 T_2 - T_2^2 > 45\,707$$

$$T_2^2 - 586 T_2 + 45\,707 < 0$$

$$T_2 = \frac{-b \pm (b^2 - 4ac)^{1/2}}{2a} = \frac{586 \pm 400,7}{2} = 93,493$$

$$T_2 = 93\text{ K}$$

$$T_3=586-93=493 \text{ K}$$

Bu hesaplamalar, Ek-Şekil 2.1’de ki şartlar için soğuk akım sıcaklığının ( $T_2$ ) 93 K’den daha düşük olamayacağını ve sıcak akım sıcaklığının ( $T_3$ ) 493 K’den daha büyük olamayacağını göstermektedir. İncelenen bu örnek için soğuk ve sıcak akımların akış hızları aynı alındığından ( $\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ ) soğuk ve sıcak akımlarının giriş sıcaklığına göre farkları da (Eş. 3.9) aynı olmaktadır.

$$T_1-T_2 = 293-93 = 200 \text{ K}, \quad T_3-T_2 = 493- 293 = 200 \text{ K}$$

Yukarıdaki örnekte giriş basıncı  $P_1=1,5$  bar olsaydı, hesaplama sonunda  $T_2$ ’nin 160 K’den daha aşağıda olamayacaktır. Halbuki deneysel çalışmalarda 150 K ölçüldüğü bildirilirse, bunun deneysel HATA olduğu sonucu çıkarılmalıdır veya nümerik çözüm  $T_2$ ’nin 150 K olduğunu verirse, bunun imkansız olduğu ve hatalı olduğu sonucu çıkarılmalıdır.

### Ek-2.3. Adyabatik Olan Vorteks Tüp

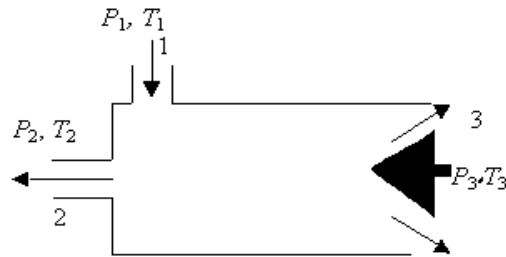
Yukarıda açıklanan termodinamik analizi değişik şartlarda ve kolayca yapabilmek için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Yazılmış olan bu programla ilgili özellikler Ek-Şekil 2.2’de verilmiştir. Bu program ile istenilen parametrik çalışma bilgisayarda yapılabilir ve değişik parametrelerin etkileri irdelenebilir. Giriş sıcaklığı 20 °C, girişteki akışkanın kütleli debisi 0,1 kg/s alınarak ve soğuk ve sıcak akımların çıkış basınçlarının yaklaşık aynı ve 1 bar’a eşit olduğu kabul edilerek giriş basıncı 3 bar alındığı takdirde termodinamik hesaplama yöntemi ile analitik olarak hesaplanan en düşük soğuk akım sıcaklığı ile elde edilebilecek en yüksek sıcak akım sıcaklığının soğuk akımın akış hızının girişteki akış hızına oranı ile değişimi Ek-Şekil 2.3’de gösterilmiştir.  $\xi = \dot{m}_{soğ} / \dot{m}_{gir} > 0,8$  olduğunda, sıcak akımın sıcaklığı çok hızlı olarak çok yüksek değerlere çıktığından bu aralık pratikte değeri olmayacağından dikkate alınmamıştır. Benzer bir inceleme giriş basıncı 6 bar için Ek-Şekil 2.4’de

verilmiştir. Ek-Şekil 2.5’de ise giriş basıncının 3 bar’dan 6 bar’a çıkarıldığında soğuk akım sıcaklığının nasıl etkilendiği görülmektedir.

Ek-Sekil 2.2. Advabatik vorteks tüp

| Havanın özellikleri           |                      |
|-------------------------------|----------------------|
| $T, ^\circ\text{C}$           | 20                   |
| $T, \text{K}$                 | 293                  |
| $C_p, \text{J/kgK}$           | 1004,42              |
| $\mu, \text{kg/ms}$           | 1,81E-05             |
| $k, \text{W/m K}$             | 0,02524              |
| $Pr$                          | 0,721                |
| $P, \text{atm}$               | 0,901316             |
| $\rho, \text{kg/m}^3$         | 1,087                |
| $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$ | 2,31E <sup>-05</sup> |

|                               |           |        |                  |
|-------------------------------|-----------|--------|------------------|
| $h, \text{J/kg}$              | 294 296,3 | 294,30 | $\text{kJ/kg}$   |
| $P_{\text{gir}}, \text{bar}$  | 6         |        |                  |
| $T_{\text{gir}}, \text{K}$    | 293       | 20     | $^\circ\text{C}$ |
| $m_{\text{gir}}, \text{kg/s}$ | 0,1       |        |                  |
|                               | 3,45      | mol/s  |                  |

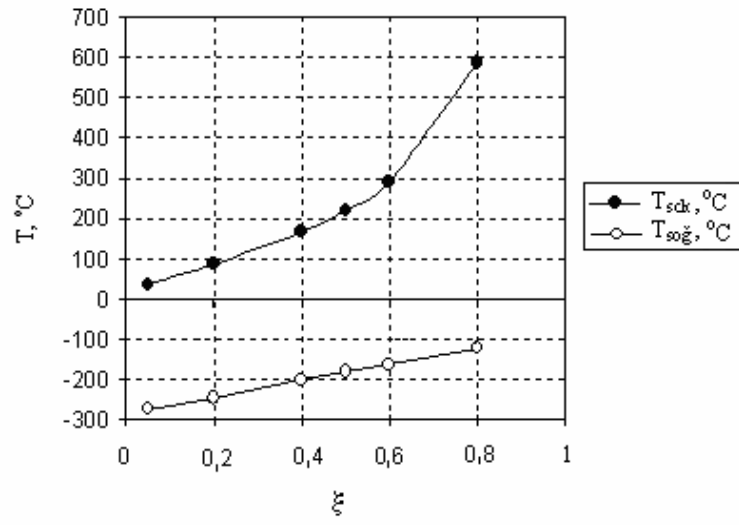


|                         |      |              |
|-------------------------|------|--------------|
| $\Delta h$              | 0    | $\text{W}$   |
| $\Delta S_{\text{Top}}$ | 0,00 | $\text{W/K}$ |

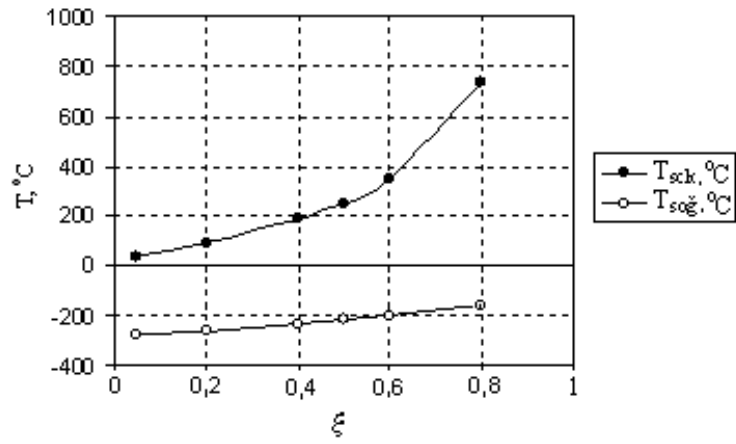
|                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| $m_{\text{soğ}}, \text{kg/s}$       | 0,08                  |
|                                     | 2,76 mol/s            |
| $P_{\text{soğ}}, \text{bar}$        | 1,00                  |
| $T_{\text{soğ}}, \text{K}$          | 113                   |
|                                     | -160 $^\circ\text{C}$ |
| $h, \text{J/kg}$                    | 113 934               |
|                                     | 113,93 $\text{kJ/kg}$ |
| $\Delta S_{\text{soğ}}, \text{W/K}$ | -35,16                |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| $T_{\text{ref}}, \text{K}$            | 0   |
| $\xi = m_{\text{soğ}}/m_{\text{gir}}$ | 0,8 |

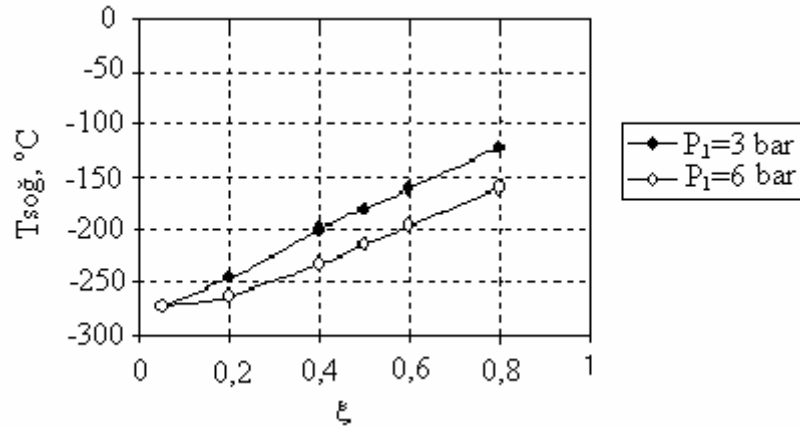
|                                     |                        |
|-------------------------------------|------------------------|
| $m_{\text{sck}}, \text{kg/s}$       | 0,02                   |
|                                     | 0,69 mol/s             |
| $P_{\text{sck}}, \text{bar}$        | 1                      |
| $T_{\text{sck}}, \text{K}$          | 1011                   |
|                                     | 738 $^\circ\text{C}$   |
| $h, \text{J/kg}$                    | 1 015 746              |
|                                     | 1015,75 $\text{kJ/kg}$ |
| $\Delta S_{\text{sck}}, \text{W/K}$ | 35,16                  |



Ek-Şekil 2.3. Sıcak ve soğuk akımın sıcaklığının  $\xi$  ile değişimi,  $P_1=3$  bar,  $P_2=P_3=1$  bar,  $T_1=20$  °C



Ek-Şekil 2.4. Sıcak ve soğuk akımın sıcaklığının  $\xi$  ile değişimi,  $P_1=6$  bar,  $P_2=P_3=1$  bar,  $T_1=20$  °C



Ek-Şekil 2.5. Soğuk akımının sıcaklığının  $\xi$  ile değişimi,  $P_1=3$  ve 6 bar,  $P_2=P_3=1$  bar,  $T_1=20$  °C

#### Ek-2.4. Adyabatik Olmayan Vorteks Tüp

Termodinamik analizi değişik şartlarda ve kolayca yapabilmek için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Adyabatik olmayan vorteks tüpler için yazılmış olan programla ilgili özellikler Ek-Şekil 2.6'da verilmiştir.

Termodinamiğin 2. yasası vorteks tüplere uygulandığında, adyabatik olarak işlem yapılmıştır. Bu nedenle dışarıya olan herhangi bir ısı kaybı dikkate alınmamıştır. Vorteks tüpün içinde ki dış halkada ki bölgenin sıcak olduğu dikkate alınırsa o bölgeden dışarıya olan ısı kaybının önceki kısımda verilen termodinamik analizin bu ısı kaybını nasıl etkilediği incelenmiştir. Entalpi hesabı için duvarın iç yüzeyinde duvar ile yüksek hızda dönen akışkanın ısı transfer katsayısı belirlemektedir.  $h_o$  vorteks tüpün dış yüzeyinden çevreye olan ısı kaybının doğal konveksiyonla olduğu ve dış yüzeyde ki ısı transfer katsayısı  $h_o=20$  W/m<sup>2</sup>K olarak alınabileceği varsayımı yapılmıştır (Buradaki çalışmada ışıma ile ısı transferi etkisi dikkate alınmamıştır).

Bu hesaplamaların gösterdiği gibi dışarıya olan ısı kaybı 87 W civarındadır (Bkz. Ek-Şekil 2.6). Bu değer, giren akımın entalpisi ile yaklaşık 29 430 W ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buradan da dışarıya olan ısı kaybının etkisinin çok küçük ve ihmal edilebilir olduğu sonucu çıkartılabilir. Nitekim

örnek olarak incelenen  $P_{gir}=6$  bar olduğunda ve  $\xi=0,5$  için  $T_{soğ}=1^{\circ}\text{C}$  daha düşüktür ( $253^{\circ}\text{C}$ ).  $P_{gir}=6$  bar ve  $\xi=0,8$  için  $T_{soğ}=1^{\circ}\text{C}$  daha düşük ( $159^{\circ}\text{C}$ ) ve  $T_{çek}=5^{\circ}\text{C}$  daha düşüktür ( $733^{\circ}\text{C}$ ).

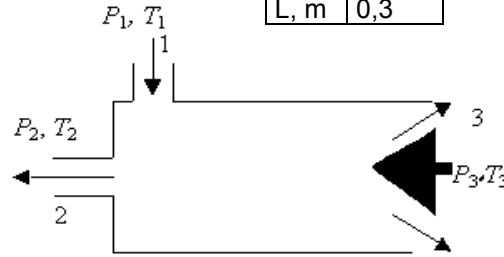
Ek-Şekil 2.6: Adyabatik olmayan vorteks tüp

| Havanın özellikleri           |                      |
|-------------------------------|----------------------|
| $T, ^\circ\text{C}$           | 20                   |
| $T, \text{K}$                 | 293                  |
| $C_p, \text{J/kgK}$           | 1004,42              |
| $\mu, \text{kg/ms}$           | 1,81E-05             |
| $k, \text{W/m K}$             | 0,02524              |
| $Pr$                          | 0,721                |
| $P, \text{atm}$               | 0,901316             |
| $\rho, \text{kg/m}^3$         | 1,087                |
| $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$ | 2,31E <sup>-05</sup> |

|                                     |          |                  |
|-------------------------------------|----------|------------------|
| $m_{\text{soğ}}, \text{kg/s}$       | 0,05     |                  |
|                                     | 1,72     | mol/s            |
|                                     | 1,00     |                  |
| $T_{\text{soğ}}, \text{K}$          | 59       |                  |
|                                     | -214     | $^\circ\text{C}$ |
| $h, \text{J/kg}$                    | 58999,68 |                  |
|                                     | 59,00    | kJ/kg            |
| $\Delta S_{\text{soğ}}, \text{W/K}$ | -55,02   |                  |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| $T_{\text{ref}}, \text{K}$            | 0   |
| $\xi = m_{\text{soğ}}/m_{\text{gir}}$ | 0,5 |

|               |      |
|---------------|------|
| $d, \text{m}$ | 0,02 |
| $L, \text{m}$ | 0,3  |



|                         |      |     |
|-------------------------|------|-----|
| $\Delta h$              | -87  | W   |
| $\Delta S_{\text{Top}}$ | 0,00 | W/K |

|                               |           |        |                  |
|-------------------------------|-----------|--------|------------------|
| $h, \text{J/kg}$              | 294 296,3 | 294,30 | kJ/kg            |
| $P_{\text{gir}}, \text{bar}$  | 6         |        |                  |
| $T_{\text{gir}}, \text{K}$    | 293       | 20     | $^\circ\text{C}$ |
| $m_{\text{gir}}, \text{kg/s}$ | 0,1       |        |                  |
|                               | 3,45      | mol/s  |                  |

|                                     |          |                  |
|-------------------------------------|----------|------------------|
| $m_{\text{sck}}$                    | 0,05     |                  |
|                                     | 1,72     | mol/s            |
| $P_{\text{sck}}, \text{bar}$        | 1        |                  |
| $T_{\text{sck}}, \text{K}$          | 526      |                  |
|                                     | 253      | $^\circ\text{C}$ |
|                                     |          |                  |
| $h, \text{J/kg}$                    | 527848,8 |                  |
|                                     | 527,85   | kJ/kg            |
|                                     |          |                  |
| $\Delta S_{\text{sck}}, \text{W/K}$ | 55,02    |                  |

| Dışarıya ısı kaybı                 |          |
|------------------------------------|----------|
| $M, m_{\text{sck}}/m_{\text{soğ}}$ | 1        |
| $Re$                               | 43 952   |
| $Nu$                               | 514,309  |
| $h_i, \text{W/m}^2\text{-K}$       | 649,0482 |
| $h_o, \text{W/m}^2\text{-K}$       | 20       |
| $U_i, \text{W/m}^2\text{-K}$       | 23,14419 |
| $\Delta T, \text{K}$               | 200      |
| $q/A, \text{W/m}^2$                | 629      |
| $Q/W$                              | 87       |

$P_{\text{gir}}=6$  bar ve  $\xi=0,5$  için  $T_{\text{soğ}}$  aynı ve  $T_{\text{sck}} 1$   $^\circ\text{C}$  daha düşük ( $253$   $^\circ\text{C}$ )'tür.

$P_{\text{gir}}=6$  bar ve  $\xi=0,8$  için,  $T_{\text{soğ}} 1$   $^\circ\text{C}$  daha düşük ( $159$   $^\circ\text{C}$ ) ve  $T_{\text{sck}} 5$   $^\circ\text{C}$  daha düşük ( $733$   $^\circ\text{C}$ )'tür.

**EK-3.  $T_1/T_2$  CİNSİNDEN  $P_1/P_2$ 'NİN EN AZ NE OLMASI GEREKTİĞİNE AİT  
ÖRNEK HESAPLAMA**

$$\xi=0,6$$

$$T_1=20\text{ }^{\circ}\text{C} \equiv 293\text{ K}$$

$P_2 \cong P_3=1\text{ bar}$  ise ve  $T_2 = -20\text{ }^{\circ}\text{C} \equiv 253\text{ K}$  olması isteniyorsa,

Eş. 3.27'den  $P_1/P_2$  oranı bulunabilir.

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) > \left\{ \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\xi} \left[ \frac{(T_1/T_2)(1-\xi)}{(T_1/T_2) - \xi} \right]^{(1-\xi)} \right\}^{\frac{\tilde{c}_p}{R}} \quad [3.27]$$

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) > \left\{ \left(\frac{293}{253}\right)^{0,6} \left[ \frac{(293/253)0,4}{(293/253) - 0,6} \right]^{(1-0,6)} \right\}^{\frac{29}{8,314}}$$

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) > (1,01364)^{(29/8,314)}$$

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) > 1,04839 \cong \left(\frac{P_1}{P_2}\right) > 1,05$$

olmalıdır

Bu durumda, Eş. 3.24'den,

$$T_3 = \frac{(T_1 - \xi T_2)}{(1 - \xi)} = \frac{293 - (0,6)(253)}{1 - 0,6} = 353\text{ K} \cong 80\text{ }^{\circ}\text{C}$$

olur.

Aynı şartlarda  $T_2 = -40\text{ }^{\circ}\text{C} \cong 233\text{ K}$  istenirse,

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) > \left\{ \left(\frac{293}{233}\right)^{0,6} \left[ \frac{(293/233)0,4}{(293/233)-0,6} \right]^{(1-0,6)} \right\}^{3,488}$$

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) > \{1,0308\}^{3,488}$$

$$\frac{P_1}{P_2} > 1,1116$$

ve

$$T_3 = \frac{(T_1 - \xi T_2)}{(1 - \xi)} = \frac{293 - (0,6)(233)}{1 - 0,6} = 383\text{ K} \cong 110\text{ }^{\circ}\text{C}$$

bulunur.

#### EK-4. EKSERJİ ANALİZİNDE ÖRNEK HESAPLAMA

$$L/D=15, N=4, d=6,$$

Hareketli vida konumu; L'de,

$$\xi=0,59$$

$$P_o \cong 0,913 \text{ bar} = 91\,300 \text{ Pa (Ankara)}$$

$$P_1 = 320 \text{ kPa}$$

$$P_2 = P_3 = 92 \text{ kPa (Ankara)}$$

$$T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_o = 273,15 + 20 = 293,15 \text{ K}$$

$$T_{gir}(T_1) = 302,8 \text{ K}$$

$$T_{sck}(T_3) = 324,5 \text{ K}$$

$$T_{soğ}(T_2) = 282,8 \text{ K}$$

$$\dot{m}_{gir} (\dot{m}_1) = 0,0046024 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{sck} (\dot{m}_3) = 0,00188 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{soğ} (\dot{m}_2) = 0,00271 \text{ kg/s}$$

$$c_p = 1004,42 \text{ J/kgK}$$

$$R' = 287 \text{ J/kgK}$$

Entropi değişimi, Ek-Eş. 4.1 ile bulunabilir. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki entropi (birim kütle için) değişimi sırasıyla Ek-Eş. 4.2, Ek-Eş. 4.3, Ek-Eş. 4.4'den hesaplanmıştır.

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R' \ln \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{Ek-4.1}]$$

$$\Delta s_{gir} = s_{gir} - s_o = c_p \ln \frac{T_{gir}}{T_o} - R' \ln \frac{P_{gir}}{P_o} \quad [\text{Ek-4.2}]$$

$$\Delta S_{sck} = s_{sck} - s_o = c_p \ln \frac{T_{sck}}{T_o} - R' \ln \frac{P_{sck}}{P_o} \quad [\text{Ek-4.3}]$$

$$\Delta S_{soğ} = s_{soğ} - s_o = c_p \ln \frac{T_{soğ}}{T_o} - R' \ln \frac{P_{soğ}}{P_o} \quad [\text{Ek-4.4}]$$

$$\Delta S_{gir} = s_{gir} - s_o = 1004,42 \ln \frac{302,8}{293,15} - 287 \ln \frac{320000}{91300} = -320,14 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta S_{sck} = s_{sck} - s_o = 1004,42 \ln \frac{324,5}{293,15} - 287 \ln \frac{92000}{91300} = 99,85 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta S_{soğ} = 1004,42 \ln \frac{282,8}{293,15} - 287 \ln \frac{92000}{91300} = -38,3 \text{ J/kgK}$$

Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki entalpi değişimi (birim kütle için) sırasıyla Ek-Eş. 4.5-4.7'den bulunmuştur.

$$(h_{gir} - h_o) = c_p(T_1 - T_o) \quad [\text{Ek-4.5}]$$

$$(h_{sck} - h_o) = c_p(T_3 - T_o) \quad [\text{Ek-4.6}]$$

$$(h_{soğ} - h_o) = c_p(T_2 - T_o) \quad [\text{Ek-4.7}]$$

$$h_{gir} - h_o = 1004,42 * (302,8 - 293,15) = 9692,6 \text{ J/kg}$$

$$h_{sck} - h_o = 1004,42 * (324,5 - 293,15) = 31488 \text{ J/kg}$$

$$h_{soğ} - h_o = 1004,42 * (282,8 - 293,15) = -10395,7 \text{ J/kg}$$

Vorteks tüpe giren ekserji Ek-Eş. 4.8 ile verilmiştir.

$$e_{gir} = (h_{gir} - h_o) - T_o (s_{gir} - s_o) \quad [\text{Ek-4.8}]$$

$$e_{gir} = 9\,692,6 - 293,15 * (-320,14) = 103\,541 \text{ J/kg}$$

Sıcak akım tarafından çıkan ekserji

$$e_{sck} = (h_{sck} - h_o) - T_o (s_{sck} - s_o) \quad [\text{Ek-4.9}]$$

$$e_{sck} = 31\,488 - 293,15 * 99,85 = 2\,217 \text{ J/kg}$$

Ek-Eş. 4.9'dan bulunmuş ve soğuk akım tarafından çıkan ekserji, Ek-Eş. 4.10 ile hesaplanmıştır.

$$e_{soğ} = (h_{soğ} - h_o) - T_o (s_{soğ} - s_o) \quad [\text{Ek-4.10}]$$

$$e_{soğ} = -10395,7 - 293,15 * (-38,3) = 832 \text{ J/kg}$$

vorteks tüpten çıkan toplam ekserji ise,

$$e_{çkş} = (1 - \xi) e_{sck} + \xi e_{soğ} \quad [\text{Ek-4.11}]$$

$$e_{çkş} = (1 - 0,59) * (2217) + 0,59 * 832 = 418 \text{ J/kg}$$

dir. Tersinmezlik hızı olan  $\dot{I}$  ise Eş. 3.51 ile bulunmuştur.

$$e_k = e_{gir} - e_{çkş} \quad [\text{Ek-4.12}]$$

$$e_k = 105670 - (418) = 105252 \cong 105,2 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{I} = \dot{m}_{gir} * e_k \quad [3.51]$$

$$\dot{I} = 0,0046024 * 105,2 = 0,484 \text{ kW}$$

İkinci yasa verimi,

$$\eta_{II} = \frac{\sum \dot{m}_{çkş} e_{çkş}}{\sum \dot{m}_{gir} e_{gir}} \quad [3.52]$$

$$\eta_{II} = \frac{418 \text{ kJ/kg}}{103\,541 \text{ kJ/kg}} = \%1,42$$

olarak bulunmuştur.

Burada yapılmış olan hesaplamalar dikkate alınarak, vorteks tüpün ekserji analizi için bir bilgisayar program hazırlanarak 4 ve 6 nozullu vorteks tüpe uygulanmıştır.

## EK-5. Q1 ve RESULT

Sayısal çözümü yapılmış olan probleme ait Q<sub>1</sub> Ek-5.1'de, Result ise Ek-5.2'de verilmiştir.

### Ek-5.1. Q<sub>1</sub>

TALK=T;RUN(1,1)

GROUP 1. Run title and other preliminaries

TEXT(TURBULANSLI, IKI TARAFTA ACIK AKIS)

REAL(UIN,VIN,WIN,TIN,HIN,CP,ROIN,PIN)

REAL(TKEIN,EPSIN,rvt,rsgk,vrtduvkal,vrticcap)

REAL(rkalan,nzluz,Lvrt,Lvrt1,Lvrt2,Lvrt3,L1,icduvar,patm)

REAL(Y1,Y2,Y3,YTop,Z1,Z2,nzlhuc,Z31,Z32,Z33,Zgir1,Zgir2,Pank)

REAL(vrteng,Yust,YTop2,Ykabuk,vrtkabuk)

TIN=23.+273.

UIN=210.

VIN=0.1

WIN=0.1

CP=1007.

HIN=TIN\*CP

PIN=92030.

|           |                                                            |
|-----------|------------------------------------------------------------|
| rvt       | : Vorteks tup yaricapi(dis duvar kalınlıgı dahil), m       |
| rsgk      | : Soguk cikis yaricapi, m                                  |
| vrtduvkal | : Vorteks tup duvar kalınlıgı, m                           |
| vrticcap  | : Vorteks tupun ic capi, m                                 |
| rkalan    | : V.T.'un iccapi ile soguk cikis cikis arasındaki fark, m  |
| nzluz     | : Nozulun z-yonundeki uzunlugu, m                          |
| Lvrt      | : Vorteks tup uzunlugu, m                                  |
| Lvrt1     | : Vorteks tup uzunluginun 1.bolumu, m                      |
| Lvrt2     | : Vorteks tup uzunluginun 2.bolumu, m                      |
| Lvrt3     | : Vorteks tup uzunluginun 3.bolumu, m                      |
| icduvar   | : Vorteks tupun soguk cikis tarafındaki duvar kalınlıgı, m |
| patm      | : atm. basinci(Ankara icin), N/m <sup>2</sup>              |
| Y1        | : rsgk'in y-yonundeki hucre sayisi                         |
| Y2        | : rkalan'in y-yonundeki hucre sayisi                       |
| Y3        | : vrtduvkal y-yonundeki hucre sayisi                       |
| Ytop      | : Y1+Y2+Y3                                                 |
| Z1        | : icduvarin z-yonundeki hucre sayisi                       |
| Z2        | : L1'in z-yonundeki hucre sayisi                           |
| nzlhuc    | : Nozulun z-yonundeki hucre sayisi                         |
| Z31       | : Lvrt1'in z-yonundeki hucre sayisi                        |
| Z32       | : Lvrt2'in z-yonundeki hucre sayisi                        |

Z33 : Lvrt3'in z-yonundeki hucre sayisi  
 Zgir1 : Nozul girisinin baslangic itibari ile z-yonundeki hucre sayisi  
 Zgir2 : Nozul cikisinin bitis itibari ile z-yonundeki hucre sayisi  
 Pank : ANKARA icin giristeki basinc duzeltme faktoru

rvrt=0.0075  
 rsgk=0.0025  
 vrtduvkal=0.003  
 vrticcap=rvrt-vrt duvkal  
 rkalan= vrticcap-rsgk  
 nzluz=0.004  
 Lvrt=0.135  
 Lvrt1=0.005  
 Lvrt2=Lvrt-(Lvrt1+Lvrt3)  
 Lvrt3=0.003  
 icduvar=0.005  
 patm=92000.  
 Y1=3.  
 Y2=2.  
 Y3=2.  
 Yust=2.  
 vrteng=0.0025  
 vrtkabuk=0.002  
 YTop=Y1+Y2+Y3  
 YTop2=YTop+Yust  
 Ykabuk=1.  
 Z1=5.  
 nzlhuc=2.  
 Z31=4.  
 Z32=32.  
 Z33=3.  
 Zgir1=Z1+1.  
 Zgir2=Zgir1+nzlhuc-1  
 Pank=PIN/100000.

GROUP 2. Transience; time-step specification  
 STEADY=T

GROUP 3. X-direction grid specification  
 CARTES=F

GRDPWR(X,30,2\*3.14159,1.0)

GROUP 4. Y-direction grid specification  
 NREGY=5

IREGY=1;GRDPWR(Y,Y1,rsgk,1.0)

IREGY=2;GRDPWR(Y,Y2,rkalan,1.0)

IREGY=3;GRDPWR(Y,Y3,vrtduvkal,1.0)

IREGY=4;GRDPWR(Y,Yust,vrteng,1.0)

IREGY=5;GRDPWR(Y,Ykabuk,vrtkabuk,1.0)

GROUP 5. Z-direction grid specification

NREGZ=5  
 IREGZ=1;GRDPWR(Z,Z1,icduvar,1.0)  
 IREGZ=2;GRDPWR(Z,nzlhuc,nzluz,1.0)  
 IREGZ=3;GRDPWR(Z,Z31,Lvrt1,1.0)  
 IREGZ=4;GRDPWR(Z,Z32,Lvrt2,1.0)  
 IREGZ=5;GRDPWR(Z,Z33,Lvrt3,1.0)

GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion

GROUP 7. Variables stored, solved & named

SOLVE(P1,U1,V1,W1,H1)  
 SOLUTN(P1,Y,Y,Y,N,N,N)  
 SOLUTN(H1,Y,Y,N,Y,N,N)  
 TURMOD(KEMODL)  
 STORE(ENUT,TMP1)

GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices

TERMS(H1,Y,Y,N,N,Y,N)

GROUP 9. Properties of the medium (or media)

ENUL=1.487E-5  
 RHO1=GRND5  
 PRNDTL(H1)=0.7092  
 RHO1B=1./287.  
 PRESS0=101000.  
 TMP1=GRND5  
 TMP1A=HIN+0.5\*(UIN\*UIN+VIN\*VIN+WIN\*WIN)  
 TMP1B=CP  
 STORE(RHO1)

GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties

GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields

TKEIN=0.844  
 EPSIN=TKEIN\*\*1.5\*10.0  
 FIINIT(U1)=UIN  
 FIINIT(V1)=VIN  
 FIINIT(W1)=WIN  
 FIINIT(H1)=HIN  
 FIINIT(P1)=PIN  
 FIINIT(KE)=TKEIN  
 FIINIT(EP)=EPSIN

CONPOR(0.0,CELL,-1,-NX,-(YTop+1),-NY,-12,-(NZ))  
 CONPOR(0.0,CELL,-1,-NX,-1,-3,-(NZ-1),-(NZ))

GROUP 12. Convection and diffusion adjustments

GROUP 13. Boundary conditions and special sources

XCYCLE=T  
 PATCH(INLET1,NORTH,2,7,NY,NY,6,7,1,1)

```

COVAL(INLET1,P1,FIXFLU,1.2*Pank*UIN)
COVAL(INLET1,U1,FIXVAL,UIN)
COVAL(INLET1,V1,FIXVAL,VIN)
COVAL(INLET1,W1,FIXVAL,WIN)
COVAL(INLET1,H1,FIXVAL,HIN)
COVAL(INLET1,KE,FIXVAL,TKEIN)
COVAL(INLET1,EP,FIXVAL,EPSIN)

```

```

PATCH(INLET2,EAST,9,14,NY,NY,6,7,1,1)
COVAL(INLET2,P1,FIXFLU,1.2*Pank*UIN)
COVAL(INLET2,U1,FIXVAL,UIN)
COVAL(INLET2,V1,FIXVAL,VIN)
COVAL(INLET2,W1,FIXVAL,WIN)
COVAL(INLET2,H1,FIXVAL,HIN)
COVAL(INLET2,KE,FIXVAL,TKEIN)
COVAL(INLET2,EP,FIXVAL,EPSIN)

```

```

PATCH(INLET3,SOUTH,16,23,NY,NY,6,7,1,1)
COVAL(INLET3,P1,FIXFLU,1.2*Pank*UIN)
COVAL(INLET3,U1,FIXVAL,UIN)
COVAL(INLET3,V1,FIXVAL,VIN)
COVAL(INLET3,W1,FIXVAL,WIN)
COVAL(INLET3,H1,FIXVAL,HIN)
COVAL(INLET3,KE,FIXVAL,TKEIN)
COVAL(INLET3,EP,FIXVAL,EPSIN)

```

```

PATCH(INLET4,WEST,25,30,NY,NY,6,7,1,1)
COVAL(INLET4,P1,FIXFLU,1.2*Pank*UIN)
COVAL(INLET4,U1,FIXVAL,UIN)
COVAL(INLET4,V1,FIXVAL,VIN)
COVAL(INLET4,W1,FIXVAL,WIN)
COVAL(INLET4,H1,FIXVAL,HIN)
COVAL(INLET4,KE,FIXVAL,TKEIN)
COVAL(INLET4,EP,FIXVAL,EPSIN)

```

```

PATCH(OUTLET1,LOW,1,NX,1,3,1,1,1,1)
COVAL(OUTLET1,P1,FXP,patm)
COVAL(OUTLET1,U1,ONLYMS,SAME)
COVAL(OUTLET1,V1,ONLYMS,SAME)
COVAL(OUTLET1,W1,ONLYMS,SAME)
COVAL(OUTLET1,H1,ONLYMS,SAME)
COVAL(OUTLET1,KE,ONLYMS,SAME)
COVAL(OUTLET1,EP,ONLYMS,SAME)

```

```

PATCH(OUTLET2,HIGH,1,NX,4,5,NZ,NZ,1,1)
COVAL(OUTLET2,P1,FXP,patm)
COVAL(OUTLET2,U1,ONLYMS,0.0)

```

```

COVAL(OUTLET2,V1,ONLYMS,0.0)
COVAL(OUTLET2,W1,ONLYMS,SAME)
COVAL(OUTLET2,H1,ONLYMS,SAME)
COVAL(OUTLET2,KE,ONLYMS,SAME)
COVAL(OUTLET2,EP,ONLYMS,SAME)

```

```

PATCH(INWALL,LWALL,1,NX,4,NY,1,Z1,1,1)
COVAL(INWALL,U1,FIXVAL,0.0)
COVAL(INWALL,V1,FIXVAL,0.0)
COVAL(INWALL,W1,FIXVAL,0.0)
COVAL(INWALL,KE,GRND2,GRND2)
COVAL(INWALL,EP,GRND2,GRND2)

```

```

PATCH(OUTWALL2,HWALL,1,NX,6,NY,NZ,NZ,1,1)
COVAL(OUTWALL2,U1,FIXVAL,0.0)
COVAL(OUTWALL2,V1,FIXVAL,0.0)
COVAL(OUTWALL2,W1,FIXVAL,0.0)
COVAL(OUTWALL2,KE,GRND2,GRND2)
COVAL(OUTWALL2,EP,GRND2,GRND2)

```

```

PATCH(UPWALL11,NWALL,1,1,NY,NY,6,7,1,1)
COVAL(UPWALL11,U1,FIXVAL,0.0)
COVAL(UPWALL11,W1,FIXVAL,0.0)
COVAL(UPWALL11,KE,GRND2,GRND2)
COVAL(UPWALL11,EP,GRND2,GRND2)

```

```

PATCH(UPWALL12,EWALL,8,8,NY,NY,6,7,1,1)
COVAL(UPWALL12,U1,FIXVAL,0.0)
COVAL(UPWALL12,W1,FIXVAL,0.0)
COVAL(UPWALL12,KE,GRND2,GRND2)
COVAL(UPWALL12,EP,GRND2,GRND2)

```

```

PATCH(UPWALL13,SWALL,15,15,NY,NY,6,7,1,1)
COVAL(UPWALL13,U1,FIXVAL,0.0)
COVAL(UPWALL13,W1,FIXVAL,0.0)
COVAL(UPWALL13,KE,GRND2,GRND2)
COVAL(UPWALL13,EP,GRND2,GRND2)

```

```

PATCH(UPWALL14,WWALL,24,24,NY,NY,6,7,1,1)
COVAL(UPWALL14,U1,FIXVAL,0.0)
COVAL(UPWALL14,W1,FIXVAL,0.0)
COVAL(UPWALL14,KE,GRND2,GRND2)
COVAL(UPWALL14,EP,GRND2,GRND2)

```

```

PATCH(UPWALL2,NWALL,1,NX,6,NY,8,11,1,1)
COVAL(UPWALL2,U1,FIXVAL,0.0)
COVAL(UPWALL2,W1,FIXVAL,0.0)

```

COVAL(UPWALL2,KE,GRND2,GRND2)  
 COVAL(UPWALL2,EP,GRND2,GRND2)

PATCH(UPWALL3,NWALL,1,NX,(Y1+Y2+1),YTop,12,NZ-1,1,1)  
 COVAL(UPWALL3,U1,FIXVAL,0.0)  
 COVAL(UPWALL3,W1,FIXVAL,0.0)  
 COVAL(UPWALL3,KE,GRND2,GRND2)  
 COVAL(UPWALL3,EP,GRND2,GRND2)

GROUP 14. Downstream pressure for PARAB=.TRUE.

GROUP 15. Termination of sweeps

LSWEEP=400.

GROUP 16. Termination of iterations

GROUP 17. Under-relaxation devices

RESTRT(ALL)

RELAX(U1,FALSDT,0.1)

RELAX(V1,FALSDT,0.1)

RELAX(W1,FALSDT,0.1)

RELAX(H1,FALSDT,0.1)

RELAX(P1,LINRLX,0.1)

RELAX(RHO1,FALSDT,0.1)

RELAX(KE,FALSDT,0.1)

RELAX(EP,FALSDT,0.1)

GROUP 18. Limits on variables or increments to them

GROUP 19. Data communicated by satellite to GROUND

GROUP 20. Preliminary print-out

GROUP 21. Print-out of variables

NXPRIN=10;NYPRIN=10;NZPRIN=10

IXMON=NX/2.0

IYMON=NY/2.0

IZMON=NZ/2.0

GROUP 22. Spot-value print-out

GROUP 23. Field print-out and plot control

GROUP 24. Dumps for restarts

STOP

## EK-5.2. Result

```

*****

-----
      CCCC HHH      PHOENICS - EARTH
      CCCCCC      HHH      (C) Copyright 1995
      CCCCCC see HH      Concentration Heat and Momentum Ltd
      CCCCCC POLIS HH      All rights reserved.
      CCCCCC for HH      CHAM Ltd, Bakery House, 40 High St
      CCCCCC new HH      Wimbledon, London, SW19 5AU
      CCCCC features H      Tel: 0181-947-7651
      CCCCCC      HH      Facsimile: 0181-879-3497
      CCCC HHH      E-mail: phoenix@cham.demon.co.uk
-----

*****

***----- STORAGE INFORMATION -----***
F DIMENSION = 10000000 EST MIN DIMENSION = 104265
OCCUPIED = 538385

DEP VARBLS = 193200 OLD VARBLS = 0
3D COEFFS = 207000 3D DVDPS = 41400
*****

Group 1. Run Title and Number
*****
*****

TEXT(TURBULANSLI, IKI TARAFTA ACIK AKIS )

*****
*****

IRUNN = 1 ;LIBREF = 0
*****

Group 2. Transience
STEADY = T
*****

Group 3. X-Direction Grid Spacing
CARTES = F
NX = 30
XULAST = 6.283E+00
XFRAC ( 1) = 3.333E-02 ;XFRAC ( 2) = 6.667E-02
XFRAC ( 3) = 1.000E-01 ;XFRAC ( 4) = 1.333E-01
XFRAC ( 5) = 1.667E-01 ;XFRAC ( 6) = 2.000E-01
XFRAC ( 7) = 2.333E-01 ;XFRAC ( 8) = 2.667E-01
XFRAC ( 9) = 3.000E-01 ;XFRAC (10) = 3.333E-01
XFRAC (11) = 3.667E-01 ;XFRAC (12) = 4.000E-01
XFRAC (13) = 4.333E-01 ;XFRAC (14) = 4.667E-01
XFRAC (15) = 5.000E-01 ;XFRAC (16) = 5.333E-01
XFRAC (17) = 5.667E-01 ;XFRAC (18) = 6.000E-01
XFRAC (19) = 6.333E-01 ;XFRAC (20) = 6.667E-01
XFRAC (21) = 7.000E-01 ;XFRAC (22) = 7.333E-01
XFRAC (23) = 7.667E-01 ;XFRAC (24) = 8.000E-01
XFRAC (25) = 8.333E-01 ;XFRAC (26) = 8.667E-01

```

```

XFRAC ( 27) = 9.000E-01 ;XFRAC ( 28) = 9.333E-01
XFRAC ( 29) = 9.667E-01 ;XFRAC ( 30) = 1.000E+00
*****

Group 4. Y-Direction Grid Spacing
NY      =      10
YVLAST  = 1.200E-02
YFRAC ( 1) = 6.944E-02 ;YFRAC ( 2) = 1.389E-01
YFRAC ( 3) = 2.083E-01 ;YFRAC ( 4) = 2.917E-01
YFRAC ( 5) = 3.750E-01 ;YFRAC ( 6) = 5.000E-01
YFRAC ( 7) = 6.250E-01 ;YFRAC ( 8) = 7.292E-01
YFRAC ( 9) = 8.333E-01 ;YFRAC (10) = 1.000E+00
*****

Group 5. Z-Direction Grid Spacing
PARAB    =      F
NZ        =      46
ZWLAST   = 1.470E-01
ZFRAC ( 1) = 6.803E-03 ;ZFRAC ( 2) = 1.361E-02
ZFRAC ( 3) = 2.041E-02 ;ZFRAC ( 4) = 2.721E-02
ZFRAC ( 5) = 3.401E-02 ;ZFRAC ( 6) = 4.762E-02
ZFRAC ( 7) = 6.122E-02 ;ZFRAC ( 8) = 6.973E-02
ZFRAC ( 9) = 7.823E-02 ;ZFRAC (10) = 8.673E-02
ZFRAC (11) = 9.524E-02 ;ZFRAC (12) = 1.229E-01
ZFRAC (13) = 1.505E-01 ;ZFRAC (14) = 1.781E-01
ZFRAC (15) = 2.058E-01 ;ZFRAC (16) = 2.334E-01
ZFRAC (17) = 2.611E-01 ;ZFRAC (18) = 2.887E-01
ZFRAC (19) = 3.163E-01 ;ZFRAC (20) = 3.440E-01
ZFRAC (21) = 3.716E-01 ;ZFRAC (22) = 3.992E-01
ZFRAC (23) = 4.269E-01 ;ZFRAC (24) = 4.545E-01
ZFRAC (25) = 4.821E-01 ;ZFRAC (26) = 5.098E-01
ZFRAC (27) = 5.374E-01 ;ZFRAC (28) = 5.651E-01
ZFRAC (29) = 5.927E-01 ;ZFRAC (30) = 6.203E-01
ZFRAC (31) = 6.480E-01 ;ZFRAC (32) = 6.756E-01
ZFRAC (33) = 7.032E-01 ;ZFRAC (34) = 7.309E-01
ZFRAC (35) = 7.585E-01 ;ZFRAC (36) = 7.861E-01
ZFRAC (37) = 8.138E-01 ;ZFRAC (38) = 8.414E-01
ZFRAC (39) = 8.690E-01 ;ZFRAC (40) = 8.967E-01
ZFRAC (41) = 9.243E-01 ;ZFRAC (42) = 9.520E-01
ZFRAC (43) = 9.796E-01 ;ZFRAC (44) = 9.864E-01
ZFRAC (45) = 9.932E-01 ;ZFRAC (46) = 1.000E+00
*****

Group 6. Body-Fitted Coordinates
*****

Group 7. Variables: STOREd,SOLVEd,NAMEd
ONEPHS   =      T
NAME( 1) =P1      ;NAME( 3) =U1
NAME( 5) =V1      ;NAME( 7) =W1
NAME(12) =KE      ;NAME(13) =EP
NAME(14) =H1      ;NAME(44) =VPOR
NAME(45) =HPOR    ;NAME(46) =NPOR
NAME(47) =EPOR    ;NAME(48) =RH01
NAME(49) =TMP1    ;NAME(50) =ENUT
SOLUTN(P1 ,Y,Y,Y,N,N,N)
SOLUTN(U1 ,Y,Y,N,N,N,N)
SOLUTN(V1 ,Y,Y,N,N,N,N)
SOLUTN(W1 ,Y,Y,N,N,N,N)
SOLUTN(KE ,Y,Y,N,N,N,N)
SOLUTN(EP ,Y,Y,N,N,N,N)
SOLUTN(H1 ,Y,Y,N,Y,N,N)

```

```

SOLUTN(VPOR,Y,N,N,N,N,N)
SOLUTN(HPOR,Y,N,N,N,N,N)
SOLUTN(NPOR,Y,N,N,N,N,N)
SOLUTN(EPOR,Y,N,N,N,N,N)
SOLUTN(RH01,Y,N,N,N,N,N)
SOLUTN(TMP1,Y,N,N,N,N,N)
SOLUTN(ENUT,Y,N,N,N,N,N)
DEN1      =      48
VIST      =      50
EPOR      =      47 ;HPOR      =      45 ;NPOR      =      46 ;VPOR      =      44
TEMP1     =      49
*****

```

#### Group 8. Terms & Devices

```

TERMS (P1 ,Y,Y,Y,N,Y,N)
TERMS (U1 ,Y,Y,Y,N,Y,N)
TERMS (V1 ,Y,Y,Y,N,Y,N)
TERMS (W1 ,Y,Y,Y,N,Y,N)
TERMS (KE ,N,Y,Y,N,Y,N)
TERMS (EP ,N,Y,Y,N,Y,N)
TERMS (H1 ,Y,Y,N,N,Y,N)
DIFCUT = 5.000E-01 ;ZDIFAC = 1.000E+00
GALA   =   F   ;ADDIF =   F   ;BLOCKZ =   T
NEWRH1 =   T
NEWENT =   T
ISOLX  =      -1 ;ISOLY  =      -1 ;ISOLZ  =      -1
*****

```

#### Group 9. Properties

```

RH01    = GRND5      ;TMP1    = GRND5      ;EL1     = GRND4
RH01A   = 0.000E+00 ;RH01B   = 3.484E-03 ;RH01C   = 0.000E+00
PRESS0  = 1.010E+05
TMP1A   = 3.201E+05 ;TMP1B   = 1.007E+03 ;TMP1C   = 0.000E+00
TEMP0   = 0.000E+00
EL1A    = 0.000E+00 ;EL1B    = 0.000E+00 ;EL1C    = 0.000E+00
ENUL    = 1.487E-05 ;ENUT    = GRND3
ENUTA   = 0.000E+00 ;ENUTB   = 0.000E+00 ;ENUTC   = 0.000E+00
DRH1DP  = 0.000E+00
PRNDTL(U1 ) = 1.000E+00 ;PRNDTL(V1 ) = 1.000E+00
PRNDTL(W1 ) = 1.000E+00 ;PRNDTL(KE ) = 1.000E+00
PRNDTL(EP ) = 1.000E+00
PRT (U1 ) = 1.000E+00 ;PRT (V1 ) = 1.000E+00
PRT (W1 ) = 1.000E+00 ;PRT (KE ) = 1.000E+00
PRT (EP ) = 1.314E+00
*****

```

#### Group 10. Inter-Phase Transfer Processes

\*\*\*\*\*

#### Group 11. Initialise Var/Porosity Fields

```

FIINIT(P1 ) = READFI      ;FIINIT(U1 ) = READFI
FIINIT(V1 ) = READFI      ;FIINIT(W1 ) = READFI
FIINIT(KE ) = READFI      ;FIINIT(EP ) = READFI
FIINIT(H1 ) = READFI      ;FIINIT(VPOR) = READFI
FIINIT(HPOR) = READFI      ;FIINIT(NPOR) = READFI
FIINIT(EPOR) = READFI      ;FIINIT(RH01) = READFI
FIINIT(TMP1) = READFI      ;FIINIT(ENUT) = READFI

```

```

PATCH(SOUTH1 ,INIVAL, 1, 30, 7, 7, 12, 46, 1, 1)
INIT(SOUTH1 ,V1 , 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(SOUTH1 ,NPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)

```

```

PATCH(LOW1      ,INIVAL,   1, 30,   8, 10,  11,  11,   1,   1)
INIT(LOW1      ,W1   , 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(LOW1      ,HPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)

```

```

PATCH(CELL1     ,INIVAL,   1, 30,   8, 10,  12,  46,   1,   1)
INIT(CELL1     ,P1   , 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL1     ,U1   , 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL1     ,V1   , 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL1     ,W1   , 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL1     ,KE   , 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL1     ,EP   , 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL1     ,H1   , 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL1     ,VPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL1     ,HPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL1     ,NPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL1     ,EPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL1     ,RH01, 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL1     ,TMP1, 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL1     ,ENUT, 0.000E+00, 1.000E-20)

```

```

PATCH(LOW2      ,INIVAL,   1, 30,   1,  3,  44,  44,   1,   1)
INIT(LOW2      ,W1   , 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(LOW2      ,HPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)

```

```

PATCH(CELL2     ,INIVAL,   1, 30,   1,  3,  45,  46,   1,   1)
INIT(CELL2     ,P1   , 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL2     ,U1   , 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL2     ,V1   , 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL2     ,W1   , 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL2     ,KE   , 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL2     ,EP   , 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL2     ,H1   , 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL2     ,VPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL2     ,HPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL2     ,NPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL2     ,EPOR, 0.000E+00, 0.000E+00)
INIT(CELL2     ,RH01, 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL2     ,TMP1, 0.000E+00, 1.000E-20)
INIT(CELL2     ,ENUT, 0.000E+00, 1.000E-20)
INIADD  =      F
NAMFI   =CHAM
*****

```

### Group 13. Boundary & Special Sources

```

PATCH(KESOURCE,PHASEM,   1, 30,   1, 10,   1,  46,   1,   1)
COVAL(KESOURCE,KE   , GRND4   , GRND4   )
COVAL(KESOURCE,EP   , GRND4   , GRND4   )

```

```

PATCH(NWALL1   ,NWALL ,   1, 30,   7,  7,  12,  46,   1,   1)
COVAL(NWALL1   ,U1   , GRND2   , 0.000E+00)
COVAL(NWALL1   ,W1   , GRND2   , 0.000E+00)
COVAL(NWALL1   ,KE   , GRND2   , GRND2   )
COVAL(NWALL1   ,EP   , GRND2   , GRND2   )

```

```

PATCH(HWALL1   ,HWALL ,   1, 30,   8, 10,  11,  11,   1,   1)
COVAL(HWALL1   ,U1   , GRND2   , 0.000E+00)
COVAL(HWALL1   ,V1   , GRND2   , 0.000E+00)
COVAL(HWALL1   ,KE   , GRND2   , GRND2   )

```

```

COVAL(HWALL1 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(LWALL1 ,LWALL , 1, 30, 8, 10, 46, 46, 1, 1)
COVAL(LWALL1 ,U1 , GRND2 , 0.000E+00)
COVAL(LWALL1 ,V1 , GRND2 , 0.000E+00)
COVAL(LWALL1 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(LWALL1 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(SWALL2 ,SWALL , 1, 30, 4, 4, 45, 46, 1, 1)
COVAL(SWALL2 ,U1 , GRND2 , 0.000E+00)
COVAL(SWALL2 ,W1 , GRND2 , 0.000E+00)
COVAL(SWALL2 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(SWALL2 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(HWALL2 ,HWALL , 1, 30, 1, 3, 44, 44, 1, 1)
COVAL(HWALL2 ,U1 , GRND2 , 0.000E+00)
COVAL(HWALL2 ,V1 , GRND2 , 0.000E+00)
COVAL(HWALL2 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(HWALL2 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(LWALL2 ,LWALL , 1, 30, 1, 3, 46, 46, 1, 1)
COVAL(LWALL2 ,U1 , GRND2 , 0.000E+00)
COVAL(LWALL2 ,V1 , GRND2 , 0.000E+00)
COVAL(LWALL2 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(LWALL2 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(INLET1 ,NORTH , 2, 7, 10, 10, 6, 7, 1, 1)
COVAL(INLET1 ,P1 , FIXFLU , 2.319E+02)
COVAL(INLET1 ,U1 , FIXVAL , 2.100E+02)
COVAL(INLET1 ,V1 , FIXVAL , 1.000E-01)
COVAL(INLET1 ,W1 , FIXVAL , 1.000E-01)
COVAL(INLET1 ,KE , FIXVAL , 8.440E-01)
COVAL(INLET1 ,EP , FIXVAL , 7.754E+00)
COVAL(INLET1 ,H1 , FIXVAL , 2.981E+05)

PATCH(INLET2 ,EAST , 9, 14, 10, 10, 6, 7, 1, 1)
COVAL(INLET2 ,P1 , FIXFLU , 2.319E+02)
COVAL(INLET2 ,U1 , FIXVAL , 2.100E+02)
COVAL(INLET2 ,V1 , FIXVAL , 1.000E-01)
COVAL(INLET2 ,W1 , FIXVAL , 1.000E-01)
COVAL(INLET2 ,KE , FIXVAL , 8.440E-01)
COVAL(INLET2 ,EP , FIXVAL , 7.754E+00)
COVAL(INLET2 ,H1 , FIXVAL , 2.981E+05)

PATCH(INLET3 ,SOUTH , 16, 23, 10, 10, 6, 7, 1, 1)
COVAL(INLET3 ,P1 , FIXFLU , 2.319E+02)
COVAL(INLET3 ,U1 , FIXVAL , 2.100E+02)
COVAL(INLET3 ,V1 , FIXVAL , 1.000E-01)
COVAL(INLET3 ,W1 , FIXVAL , 1.000E-01)
COVAL(INLET3 ,KE , FIXVAL , 8.440E-01)
COVAL(INLET3 ,EP , FIXVAL , 7.754E+00)
COVAL(INLET3 ,H1 , FIXVAL , 2.981E+05)

PATCH(INLET4 ,WEST , 25, 30, 10, 10, 6, 7, 1, 1)
COVAL(INLET4 ,P1 , FIXFLU , 2.319E+02)
COVAL(INLET4 ,U1 , FIXVAL , 2.100E+02)
COVAL(INLET4 ,V1 , FIXVAL , 1.000E-01)
COVAL(INLET4 ,W1 , FIXVAL , 1.000E-01)

```

```

COVAL(INLET4 ,KE , FIXVAL , 8.440E-01)
COVAL(INLET4 ,EP , FIXVAL , 7.754E+00)
COVAL(INLET4 ,H1 , FIXVAL , 2.981E+05)

PATCH(OUTLET1 ,LOW , 1, 30, 1, 3, 1, 1, 1, 1)
COVAL(OUTLET1 ,P1 , 1.000E+00, 9.200E+04)
COVAL(OUTLET1 ,U1 , 0.000E+00, SAME )
COVAL(OUTLET1 ,V1 , 0.000E+00, SAME )
COVAL(OUTLET1 ,W1 , 0.000E+00, SAME )
COVAL(OUTLET1 ,KE , 0.000E+00, SAME )
COVAL(OUTLET1 ,EP , 0.000E+00, SAME )
COVAL(OUTLET1 ,H1 , 0.000E+00, SAME )

PATCH(OUTLET2 ,HIGH , 1, 30, 4, 5, 46, 46, 1, 1)
COVAL(OUTLET2 ,P1 , 1.000E+00, 9.200E+04)
COVAL(OUTLET2 ,U1 , 0.000E+00, 0.000E+00)
COVAL(OUTLET2 ,V1 , 0.000E+00, 0.000E+00)
COVAL(OUTLET2 ,W1 , 0.000E+00, SAME )
COVAL(OUTLET2 ,KE , 0.000E+00, SAME )
COVAL(OUTLET2 ,EP , 0.000E+00, SAME )
COVAL(OUTLET2 ,H1 , 0.000E+00, SAME )

PATCH(INWALL ,LWALL , 1, 30, 4, 10, 1, 5, 1, 1)
COVAL(INWALL ,U1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(INWALL ,V1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(INWALL ,W1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(INWALL ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(INWALL ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(OUTWALL2 ,HWALL , 1, 30, 6, 10, 46, 46, 1, 1)
COVAL(OUTWALL2 ,U1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(OUTWALL2 ,V1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(OUTWALL2 ,W1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(OUTWALL2 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(OUTWALL2 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(UPWALL11 ,NWALL , 1, 1, 10, 10, 6, 7, 1, 1)
COVAL(UPWALL11 ,U1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL11 ,W1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL11 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(UPWALL11 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(UPWALL12 ,EWALL , 8, 8, 10, 10, 6, 7, 1, 1)
COVAL(UPWALL12 ,U1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL12 ,W1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL12 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(UPWALL12 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(UPWALL13 ,SWALL , 15, 15, 10, 10, 6, 7, 1, 1)
COVAL(UPWALL13 ,U1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL13 ,W1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL13 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(UPWALL13 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(UPWALL14 ,WWALL , 24, 24, 10, 10, 6, 7, 1, 1)
COVAL(UPWALL14 ,U1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL14 ,W1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL14 ,KE , GRND2 , GRND2 )

```

```

COVAL(UPWALL14,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(UPWALL2 ,NWALL , 1, 30, 6, 10, 8, 11, 1, 1)
COVAL(UPWALL2 ,U1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL2 ,W1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL2 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(UPWALL2 ,EP , GRND2 , GRND2 )

PATCH(UPWALL3 ,NWALL , 1, 30, 6, 7, 12, 45, 1, 1)
COVAL(UPWALL3 ,U1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL3 ,W1 , FIXVAL , 0.000E+00)
COVAL(UPWALL3 ,KE , GRND2 , GRND2 )
COVAL(UPWALL3 ,EP , GRND2 , GRND2 )
XCYCLE = T
KELIN = 0
*****

Group 14. Downstream Pressure For PARAB
*****

Group 15. Terminate Sweeps
LSWEEP = 400 ;ISWC1 = 1
LITHYD = 1 ;LITFLX = 1 ;LITC = 1 ;ITHC1 = 1
RESREF(P1 ) = 1.000E-08 ;RESREF(U1 ) = 1.000E-08
RESREF(V1 ) = 1.000E-08 ;RESREF(W1 ) = 1.000E-08
RESREF(KE ) = 1.000E-08 ;RESREF(EP ) = 1.000E-08
RESREF(H1 ) = 1.000E-08
*****

Group 16. Terminate Iterations
LITER (P1 ) = 20 ;LITER (U1 ) = 1
LITER (V1 ) = 1 ;LITER (W1 ) = 1
LITER (KE ) = 20 ;LITER (EP ) = 20
LITER (H1 ) = 20
ENDIT (P1 ) = 1.000E-08 ;ENDIT (U1 ) = 1.000E-08
ENDIT (V1 ) = 1.000E-08 ;ENDIT (W1 ) = 1.000E-08
ENDIT (KE ) = 1.000E-08 ;ENDIT (EP ) = 1.000E-08
ENDIT (H1 ) = 1.000E-08
*****

Group 17. Relaxation
RELAX(P1 ,LINRLX, 1.000E-01)
RELAX(U1 ,FALSDT, 1.000E-01)
RELAX(V1 ,FALSDT, 1.000E-01)
RELAX(W1 ,FALSDT, 1.000E-01)
RELAX(KE ,FALSDT, 1.000E-01)
RELAX(EP ,FALSDT, 1.000E-01)
RELAX(H1 ,FALSDT, 1.000E-01)
RELAX(RH01,LINRLX, 1.000E-01)
RELAX(TMP1,LINRLX, 1.000E+00)
RELAX(ENUT,LINRLX, 1.000E+00)
OVRRLX = 0.000E+00
*****

Group 18. Limits
VARMAX(P1 ) = 1.000E+10 ;VARMIN(P1 ) = -1.000E+10
VARMAX(U1 ) = 1.000E+10 ;VARMIN(U1 ) = -1.000E+10
VARMAX(V1 ) = 1.000E+10 ;VARMIN(V1 ) = -1.000E+10
VARMAX(W1 ) = 1.000E+10 ;VARMIN(W1 ) = -1.000E+10
VARMAX(KE ) = 1.000E+10 ;VARMIN(KE ) = 1.000E-10
VARMAX(EP ) = 1.000E+10 ;VARMIN(EP ) = 1.000E-10
VARMAX(H1 ) = 1.000E+10 ;VARMIN(H1 ) = -1.000E+10
VARMAX(VPOR) = 1.000E+10 ;VARMIN(VPOR) = -1.000E+10

```

```

VARMAX(HPOR) = 1.000E+10 ;VARMIN(HPOR) =-1.000E+10
VARMAX(NPOR) = 1.000E+10 ;VARMIN(NPOR) =-1.000E+10
VARMAX(EPOR) = 1.000E+10 ;VARMIN(EPOR) =-1.000E+10
VARMAX(RH01) = 1.000E+10 ;VARMIN(RH01) =-1.000E+10
VARMAX(TMP1) = 1.000E+10 ;VARMIN(TMP1) =-1.000E+10
VARMAX(ENUT) = 1.000E+10 ;VARMIN(ENUT) =-1.000E+10
*****

Group 19. EARTH Calls To GROUND Station
USEGRD = T ;USEGRX = T
NAMGRD =NONE
GENK = T
*****

Group 20. Preliminary Printout
ECHO = T
*****

Group 21. Print-out of Variables
INIFLD = F ;SUBWGR = F
OUTPUT(P1 ,Y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(U1 ,Y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(V1 ,Y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(W1 ,Y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(KE ,Y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(EP ,Y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(H1 ,Y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(VPOR,N,N,N,N,N,N)
OUTPUT(HPOR,N,N,N,N,N,N)
OUTPUT(NPOR,N,N,N,N,N,N)
OUTPUT(EPOR,N,N,N,N,N,N)
OUTPUT(RH01,Y,N,N,N,N,N)
OUTPUT(TMP1,Y,N,N,N,N,N)
OUTPUT(ENUT,Y,N,N,N,N,N)
*****

Group 22. Monitor Print-Out
IXMON = 15 ;IYMON = 5 ;IZMON = 23
NPRMON = 10000 ;NPRMNT = 10000 ;TSTSWP = 1
UWATCH = T ;USTEER = T
HIGHLO = F
*****

Group 23. Field Print-Out & Plot Control
NPRINT = 10000 ;NUMCLS = 5
NXPRIN = 10 ;IXPRF = 1 ;IXPRL = 30
NYPRIN = 10 ;IYPRF = 1 ;IYPRL = 10
NZPRIN = 10 ;IZPRF = 1 ;IZPRL = 10000
XZPR = F ;YZPR = F
IPLTF = 1 ;IPLTL = 400 ;NPLT = 20
ITABL = 3 ;IPROF = 1
ABSIZ = 5.000E-01 ;ORSIZ = 4.000E-01
NTZPRF = 1 ;NCOLPF = 50
ICHR = 2 ;NCOLCO = 45 ;NROWCO = 20
No PATCHes yet used for this Group
*****

Group 24. Dumps For Restarts
SAVE = T ;AUTOPS = F ;NOWIPE = F
NSAVE =CHAM

*** GRID-GEOMETRY INFORMATION ***
X-COORDINATES OF THE CELL CENTRES
1.047E-01 3.142E-01 5.236E-01 7.330E-01 9.425E-01

```

|                                   |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1.152E+00                         | 1.361E+00 | 1.571E+00 | 1.780E+00 | 1.990E+00 |
| 2.199E+00                         | 2.409E+00 | 2.618E+00 | 2.827E+00 | 3.037E+00 |
| 3.246E+00                         | 3.456E+00 | 3.665E+00 | 3.875E+00 | 4.084E+00 |
| 4.294E+00                         | 4.503E+00 | 4.712E+00 | 4.922E+00 | 5.131E+00 |
| 5.341E+00                         | 5.550E+00 | 5.760E+00 | 5.969E+00 | 6.178E+00 |
| Y-COORDINATES OF THE CELL CENTRES |           |           |           |           |
| 4.167E-04                         | 1.250E-03 | 2.083E-03 | 3.000E-03 | 4.000E-03 |
| 5.250E-03                         | 6.750E-03 | 8.125E-03 | 9.375E-03 | 1.100E-02 |
| Z-COORDINATES OF THE CELL CENTRES |           |           |           |           |
| 5.000E-04                         | 1.500E-03 | 2.500E-03 | 3.500E-03 | 4.500E-03 |
| 6.000E-03                         | 8.000E-03 | 9.625E-03 | 1.088E-02 | 1.213E-02 |
| 1.338E-02                         | 1.603E-02 | 2.009E-02 | 2.416E-02 | 2.822E-02 |
| 3.228E-02                         | 3.634E-02 | 4.041E-02 | 4.447E-02 | 4.853E-02 |
| 5.259E-02                         | 5.666E-02 | 6.072E-02 | 6.478E-02 | 6.884E-02 |
| 7.291E-02                         | 7.697E-02 | 8.103E-02 | 8.509E-02 | 8.916E-02 |
| 9.322E-02                         | 9.728E-02 | 1.013E-01 | 1.054E-01 | 1.095E-01 |
| 1.135E-01                         | 1.176E-01 | 1.217E-01 | 1.257E-01 | 1.298E-01 |
| 1.338E-01                         | 1.379E-01 | 1.420E-01 | 1.445E-01 | 1.455E-01 |
| 1.465E-01                         |           |           |           |           |

--- INTEGRATION OF EQUATIONS BEGINS ---

\*\*\*\*\*

TIME STP= 1 SWEEP NO= 400 ZSLAB NO= 10 ITERN NO= 1

FLOW FIELD AT ITHYD= 1, IZ= 10, ISWEEP= 400, ISTEP= 1

FIELD VALUES OF P1

|        |           |           |           |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| IY= 10 | 2.483E+05 | 2.514E+05 | 2.501E+05 |
| IX= 1  |           | 11        | 21        |

FIELD VALUES OF U1

|        |            |           |           |
|--------|------------|-----------|-----------|
| IY= 10 | -2.588E-01 | 1.538E-01 | 3.479E-02 |
| IX= 1  |            | 11        | 21        |

FIELD VALUES OF V1

|       |            |            |            |
|-------|------------|------------|------------|
| IY= 9 | -6.352E+00 | -7.321E+00 | -7.269E+00 |
| IX= 1 |            | 11         | 21         |

FIELD VALUES OF W1

|        |            |           |            |
|--------|------------|-----------|------------|
| IY= 10 | -7.412E-01 | 4.032E-03 | -3.625E-01 |
| IX= 1  |            | 11        | 21         |

FIELD VALUES OF KE

|        |           |           |           |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| IY= 10 | 1.493E-02 | 4.198E-02 | 3.107E-02 |
| IX= 1  |           | 11        | 21        |

FIELD VALUES OF EP

|        |           |           |           |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| IY= 10 | 6.888E-01 | 3.249E+00 | 2.069E+00 |
| IX= 1  |           | 11        | 21        |

FIELD VALUES OF H1

|        |           |           |           |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| IY= 10 | 2.595E+05 | 2.700E+05 | 2.660E+05 |
| IX= 1  |           | 11        | 21        |

FIELD VALUES OF RH01

|        |           |           |           |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| IY= 10 | 3.825E+00 | 3.858E+00 | 3.845E+00 |
| IX= 1  |           | 11        | 21        |

FIELD VALUES OF TMP1

|        |           |           |           |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| IY= 10 | 3.179E+02 | 3.179E+02 | 3.179E+02 |
| IX= 1  |           | 11        | 21        |

FIELD VALUES OF ENUT

|        |           |           |           |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| IY= 10 | 2.911E-05 | 4.883E-05 | 4.201E-05 |
| IX= 1  |           | 11        | 21        |

\*\*\*\*\*

TIME STP= 1 SWEEP NO= 400 ZSLAB NO= 20 ITERN NO= 1

FLOW FIELD AT ITHYD= 1, IZ= 20, ISWEEP= 400, ISTEP= 1

FIELD VALUES OF P1

IY= 10 4.944E-03 4.700E-03 4.755E-03

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF U1

IY= 10 -2.972E-09 1.702E-10 1.583E-10

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF V1

IY= 9 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF W1

IY= 10 2.430E-10 -2.043E-11 -2.420E-11

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF KE

IY= 10 1.000E-10 1.000E-10 1.000E-10

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF EP

IY= 10 1.000E-10 1.000E-10 1.000E-10

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF H1

IY= 10 1.000E-20 1.000E-20 1.000E-20

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF RH01

IY= 10 1.107E+00 1.107E+00 1.107E+00

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF TMP1

IY= 10 3.179E+02 3.179E+02 3.179E+02

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF ENUT

IY= 10 9.000E-12 9.000E-12 9.000E-12

IX= 1 11 21

\*\*\*\*\*

TIME STP= 1 SWEEP NO= 400 ZSLAB NO= 23 ITERN NO= 1

\*\*\*\*\*

TIME STP= 1 SWEEP NO= 400 ZSLAB NO= 30 ITERN NO= 1

FLOW FIELD AT ITHYD= 1, IZ= 30, ISWEEP= 400, ISTEP= 1

FIELD VALUES OF P1

IY= 10 3.917E-03 4.553E-03 4.120E-03

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF U1

IY= 10 -2.957E-09 1.708E-10 1.592E-10

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF V1

IY= 9 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF W1

IY= 10 2.039E-10 -1.564E-11 -2.006E-11

IX= 1 11 21

FIELD VALUES OF KE

IY= 10 1.000E-10 1.000E-10 1.000E-10

```

IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF EP
IY= 10  1.000E-10  1.000E-10  1.000E-10
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF H1
IY= 10  1.000E-20  1.000E-20  1.000E-20
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF RH01
IY= 10  1.107E+00  1.107E+00  1.107E+00
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF TMP1
IY= 10  3.179E+02  3.179E+02  3.179E+02
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF ENUT
IY= 10  9.000E-12  9.000E-12  9.000E-12
IX=      1      11      21

```

```

*****
TIME STP=      1 SWEEP NO=    400 ZSLAB NO=      40 ITERN NO=      1

```

```

FLOW FIELD AT ITHYD=    1, IZ=  40, ISWEEP= 400, ISTEP=    1
FIELD VALUES OF P1
IY= 10  2.798E-03  2.960E-03  2.826E-03
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF U1
IY= 10 -3.003E-09  1.732E-10  1.578E-10
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF V1
IY=  9  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF W1
IY= 10  8.125E-11 -1.587E-11 -1.276E-11
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF KE
IY= 10  1.000E-10  1.000E-10  1.000E-10
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF EP
IY= 10  1.000E-10  1.000E-10  1.000E-10
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF H1
IY= 10  1.000E-20  1.000E-20  1.000E-20
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF RH01
IY= 10  1.107E+00  1.107E+00  1.107E+00
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF TMP1
IY= 10  3.179E+02  3.179E+02  3.179E+02
IX=      1      11      21
FIELD VALUES OF ENUT
IY= 10  9.000E-12  9.000E-12  9.000E-12
IX=      1      11      21

```

```

*****
TIME STP=      1 SWEEP NO=    400 ZSLAB NO=      1 ITERN NO=      1

```

## WHOLE-FIELD RESIDUALS BEFORE SOLUTIONS

WHOLE-FIELD SUM OF ABS(VOL.FLOW RESIDUALS)= 1.272E+06  
 WHOLE-FIELD SUM OF ABS(RESIDUALS) OF U1 = 4.982E+09  
 WHOLE-FIELD SUM OF ABS(RESIDUALS) OF V1 = 3.248E+10  
 WHOLE-FIELD SUM OF ABS(RESIDUALS) OF W1 = 6.998E+10  
 WHOLE-FIELD SUM OF ABS(RESIDUALS) OF KE = 1.382E+14  
 WHOLE-FIELD SUM OF ABS(RESIDUALS) OF EP = 7.546E+17  
 WHOLE-FIELD SUM OF ABS(RESIDUALS) OF H1 = 1.196E+09  
 \* SUMS HAVE BEEN DIVIDED BY RESREF(NAME)

Net source of U1 at patch named: NWALL1 = -1.335E-07  
 Net source of U1 at patch named: HWALL1 = -2.673E-06  
 Net source of U1 at patch named: LWALL1 = -8.789E-25  
 Net source of U1 at patch named: SWALL2 = -3.679E-07  
 Net source of U1 at patch named: HWALL2 = -7.752E-08  
 Net source of U1 at patch named: LWALL2 = -1.422E-25  
 Net source of U1 at patch named: INLET1 = 3.177E+00  
 Net source of U1 at patch named: INLET2 = 2.532E+00  
 Net source of U1 at patch named: INLET3 = 3.462E+00  
 Net source of U1 at patch named: INLET4 = 2.337E+00  
 Net source of U1 at patch named: OUTLET1 = -6.657E-01  
 Net source of U1 at patch named: OUTLET2 = -2.158E-04  
 Net source of U1 at patch named: INWALL = -2.518E+00  
 Net source of U1 at patch named: OUTWALL2 = 5.887E-06  
 Net source of U1 at patch named: UPWALL11 = -4.955E+00  
 Net source of U1 at patch named: UPWALL12 = -4.855E+00  
 Net source of U1 at patch named: UPWALL13 = -4.878E+00  
 Net source of U1 at patch named: UPWALL14 = -4.847E+00  
 Net source of U1 at patch named: UPWALL2 = -7.015E+00  
 Net source of U1 at patch named: UPWALL3 = -1.150E-01

Net source of V1 at patch named: HWALL1 = -8.917E-06  
 Net source of V1 at patch named: LWALL1 = 0.000E+00  
 Net source of V1 at patch named: HWALL2 = -1.550E-03  
 Net source of V1 at patch named: LWALL2 = -1.986E-19  
 Net source of V1 at patch named: INLET1 = 2.400E+10  
 Net source of V1 at patch named: INLET2 = 2.400E+10  
 Net source of V1 at patch named: INLET3 = 3.200E+10  
 Net source of V1 at patch named: INLET4 = 2.400E+10  
 Net source of V1 at patch named: OUTLET1 = 8.414E-02  
 Net source of V1 at patch named: OUTLET2 = 9.188E-02  
 Net source of V1 at patch named: INWALL = 3.330E+02  
 Net source of V1 at patch named: OUTWALL2 = 1.210E+01

Net source of W1 at patch named: NWALL1 = -8.605E-04  
 Net source of W1 at patch named: SWALL2 = -4.654E-03  
 Net source of W1 at patch named: INLET1 = 1.396E-03  
 Net source of W1 at patch named: INLET2 = 1.113E-03  
 Net source of W1 at patch named: INLET3 = 1.551E-03  
 Net source of W1 at patch named: INLET4 = 1.113E-03  
 Net source of W1 at patch named: OUTLET1 = 3.590E+00  
 Net source of W1 at patch named: OUTLET2 = 0.000E+00  
 Net source of W1 at patch named: INWALL = 3.178E+02  
 Net source of W1 at patch named: OUTWALL2 = 0.000E+00  
 Net source of W1 at patch named: UPWALL11 = -1.053E+00  
 Net source of W1 at patch named: UPWALL12 = -1.011E+00  
 Net source of W1 at patch named: UPWALL13 = -1.035E+00

Net source of W1 at patch named: UPWALL14 = -1.035E+00  
 Net source of W1 at patch named: UPWALL2 = -7.077E+01  
 Net source of W1 at patch named: UPWALL3 = -2.925E+02

Net source of R1 at patch named: INLET1 = 1.396E-02  
 Net source of R1 at patch named: INLET2 = 1.113E-02  
 Net source of R1 at patch named: INLET3 = 1.551E-02  
 Net source of R1 at patch named: INLET4 = 1.113E-02  
 Net source of R1 at patch named: OUTLET1 = -1.400E-02  
 Net source of R1 at patch named: OUTLET2 = -2.271E-02

Net source of KE at patch named: KESOURCE = 7.157E+02  
 Net source of KE at patch named: NWALL1 = -4.305E+05  
 Net source of KE at patch named: HWALL1 = 3.386E+05  
 Net source of KE at patch named: LWALL1 = -6.092E-04  
 Net source of KE at patch named: SWALL2 = 2.968E+05  
 Net source of KE at patch named: HWALL2 = 1.820E+04  
 Net source of KE at patch named: LWALL2 = -4.339E-05  
 Net source of KE at patch named: INLET1 = 1.179E-02  
 Net source of KE at patch named: INLET2 = 9.394E-03  
 Net source of KE at patch named: INLET3 = 1.309E-02  
 Net source of KE at patch named: INLET4 = 9.394E-03  
 Net source of KE at patch named: OUTLET1 = -1.325E+02  
 Net source of KE at patch named: OUTLET2 = -5.834E+01  
 Net source of KE at patch named: INWALL = -4.261E+04  
 Net source of KE at patch named: OUTWALL2 = 3.661E+05  
 Net source of KE at patch named: UPWALL11 = -2.563E+03  
 Net source of KE at patch named: UPWALL12 = 1.462E+03  
 Net source of KE at patch named: UPWALL13 = -2.132E+03  
 Net source of KE at patch named: UPWALL14 = 3.488E+03  
 Net source of KE at patch named: UPWALL2 = -4.030E+05  
 Net source of KE at patch named: UPWALL3 = -1.015E+05

Net source of EP at patch named: KESOURCE = 8.861E+06  
 Net source of EP at patch named: NWALL1 = -3.589E+07  
 Net source of EP at patch named: HWALL1 = 4.514E+06  
 Net source of EP at patch named: LWALL1 = -6.046E-04  
 Net source of EP at patch named: SWALL2 = 6.888E+09  
 Net source of EP at patch named: HWALL2 = 1.629E+08  
 Net source of EP at patch named: LWALL2 = -4.306E-05  
 Net source of EP at patch named: INLET1 = -4.768E+04  
 Net source of EP at patch named: INLET2 = -6.676E+04  
 Net source of EP at patch named: INLET3 = -6.676E+04  
 Net source of EP at patch named: INLET4 = -6.676E+04  
 Net source of EP at patch named: OUTLET1 = -3.793E+06  
 Net source of EP at patch named: OUTLET2 = -9.400E+05  
 Net source of EP at patch named: INWALL = -3.915E+07  
 Net source of EP at patch named: OUTWALL2 = 8.505E+06  
 Net source of EP at patch named: UPWALL11 = -1.612E+07  
 Net source of EP at patch named: UPWALL12 = 8.322E+06  
 Net source of EP at patch named: UPWALL13 = -1.355E+07  
 Net source of EP at patch named: UPWALL14 = 1.982E+07  
 Net source of EP at patch named: UPWALL2 = -1.800E+08  
 Net source of EP at patch named: UPWALL3 = -2.362E+07

Net source of H1 at patch named: INLET1 = 4.162E+03  
 Net source of H1 at patch named: INLET2 = 3.318E+03  
 Net source of H1 at patch named: INLET3 = 4.625E+03

Net source of H1 at patch named: INLET4 = 3.318E+03  
 Net source of H1 at patch named: OUTLET1 = -3.585E+03  
 Net source of H1 at patch named: OUTLET2 = -5.508E+03

\*\*\*\*\*

spot values vs sweep or iteration number

IXMON= 15 IYMON= 5 IZMON= 23

Tabulation of abscissa and ordinates...

| ISWP      | P1        | U1        | V1         | W1        | KE        |
|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| 2.100E+01 | 1.867E+05 | 7.363E-01 | 1.399E-01  | 7.366E+01 | 1.339E+03 |
| 4.100E+01 | 1.898E+05 | 7.861E-01 | 6.781E-02  | 7.365E+01 | 1.332E+03 |
| 6.100E+01 | 1.927E+05 | 8.388E-01 | -1.186E-02 | 7.372E+01 | 1.328E+03 |
| 8.100E+01 | 1.955E+05 | 8.930E-01 | -9.394E-02 | 7.392E+01 | 1.326E+03 |
| 1.010E+02 | 1.982E+05 | 9.491E-01 | -1.806E-01 | 7.419E+01 | 1.326E+03 |
| 1.210E+02 | 2.008E+05 | 1.005E+00 | -2.705E-01 | 7.448E+01 | 1.326E+03 |
| 1.410E+02 | 2.032E+05 | 1.053E+00 | -3.593E-01 | 7.476E+01 | 1.327E+03 |
| 1.610E+02 | 2.055E+05 | 1.100E+00 | -4.375E-01 | 7.509E+01 | 1.328E+03 |
| 1.810E+02 | 2.077E+05 | 1.142E+00 | -5.026E-01 | 7.550E+01 | 1.332E+03 |
| 2.010E+02 | 2.097E+05 | 1.179E+00 | -5.555E-01 | 7.593E+01 | 1.338E+03 |
| 2.210E+02 | 2.117E+05 | 1.215E+00 | -5.952E-01 | 7.642E+01 | 1.346E+03 |
| 2.410E+02 | 2.136E+05 | 1.250E+00 | -6.238E-01 | 7.691E+01 | 1.355E+03 |
| 2.610E+02 | 2.154E+05 | 1.282E+00 | -6.409E-01 | 7.742E+01 | 1.364E+03 |
| 2.810E+02 | 2.172E+05 | 1.313E+00 | -6.490E-01 | 7.792E+01 | 1.375E+03 |
| 3.010E+02 | 2.189E+05 | 1.342E+00 | -6.479E-01 | 7.842E+01 | 1.386E+03 |
| 3.210E+02 | 2.205E+05 | 1.371E+00 | -6.394E-01 | 7.890E+01 | 1.398E+03 |
| 3.410E+02 | 2.221E+05 | 1.399E+00 | -6.260E-01 | 7.936E+01 | 1.410E+03 |
| 3.610E+02 | 2.236E+05 | 1.425E+00 | -6.078E-01 | 7.980E+01 | 1.422E+03 |
| 3.810E+02 | 2.251E+05 | 1.448E+00 | -5.877E-01 | 8.020E+01 | 1.433E+03 |

| ISWP      | EP        | H1        |
|-----------|-----------|-----------|
| 2.100E+01 | 1.171E+07 | 2.728E+05 |
| 4.100E+01 | 1.157E+07 | 2.727E+05 |
| 6.100E+01 | 1.148E+07 | 2.727E+05 |
| 8.100E+01 | 1.144E+07 | 2.728E+05 |
| 1.010E+02 | 1.141E+07 | 2.729E+05 |
| 1.210E+02 | 1.139E+07 | 2.730E+05 |
| 1.410E+02 | 1.138E+07 | 2.731E+05 |
| 1.610E+02 | 1.138E+07 | 2.732E+05 |
| 1.810E+02 | 1.143E+07 | 2.733E+05 |
| 2.010E+02 | 1.149E+07 | 2.735E+05 |
| 2.210E+02 | 1.159E+07 | 2.736E+05 |
| 2.410E+02 | 1.170E+07 | 2.737E+05 |
| 2.610E+02 | 1.184E+07 | 2.738E+05 |
| 2.810E+02 | 1.198E+07 | 2.739E+05 |
| 3.010E+02 | 1.214E+07 | 2.740E+05 |
| 3.210E+02 | 1.230E+07 | 2.741E+05 |
| 3.410E+02 | 1.247E+07 | 2.741E+05 |
| 3.610E+02 | 1.263E+07 | 2.742E+05 |
| 3.810E+02 | 1.280E+07 | 2.743E+05 |

| VARIABLE | P1        | U1        | V1         | W1        | KE        |
|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| MINVAL=  | 1.867E+05 | 7.363E-01 | -6.490E-01 | 7.365E+01 | 1.326E+03 |
| MAXVAL=  | 2.251E+05 | 1.448E+00 | 1.399E-01  | 8.020E+01 | 1.433E+03 |
| CELLAV=  | 2.072E+05 | 1.123E+00 | -3.841E-01 | 7.620E+01 | 1.357E+03 |

| VARIABLE | EP        | H1        |
|----------|-----------|-----------|
| MINVAL=  | 1.138E+07 | 2.727E+05 |
| MAXVAL=  | 1.280E+07 | 2.743E+05 |
| CELLAV=  | 1.179E+07 | 2.734E+05 |

```

1.00 V.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....+.....H
      .
0.90 + V                                     U H .
      .
0.80 +      V                               U H W .
      .
0.70 +      V                               U H W K +
      .
0.60 +      V                               U H W E .
      .
0.50 +      V U                               U H W E .
      .
0.40 +      U P V H W W K E .
      .
0.30 +      U P V H W W K E .
      .
0.20 +      U P V H W W K E .
      .
0.10 +      P H E V V V V V V V V V V V
      .
0.00 H..H..H.K.+E..E+.E.E+....+....+..V..V..V..V..+....+
      0 .1 .2 .3 .4 .5 .6 .7 .8 .9 1.0
the abscissa is      ISWP. min= 2.10E+01 max= 3.81E+02

```

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

residuals vs sweep or iteration number

Tabulation of abscissa and ordinates...

| ISWP      | P1        | U1        | V1        | W1        | KE        |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2.100E+01 | 1.663E+06 | 6.528E+09 | 3.990E+10 | 9.235E+10 | 6.604E+14 |
| 4.100E+01 | 1.629E+06 | 6.366E+09 | 3.937E+10 | 9.100E+10 | 5.996E+14 |
| 6.100E+01 | 1.599E+06 | 6.221E+09 | 3.890E+10 | 8.964E+10 | 5.253E+14 |
| 8.100E+01 | 1.570E+06 | 6.107E+09 | 3.849E+10 | 8.817E+10 | 4.450E+14 |
| 1.010E+02 | 1.542E+06 | 6.000E+09 | 3.812E+10 | 8.670E+10 | 4.013E+14 |
| 1.210E+02 | 1.515E+06 | 5.893E+09 | 3.772E+10 | 8.534E+10 | 3.321E+14 |
| 1.410E+02 | 1.490E+06 | 5.785E+09 | 3.727E+10 | 8.401E+10 | 3.064E+14 |
| 1.610E+02 | 1.467E+06 | 5.677E+09 | 3.685E+10 | 8.266E+10 | 2.301E+14 |
| 1.810E+02 | 1.443E+06 | 5.590E+09 | 3.644E+10 | 8.141E+10 | 1.605E+14 |
| 2.010E+02 | 1.421E+06 | 5.511E+09 | 3.604E+10 | 8.031E+10 | 1.275E+14 |
| 2.210E+02 | 1.402E+06 | 5.438E+09 | 3.564E+10 | 7.918E+10 | 1.121E+14 |
| 2.410E+02 | 1.384E+06 | 5.379E+09 | 3.524E+10 | 7.804E+10 | 1.018E+14 |
| 2.610E+02 | 1.367E+06 | 5.323E+09 | 3.483E+10 | 7.690E+10 | 9.673E+13 |
| 2.810E+02 | 1.349E+06 | 5.274E+09 | 3.444E+10 | 7.584E+10 | 9.470E+13 |
| 3.010E+02 | 1.332E+06 | 5.230E+09 | 3.407E+10 | 7.490E+10 | 9.130E+13 |
| 3.210E+02 | 1.317E+06 | 5.174E+09 | 3.368E+10 | 7.404E+10 | 9.443E+13 |
| 3.410E+02 | 1.302E+06 | 5.104E+09 | 3.330E+10 | 7.311E+10 | 1.058E+14 |
| 3.610E+02 | 1.289E+06 | 5.062E+09 | 3.301E+10 | 7.203E+10 | 1.194E+14 |
| 3.810E+02 | 1.278E+06 | 5.020E+09 | 3.272E+10 | 7.096E+10 | 1.288E+14 |

| ISWP      | EP        | H1        |
|-----------|-----------|-----------|
| 2.100E+01 | 1.407E+18 | 6.624E+09 |
| 4.100E+01 | 1.380E+18 | 4.430E+09 |
| 6.100E+01 | 1.285E+18 | 4.261E+09 |
| 8.100E+01 | 1.211E+18 | 4.355E+09 |
| 1.010E+02 | 1.158E+18 | 4.355E+09 |
| 1.210E+02 | 1.105E+18 | 3.871E+09 |

|           |            |           |           |           |           |
|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1.410E+02 | 1.069E+18  | 3.231E+09 |           |           |           |
| 1.610E+02 | 1.018E+18  | 2.639E+09 |           |           |           |
| 1.810E+02 | 9.669E+17  | 2.243E+09 |           |           |           |
| 2.010E+02 | 9.316E+17  | 1.968E+09 |           |           |           |
| 2.210E+02 | 9.055E+17  | 1.772E+09 |           |           |           |
| 2.410E+02 | 8.832E+17  | 1.654E+09 |           |           |           |
| 2.610E+02 | 8.626E+17  | 1.570E+09 |           |           |           |
| 2.810E+02 | 8.435E+17  | 1.489E+09 |           |           |           |
| 3.010E+02 | 8.253E+17  | 1.424E+09 |           |           |           |
| 3.210E+02 | 8.100E+17  | 1.384E+09 |           |           |           |
| 3.410E+02 | 7.970E+17  | 1.317E+09 |           |           |           |
| 3.610E+02 | 7.825E+17  | 1.263E+09 |           |           |           |
| 3.810E+02 | 7.678E+17  | 1.220E+09 |           |           |           |
| VARIABLE  | P1         | U1        | V1        | W1        | KE        |
| MINVAL=   | 1.406E+01  | 2.234E+01 | 2.421E+01 | 2.499E+01 | 3.215E+01 |
| MAXVAL=   | 1.432E+01  | 2.260E+01 | 2.441E+01 | 2.525E+01 | 3.412E+01 |
| VARIABLE  | EP         | H1        |           |           |           |
| MINVAL=   | -4.605E+01 | 2.092E+01 |           |           |           |
| MAXVAL=   | 4.179E+01  | 2.261E+01 |           |           |           |

1.00 H....+....+....+....+E..E..E..+E..E..+E..E..+E..E..+E..E..

. K .

0.90 + U K +

. V .

0.80 + U K +

. H H H H .

0.70 + U H +

. K W .

0.60 + U H W +

E E E U V .

0.50 + E P W V +

. H P W V .

0.40 + U P W +

. H U P W .

0.30 + K H U P W +

. U P W .

0.20 + H H U U W +

. K H U W K K .

0.10 + K K H H U W +

. K K H H W .

0.00 +....+....+E..E..+E..E..+....+....+....+K..K..+H..H

0 .1 .2 .3 .4 .5 .6 .7 .8 .9 1.0

the abscissa is ISWP. min= 2.10E+01 max= 3.81E+02

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

SATLIT RUN NUMBER = 1 ; LIBRARY REF.= 0  
 RUN COMPLETED AT 16:18:58 ON TUESDAY, 07 DECEMBER 1905  
 MACHINE-CLOCK TIME OF RUN = 96 SECONDS.  
 TIME/(VARIABLES\*CELLS\*TSTEPS\*SWEEPS\*ITS) = 2.491E-06

\*\*\*\*\*

## **EK-6. ÖN ÇALIŞMA DENEYSEL SİSTEMİ**

Bu çalışma karşıt akışlı vorteks tüpler üzerinde yapılmıştır. Deneysel çalışmalar yapılırken iki farklı özellikte iki deneysel sistem kurulmuştur. Deneysel çalışmalarda ilk olarak vorteks tüplerin çalışırılığını test etmek amacıyla bir sistem kurulmuştur. Bu sistemde, vorteks tüplerde sıcak çıkış tarafında olması gereken hareketli parça yerine, sabit dairesel bir parça yerleştirilmiş ve her iki çıkıştan (sıcak çıkış ve soğuk çıkış) kütleli akışı ayarlanabilir bir vorteks tüp imal edilmiştir. Geliştirilen bu vorteks tüpün performansını incelemek amacıyla, üç grup deney yapılmıştır.

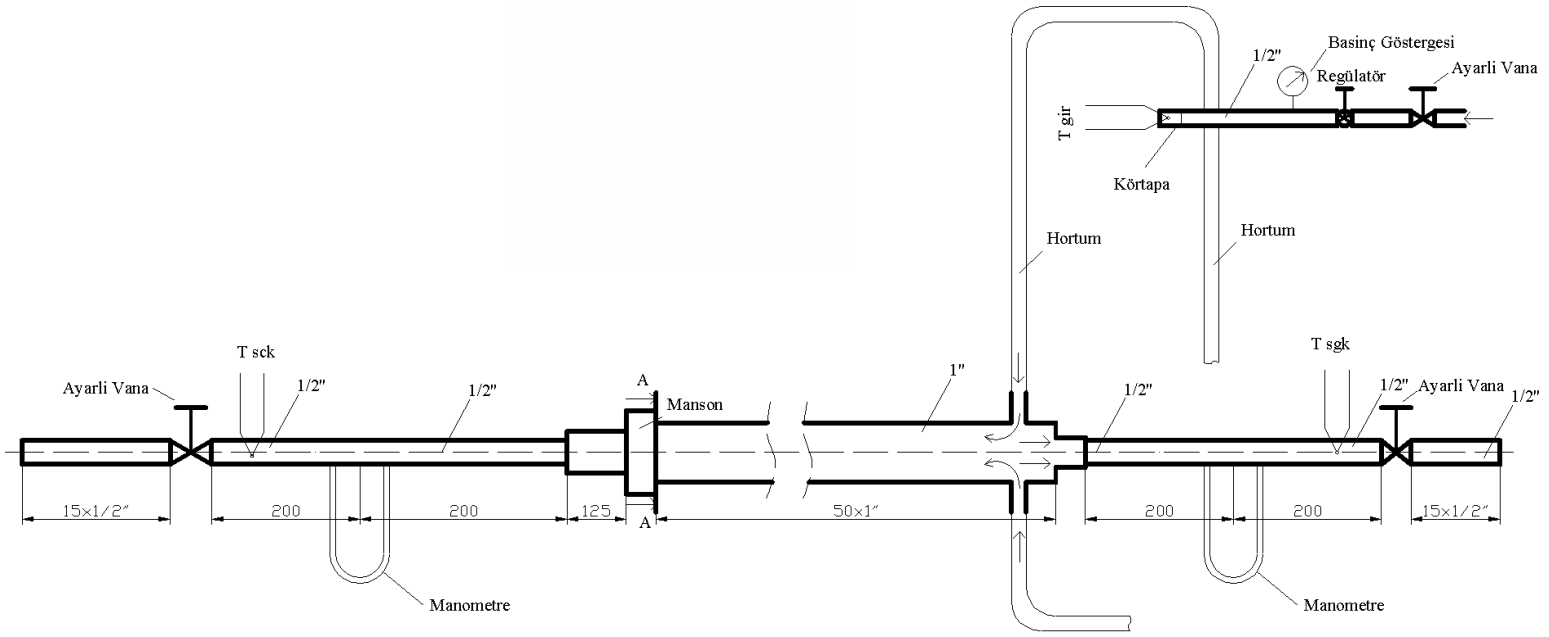
### **Ek-6.1. Her İki Çıkıştan (Sıcak Çıkış ve Soğuk Çıkış) Kütleli Akışı Ayarlanabilir Vorteks Tüpün Performansının Deneysel İncelenmesi**

Deneysel çalışmalarda ilk olarak, kütleli debileri her iki taraftan (sıcak çıkış ve soğuk çıkış) ayarlanabilir bir vorteks tüp geliştirilmiştir. Sistemde, sıcak çıkış tarafına takılan ve soğuk çıkıştaki kütleli akışı ayarlamak amacıyla kullanılan hareketli vida yoktur. Bu parça olmadığı halde kütleli akış her iki taraftan da sistemde isteğe göre ayarlanabilmektedir. Geliştirilen bu vorteks tüpün performansını incelemek amacıyla, üç grup deney yapılmıştır. İlk grup deneylerde, sıcak çıkış ve soğuk çıkıştaki şiber vanalar tamamen açık konumda bırakılmıştır. İkinci grup deneylerde, sıcak taraftaki şiber vana tam açık konumdan tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılırken soğuk taraf tamamen açık bırakılmıştır. Girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar ısı çiftleri yardımı ile okunmuştur. Manometreler ile sıcak ve soğuk taraftaki hızlar ölçülmüştür. Üçüncü grup deneylerde ise, soğuk taraftaki şiber vana tamamen açık konumdan tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılmıştır. Sıcak taraftaki şiber vana ise tamamen açık konumda bırakılmıştır. Girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, ısı çiftleriyle okunmuştur. Cıvalı manometreler ile sıcak ve soğuk akımların hızları ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır. Hesapların sonuçları dikkate alınarak şekiller çizilmiştir. Hesapların

sonuçları dikkate alınarak şekiller çizilmiştir. Bu çizilmiş olan şekiller yardımı ile vorteks tüpün performansı incelenerek yorumlar yapılmıştır.

#### **Ek-6.2. Deneysel Sistemin Tanıtımı**

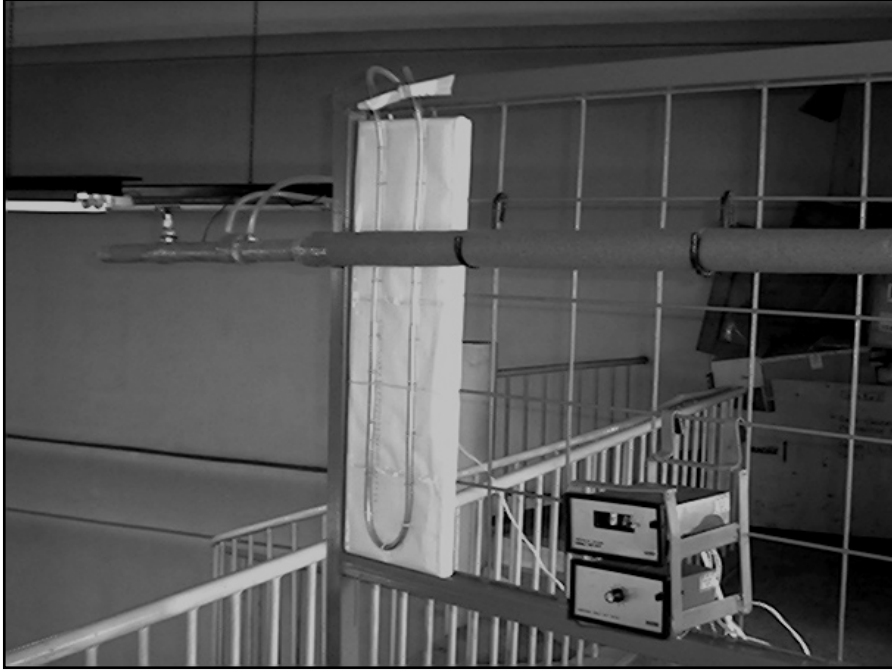
Deneylerde kullanılan düzeneğe ait şekiller Ek-Şekil 6.1’de, resimler ise Ek-Resim 6.1-6.5’de verilmiştir. Bu düzenek hazırlarken vorteks tüp çapı 1" seçilmiştir. Vorteks tüp uzunluğu ise 50D olarak tercih edilmiştir. 2 adet 6 mm iç çapında pirinç nipellerle, vorteks tüp gövdesinin soğuk çıkış tarafından itibaren 6,7 mm mesafeden vorteks tüpe teğet olacak şekilde nozullar oluşturulmuştur. Vorteks tüpün sıcak çıkış tarafına 16 mm çapında 3 mm kalınlığında bir parça imal edilerek kaynatılarak monte edilmiştir. Bu kısım kademeli olarak 1/2" çapına kadar küçültülmüştür.



Ek-Şekil 6.1. Deney düzeniğinin şematik görünümü



Ek-Resim 6.1. Vorteks tüpün giriş kısmı



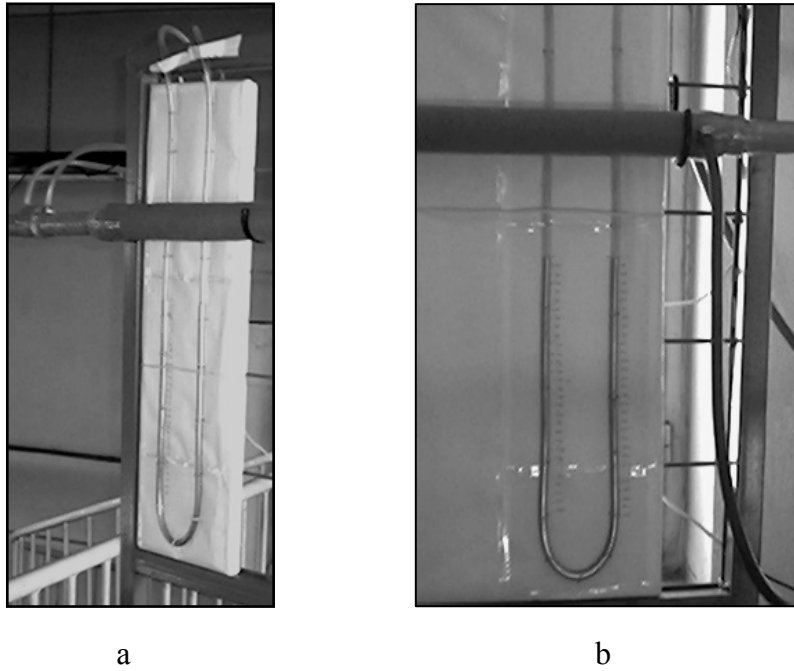
Ek-Resim 6.2. Vorteks tüpün sıcak  ıkışı



Ek-Resim 6.3. Vorteks tüpün soğuk  ıkışı



Ek-Resim 6.4.Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan kanal seçici ve gösterge cihazları



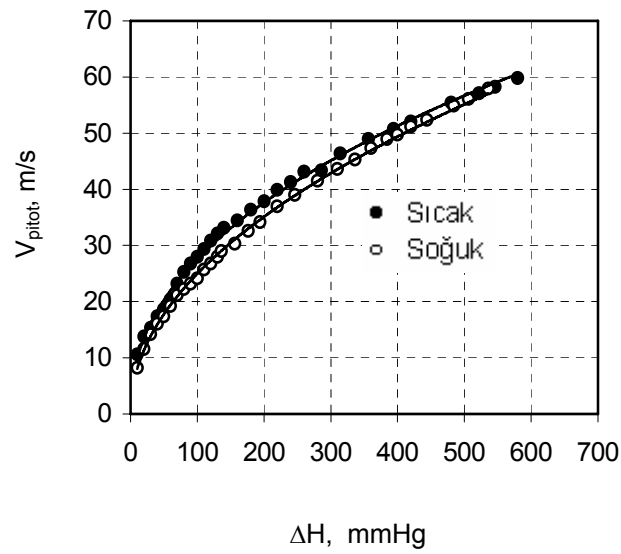
Ek-Resim 6.5. Hız ölçümlerinde kullanılan cıvalı manometreler

Kompresörden hava girişi 1/2" lık bir borudan sağlanmıştır. Bu hat üzerine basınç regülatörü ve basınç göstergesi yerleştirilmiştir. Hattın sonuna kör tapa takılmıştır. Kör tapanın ortası 3 mm çapında delinmiş ve 1 no'lu ısıl çift yerleştirilmiştir. Hava hattı olan 1/2" boru üzerine 2 adet delik delinmiş ve hortumlarla buralardan vorteks tüpe hava girişi sağlanmıştır. Orifisler yapılarak sıcak ve soğuk çıkış tarafına monte edilmiştir. Orifisin bulunduğu bölümden itibaren 1" mesafede borunun her iki tarafına da delikler açılmıştır. 2 adet 750 mm yüksekliğinde cıvalı manometre imal edilerek sisteme monte edilmiştir. Sıcak çıkış ve soğuk çıkış taraflarına orifisten 100 mm uzaklığa, 3 mm çapında delikler açılmış ve buralara ısıl çiftler yerleştirilmiştir (demir-konstantan). 2 no'lu ısıl çift soğuk çıkış taraftaki, 3 no'lu ısıl çift ise sıcak taraftaki ısıl çifttir.

Sıcak ve soğuk çıkışa şiber vanalar takılmıştır. Vanalardan sonra akışın bozulmasını önlemek amacıyla sıcak ve soğuk çıkış tarafa 1/2" çapında ve 15\*1/2" uzunluğunda borular takılmıştır. Kafes yapılarak imal edilen vorteks tüp askılar yardımı ile bu kafese asılmıştır. 1/2" ve 1" çapındaki izolasyon malzemeleriyle vorteks tüpün üzeri kaplanarak sistem çalışır konuma getirilmiştir.

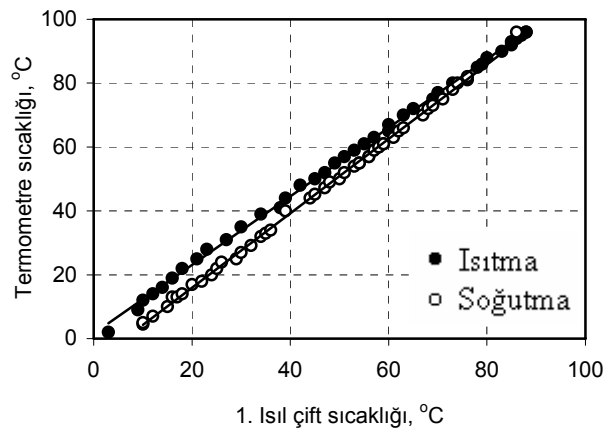
### Ek-6.3. Deneysel Sistemde Kullanılan Ölçme Cihazları ve Kalibrasyonları

Deneysel çalışmalarda hız ölçümleri cıvalı manometrelerle, sıcaklık ölçümleri ise ısıl çiftlerle yapılmıştır. Ek-Şekil 6.2’de cıvalı manometrelerin kalibrasyon eğrileri, Ek-Şekil 6.3–6.5’de ısıl çiftlerin kalibrasyon eğrileri verilmiştir.



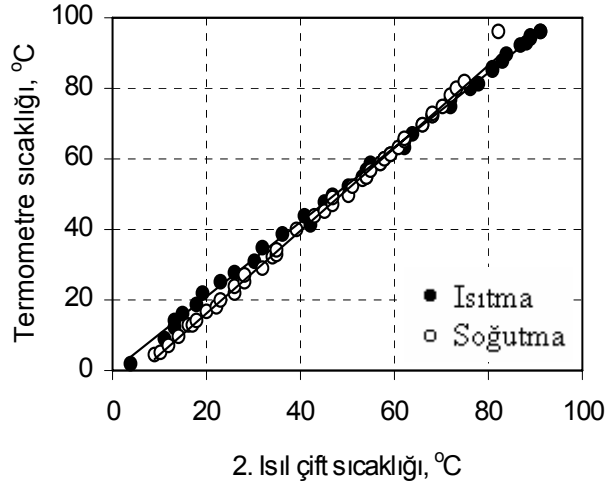
Ek-Şekil 6.2. Sıcak ve soğuk akıma ait manometre kalibrasyonu

Ek-Şekil 6.2’de x-ekseni manometrenin kolları arasındaki seviye farkını (mmHg)’yi, y-ekseni ise manometre kolları arasındaki seviye farkına karşılık gelen hızı göstermektedir.

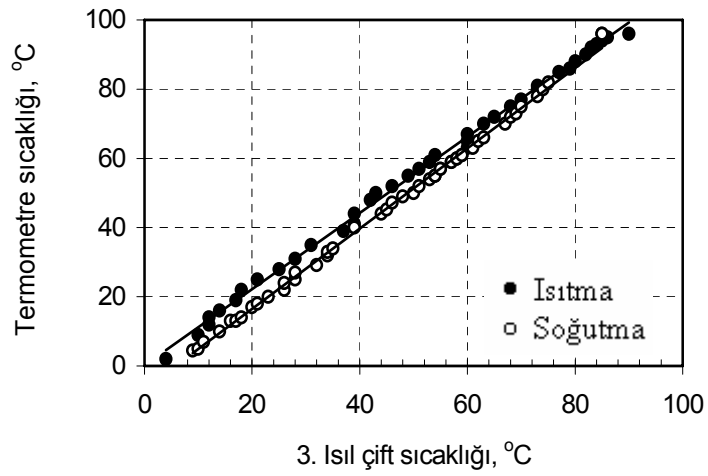


Ek-Şekil 6.3. 1. ısıl çift kalibrasyonu

Ek-Şekil 6.3-6.5’de x-ekseni ısıl çift sıcaklıklarını, y-ekseni de, ısıl çift sıcaklıklarına karşılık gelen termometre sıcaklıklarını göstermektedir.



Ek-Şekil 6.4. 2. ısıl çift kalibrasyonu



Ek-Şekil 6.5. 3. ısıl çift kalibrasyonu

#### **Ek-6.4. Deneylerin Yapılışı**

8 atm çalışma basıncına ayarlanmış kompresörden hava nem giderici cihazından geçtikten sonra hava filitresinden de geçerek hava hattına verilmiştir. Buradan da nozullara geçerek vorteks tüpe havanın ulaşması sağlanmıştır. Sistem çalışır durama getirildikten sonra üç grup deney yapılmıştır.

Birinci grup deneyler, sistemin çalışma aralığını belirlemek için yapılmıştır. Bu gruptaki deneyler yapılırken, deneysel sistemin sıcak ve soğuk çıkışındaki vanalar tamamen açık konumda bırakılmıştır. İlk grup deneyler, 2. ve 3. grup deneylerin 120 kPa ile 180 kPa basınç aralıklarında, sistemde çalışılabileceğini göstermiştir. Bu deneylerde sıcak çıkış ve soğuk çıkıştaki şiber vanalar tam açık konumda bırakılmıştır.

İkinci grup deneylerde, sıcak taraftaki şiber vana tam açık konumdan tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılırken soğuk taraf tam açık bırakılmıştır. Üçüncü grup deneylerde ise, soğuk taraftaki şiber vana tam açık konumdan tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılmış, sıcak taraf tam açık bırakılmıştır.

Deneyler yapılırken, girişteki basınç, giriş sıcaklığı, sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki sıcaklıklar, ısı çiftleriyle okunmuştur. Manometrelerle sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hızlar ölçülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır. Yapılmış olan hesaplar dikkate alınarak şekiller çizilmiştir. Çizilmiş olan şekiller ile vorteks tüpün performansı incelenerek yorumlar yapılmıştır. İkinci ve üçüncü grup deneysel çalışmaya ait verilerden bazıları bu çalışmanın ekler kısmında çizelgeler olarak verilmiştir.

#### **Ek-6.5. Bulgular ve Tartışma**

Sürekli açık sistemler için kütlelenin korunumu yasası,

$$\dot{m}_{gir} = \dot{m}_{\text{çkş}} \quad [\text{Ek-6.1}]$$

olarak yazılırsa ve deneysel çalışmada kullanılan vorteks tüp için kütle korunumu yasası,

$$\dot{m}_{nz1} + \dot{m}_{nz2} = \dot{m}_{sck} + \dot{m}_{soğ} \quad [\text{Ek-6.2}]$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadenin yeniden düzenlemesiyle

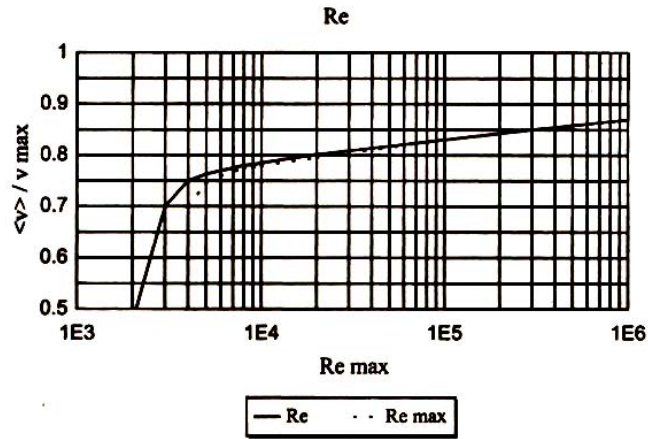
$$\rho_o u_{nz1} A_{nz1} + \rho_o u_{nz2} A_{nz2} = \rho_o u_{sck} A_{sck} + \rho_o u_{soğ} A_{soğ} \quad [\text{Ek-6.3}]$$

Ek-Eş. 6.3 elde edilir. Deney düzeneğinde kullanılan her iki nozulun geometrik özellikleri, içinden geçen akışkanın hızı ve havanın yoğunluğu aynı özellikte kabul edildiğinden Ek-Eş. 6.4 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$2*(u_{nz1} A_{nz1}) = u_{sck} A_{sck} + u_{soğ} A_{soğ} \quad [\text{Ek-6.4}]$$

nozul kesit alanı  $2,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ , sıcak çıkış tarafındaki tüpün kesit alanı  $0,00017 \text{ m}^2$  ve soğuk çıkış tarafındaki tüpün kesit alanı  $0,00016 \text{ m}^2$ 'dir.

Ek-Eş. 6.4'de ki  $u_{sck}$  ve  $u_{soğ}$  hızları tespit edilirken pitot tüpü ve kalibrasyonu yapılan cıvalı manometreler kullanılmıştır. Deneysel sistemdeki akış türbülanslıdır. Pitot tüpü ile borunun merkezindeki hız ölçülmüştür. Ortalama hızın merkezdeki maksimum hıza oranı bulunurken, Reynolds sayısı dikkate alınmış ve aşağıdaki şekilden yararlanılarak sıcak ve soğuk çıkışın ortalama hızları bulunmuştur.



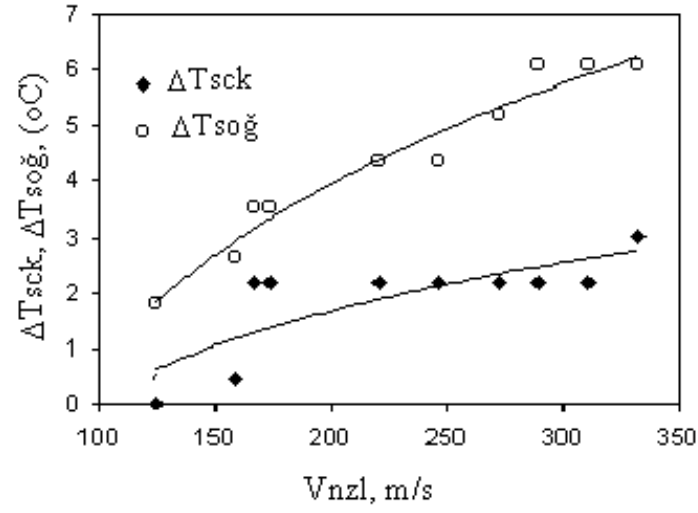
Ek-Şekil 6.6. Türbülanslı akımda ortalama hız ile maksimum hız arasındaki bağıntı(34)

Sıcak akışkanın kütle debisi ( $\dot{m}_{sck}$ ) ile soğuk akışkanın kütledebisi ( $\dot{m}_{soğ}$ )'nin toplamı, nozul girişindeki akışkanın kütle debisini vermektedir.

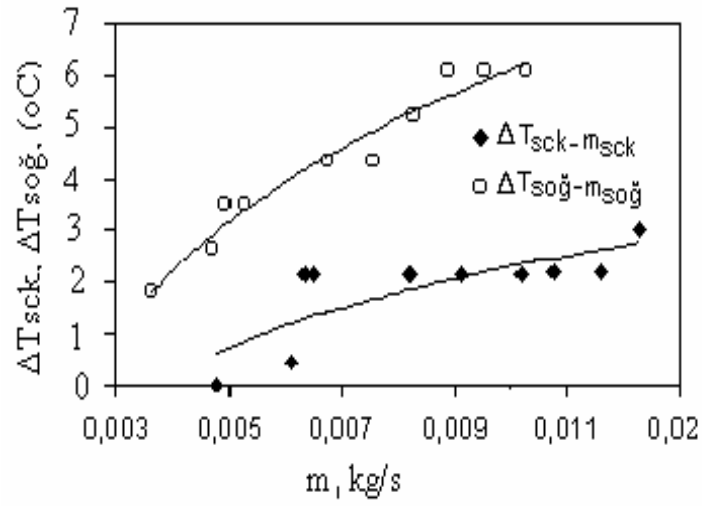
Soğuk akışkanın kütle debisinin vorteks tüpe girişteki akışkanın kütle debisine oranı  $\xi$  ve sıcak akışkanın kütle debisinin vorteks tüpe girişteki akışkanın kütle debisine oranı  $1-\xi$  olarak tanımlanarak Ek-Eş. 6.5 yazılmıştır.

$$\xi = \frac{\dot{m}_{soğ}}{\dot{m}_{soğ} + \dot{m}_{gir}} \text{ ve } 1-\xi = \frac{\dot{m}_{sck}}{\dot{m}_{sck} + \dot{m}_{gir}} \quad [\text{Ek-6.5}]$$

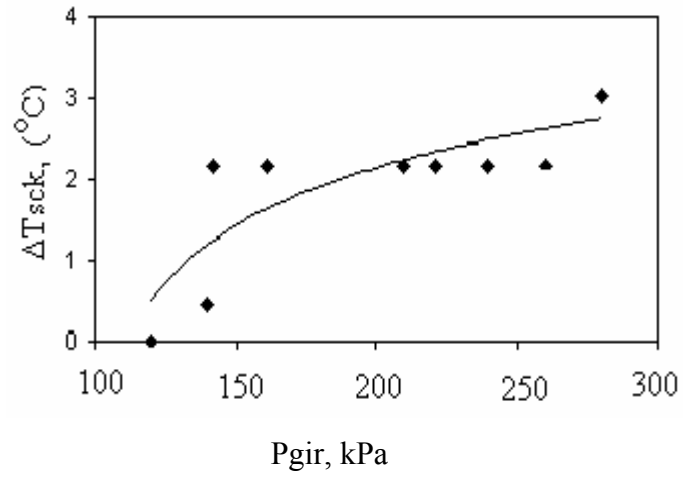
Sıcak akışkanın sıcaklığı ile girişteki akışkanın sıcaklıkları arasındaki fark  $\Delta T_{sck} = (T_{sck} - T_{gir})$  ve soğuk akışkanın sıcaklığı ile girişteki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark  $\Delta T_{sğk} = (T_{soğ} - T_{gir})$ 'dir. Sistem girişindeki basınç artarken nozullardaki hızında artması beklenir. Yapılan deneylerde bu durum görülmüştür. Nozullardaki hızın artmasıyla, giriş sıcak ve soğuk akışkanın kütle debileri de artmıştır. Bütün bunların sonucu olarak,  $\Delta T_{sck}$  ve  $\Delta T_{sğk}$ 'da artmıştır (Ek-Şekil 6.7-6.10).



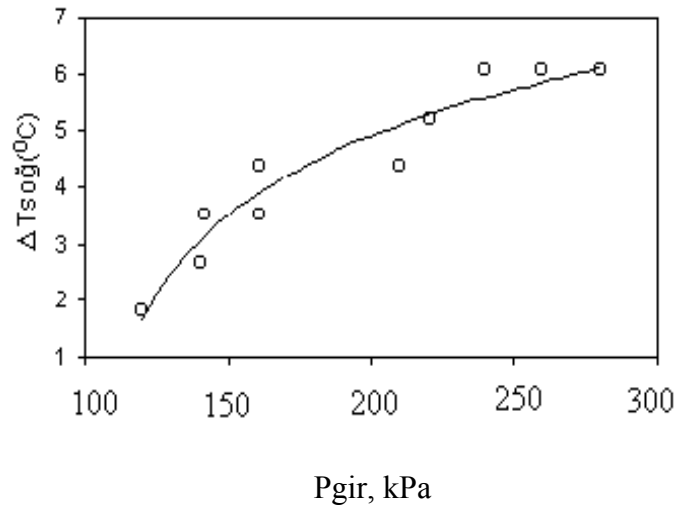
Ek-Şekil 6.7.  $\Delta T_{sck}$  ve  $\Delta T_{soğ}$ 'un nozuldaki hız ile değişimi



Ek-Şekil 6.8.  $\Delta T_{sck}$ 'ın  $m_{sck}$  ve  $\Delta T_{soğ}$ 'un  $m_{soğ}$  ile değişimi



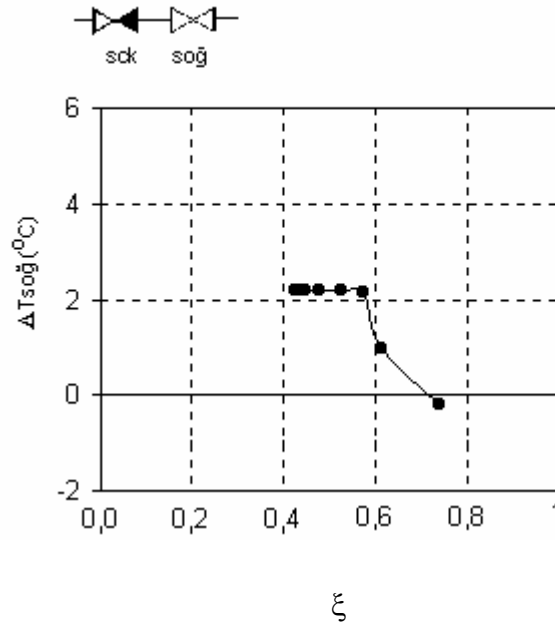
Ek-Şekil 6.9.  $\Delta T_{sck}$ 'ın vorteks tüpü girişindeki basınç ile değişimi



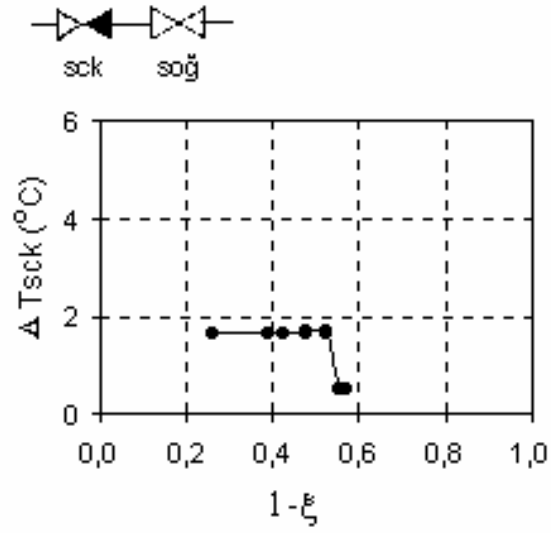
Ek-Şekil 6.10.  $\Delta T_{soğ}$ 'un vorteks tüpü girişindeki basınç ile değişimi

İkinci grup deneylerde, sistemin girişteki basıncı 120; 140; 160; 180 kPa olarak ayarlanmıştır. Bu grup deneylerde sıcak taraf tam açık konumdan, tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılarak deneyler yapılmıştır. Soğuk taraf tam açık konumda kalmıştır.  $\rightarrow \blacktriangleleft \rightarrow \blacktriangleleft$  (sck; A-K, soğ; A), şeklindeki ifadeler, akımın sıcak çıkış tarafından kontrol edildiğini göstermektedir.

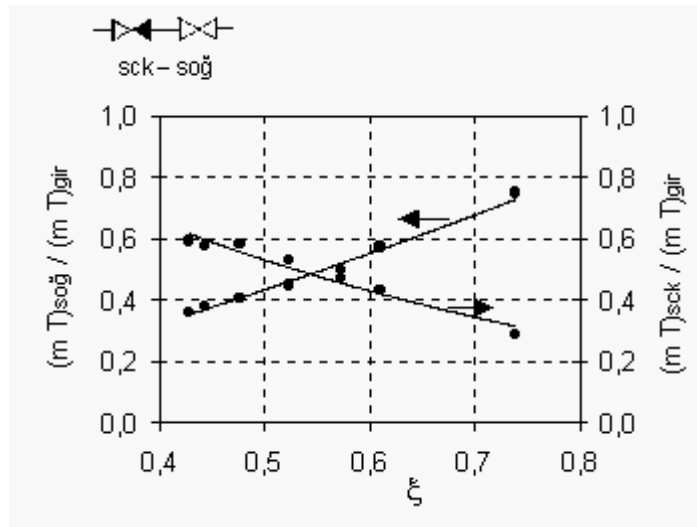
Ek-Şekil 6.11-6.22 ikinci grup deneylere ait şekillerdir. Ek-Şekil 6.11, Ek-Şekil 6.14, Ek-Şekil 6.17, Ek-Şekil 6.20’de  $\Delta T_{soğ}$ ’ın  $\xi$ ’e göre değişimi ve Ek-Şekil 6.12, Ek-Şekil 6.15, Ek-Şekil 6.18, Ek-Şekil 6.21’de de  $\Delta T_{sck}$ ’ın  $1-\xi$ ’e göre değişimleri verilmiştir. Ek-Şekil 6.13, Ek-Şekil 6.16, Ek-Şekil 6.19, Ek-Şekil 6.22’de ise sıcak akışkanın kütle debisiyle sıcaklığının çarpımının  $(mT)_{sck}$  girişteki akışkanın kütle debisiyle sıcaklığının çarpımına  $(mT)_{gir}$  oranının  $\xi$ ’ye göre değişimi ve soğuk akışkanın kütle debisiyle sıcaklığının çarpımının  $(mT)_{soğ}$  girişteki akışkanın kütle debisiyle sıcaklığının çarpımına oranının  $1-\xi$ ’ye göre değişimleri görülmektedir. Vorteks tüpe girişteki basıncın artmasıyla,  $\Delta T_{soğ}$ ’ın  $\xi$ ’ye göre değişimi ve  $\Delta T_{sck}$ ’ın  $1-\xi$ ’ye göre değişimleri de artmıştır. Vorteks tüpün girişindeki basınç yükseldikçe, soğuk çıkış tarafındaki vananın tam açık kalarak sıcak çıkış tarafındaki vananın kademe-kademe kapatılması durumunda  $\Delta T$ , 120 kPa’da 3,8 °C, 140 kPa 5,0 °C, 160 kPa’da 7,3 °C ve 180 kPa’da ise 9,6 °C olarak (maksimum) hesaplanmıştır.



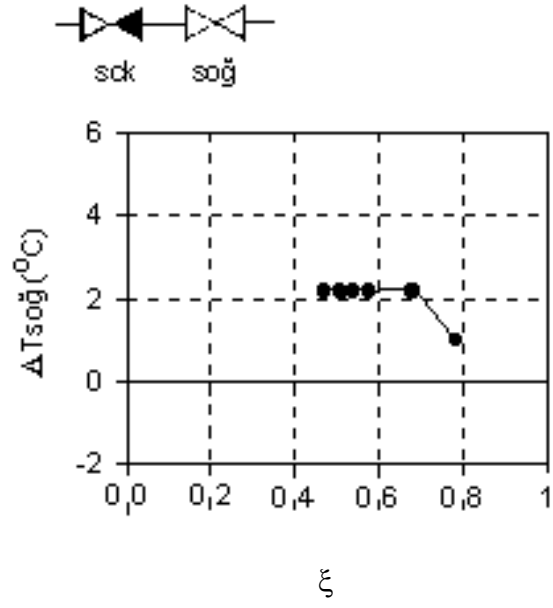
Ek-Şekil 6.11.  $P_{gir} = 120$  kPa’da  $\Delta T_{soğ}$ ’ın  $\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



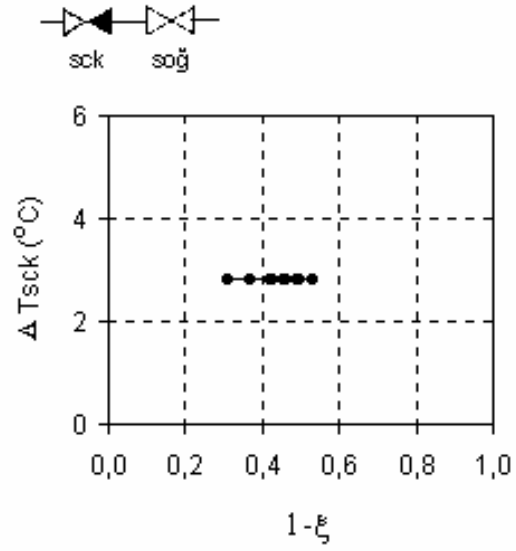
Ek-Şekil 6.12.  $P_{gir} = 120 \text{ kPa}$ 'da  $\Delta T_{sck}$ 'ın  $1-\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



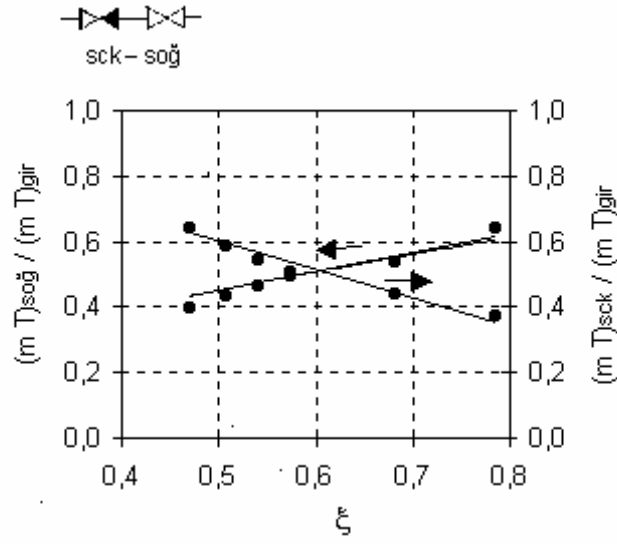
Ek-Şekil 6.13.  $P_{gir} = 120 \text{ kPa}$ 'da  $(mT)_{sck} / (mT)_{gir}$  ve  $(mT)_{soğ} / (mT)_{gir}$ 'nin  $\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



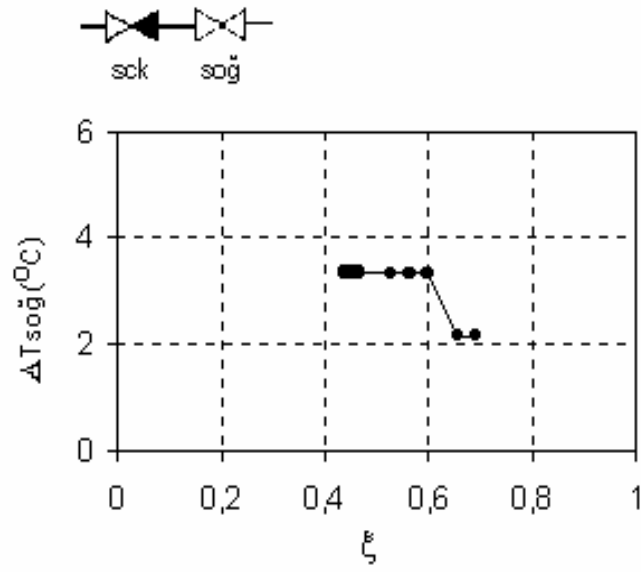
Ek-Şekil 6.14.  $P_{gir} = 140$  kPa’da  $\Delta T_{soğ}$ ’ın  $\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



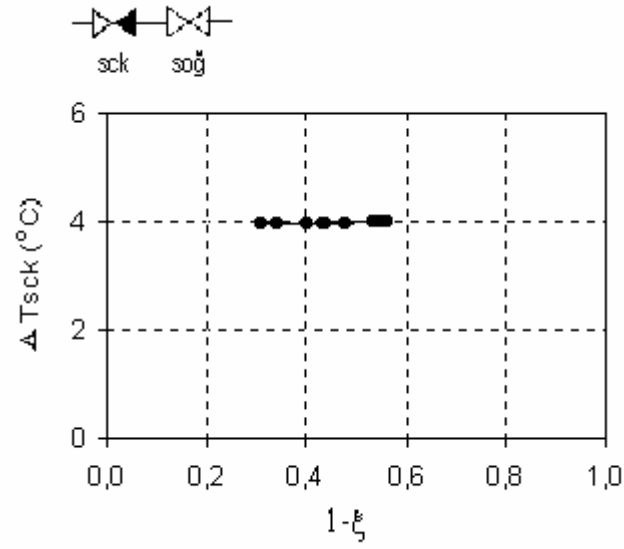
Ek-Şekil 6.15.  $P_{gir} = 140$  kPa’da  $\Delta T_{sck}$ ’ın  $1-\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



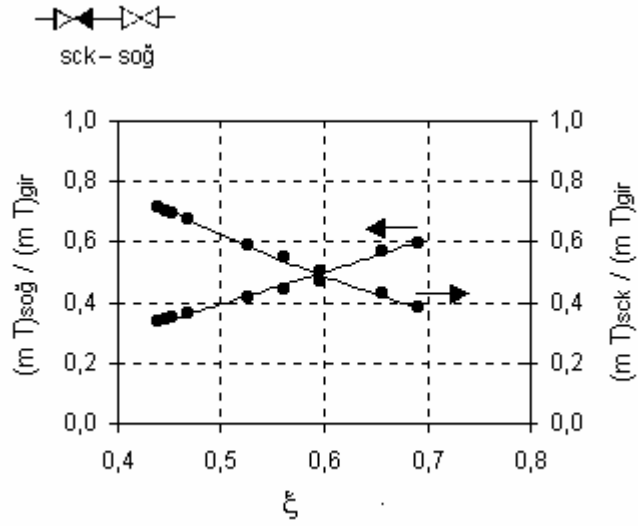
Ek-Şekil 6.16.  $P_{gir} = 140$  kPa'da  $(mT)_{sck}/(mT)_{gir}$  ve  $(mT)_{soğ}/(mT)_{gir}$ 'nin  $\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



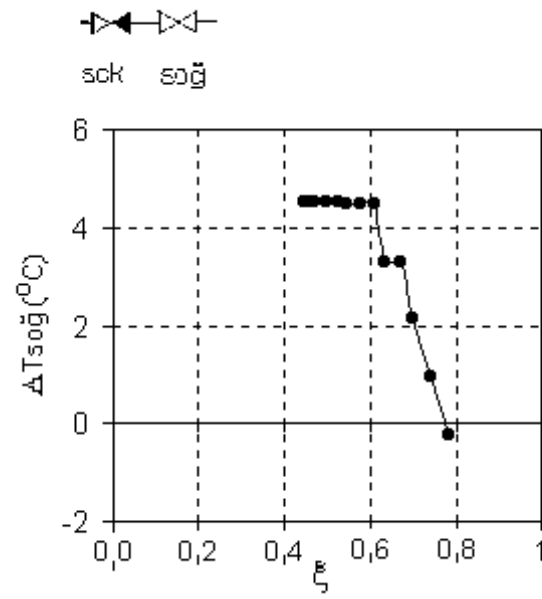
Ek-Şekil 6.17.  $P_{gir} = 160$  kPa'da  $\Delta T_{soğ}$ 'in  $\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



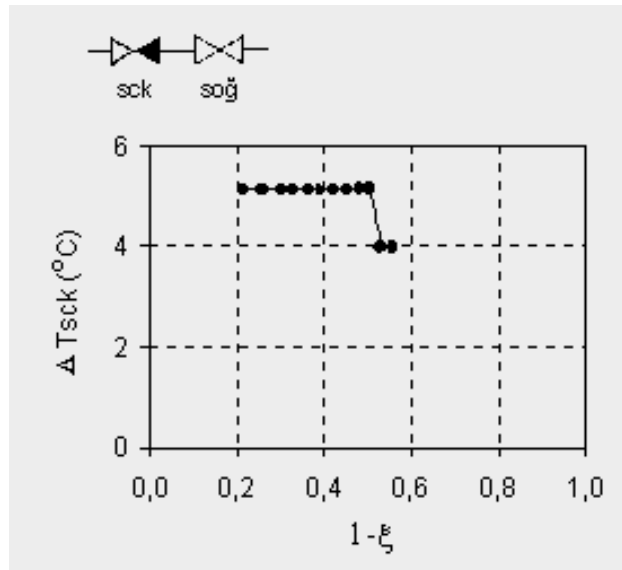
Ek-Şekil 6.18  $P_{gir} = 160 \text{ kPa}$ 'da  $\Delta T_{sck}$ 'ın  $1-\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



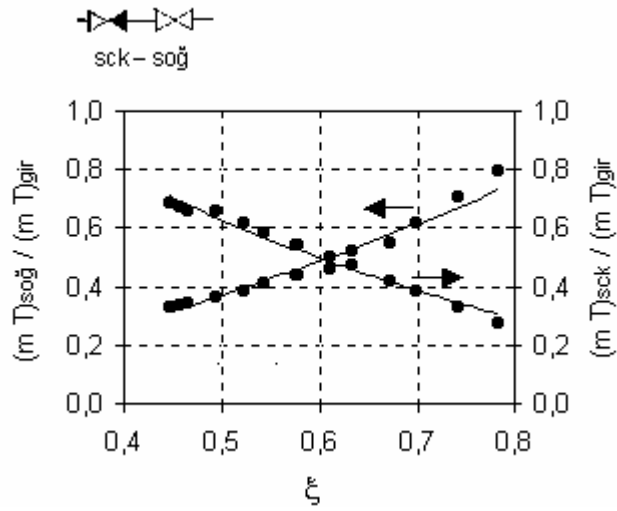
Ek-Şekil 6.19.  $P_{gir} = 160 \text{ kPa}$ 'da  $(mT)_{sck} / (mT)_{gir}$  ve  $(mT)_{soğ} / (mT)_{gir}$ 'nin  $\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



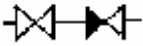
Ek-Şekil 6.20.  $P_{gir} = 180$  kPa'da  $\Delta T_{soğ}$ 'ın  $\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



Ek-Şekil 6.21.  $P_{gir} = 180$  kPa'da  $\Delta T_{sk}$ 'ın  $1-\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)



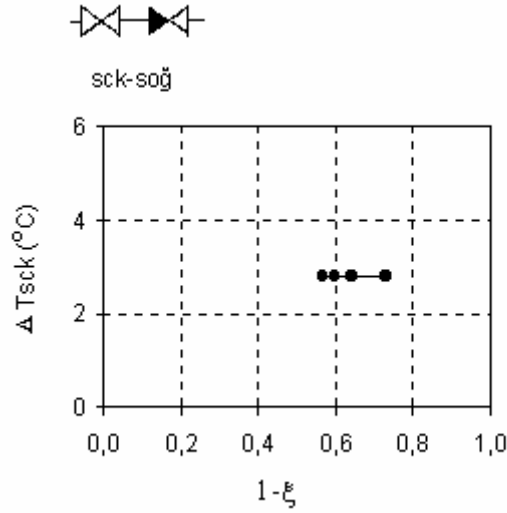
Ek-Şekil 6.22.  $P_{gir} = 180$  kPa’da  $(mT)_{sck}/(mT)_{gir}$  ve  $(mT)_{soğ}/(mT)_{gir}$ ’nin  $\xi$  ile değişimi (sck; A-K, soğ; A)

Üçüncü grup deneylerde ise, sistemin girişteki basıncı 120; 140; 160; 180 kPa olarak seçilmiştir. Bu grup deneyler yapılırken, soğuk taraf tam açık konumdan, tam kapalı duruma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılarak deneyler yapılmıştır. Sıcak taraf tam açık konumda bırakılmıştır.  (sck;A, soğ; A-K), şeklindeki ifadeler, akımın soğuk çıkış tarafından kontrol edildiğini göstermektedir.

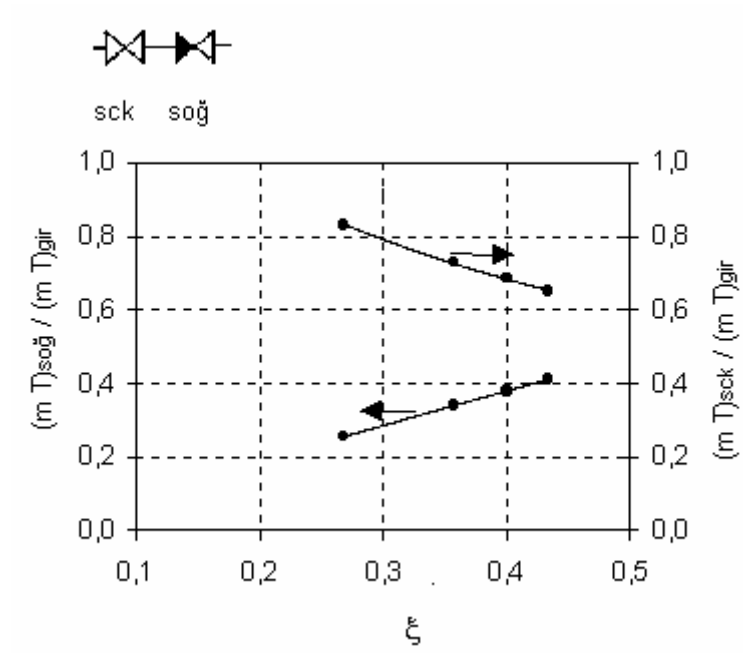
Üçüncü grup deneylere ait şekiller, Ek-Şekil 6.23-6.37’dir. Ek-Şekil 6.23, Ek-Şekil 6.26, Ek-Şekil 6.29, Ek-Şekil 6.32’de  $\Delta T_{soğ}$ ’ın  $\xi$ ’ye göre değişimleri, Ek-Şekil 6.24, Ek-Şekil 6.27, Ek-Şekil 6.30 ve Ek-Şekil 6.33’de ise  $\Delta T_{sck}$ ’ın  $1-\xi$ ’ye göre değişimleri görülmektedir. Sıcak akışkanın kütle debisiyle sıcaklığının çarpımın, girişteki akışkanın kütle debisiyle sıcaklığının çarpımına oranın  $\xi$ ’ye göre değişimi ve soğuk akışkanın kütle debisiyle sıcaklığının çarpımın, girişteki akışkanın kütle debisiyle sıcaklığının çarpımına oranın  $1-\xi$ ’ye göre değişimleri, Ek-Şekil 6.25, Ek-Şekil 6.28, Ek-Şekil 6.31, Ek-Şekil 6.34’de çizilmiştir.

Vorteks tüplerde enerji ayrışma olayı, durma noktası ile vorteks tüpün soğuk çıkış tarafıyla ilgilidir ve bu gruptaki deneylerin özellikleri, soğuk çıkış tarafındaki

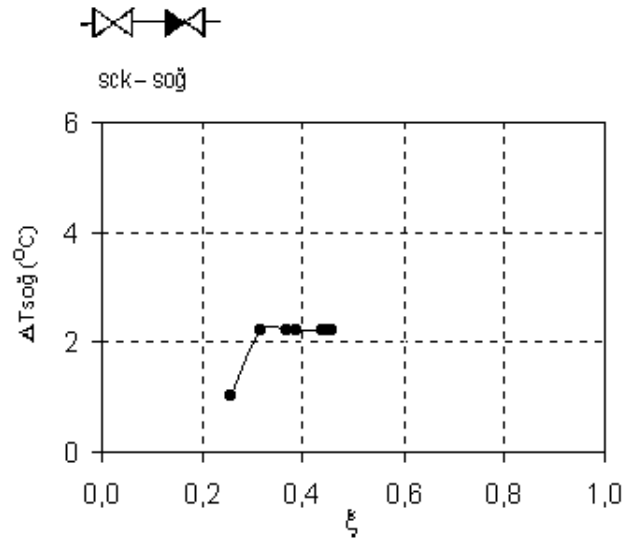
vananın tam açık konumundan tam kapalı konuma gelinceye kadar kademe-kademe kapatılmasıdır. Bu grupta yapılmış olan deneylerde, soğuk çıkıştaki vananın tam açık konumunda  $\xi$  değeri en yüksek, vana kapatıldıkça  $\xi$  değeri de düşmüştür. Dolayısıyla  $\xi$  değerin en yüksek değerinde  $\Delta T_{\text{soğ}}$ 'da yüksek,  $\xi$  değerinin düşmesiyle de  $\Delta T_{\text{soğ}}$  azalmıştır.  $\Delta T_{\text{sck}}$ , ise  $1-\xi$ 'nin düşük değerlerinde yüksek,  $1-\xi$ 'nin yüksek değerlerinde düştüğü deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bu grup deneylerde  $\Delta T$ , 120 kPa'da 3,8 °C, 140 kPa 5,1 °C, 160 kPa'da 6,2 °C ve 180 kPa'da ise 6,1 °C olarak (maksimum) hesaplanmıştır.



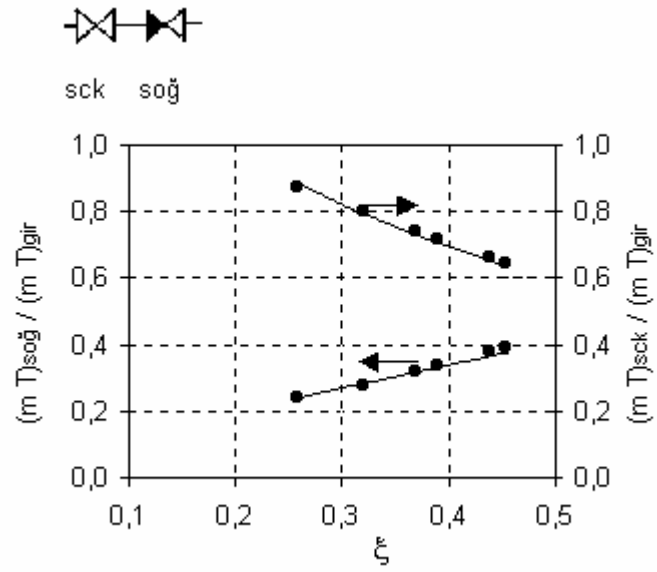
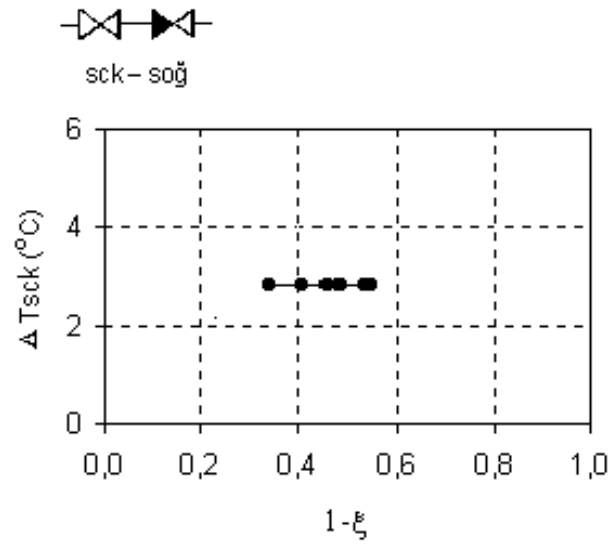
Ek-Şekil 6.24.  $P_{\text{gir}} = 120 \text{ kPa}$ 'da  $\Delta T_{\text{sck}}$ 'ın  $1-\xi$  ile değişimi (sck;A, soğ; A-K)

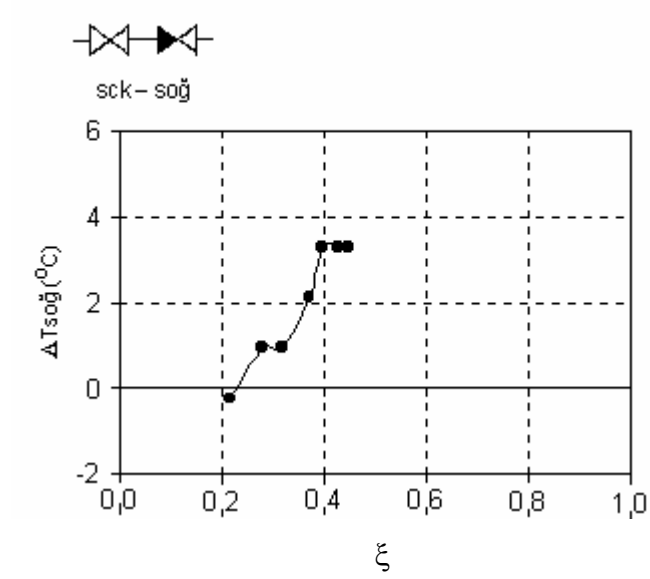


Ek-Şekil 6.25.  $P_{gir} = 120$  kPa'da  $(mT)_{sck}/(mT)_{gir}$  ve  $(mT)_{soğ}/(mT)_{gir}$   $\xi$  ile değişimi (sck;A, soğ; A-K)

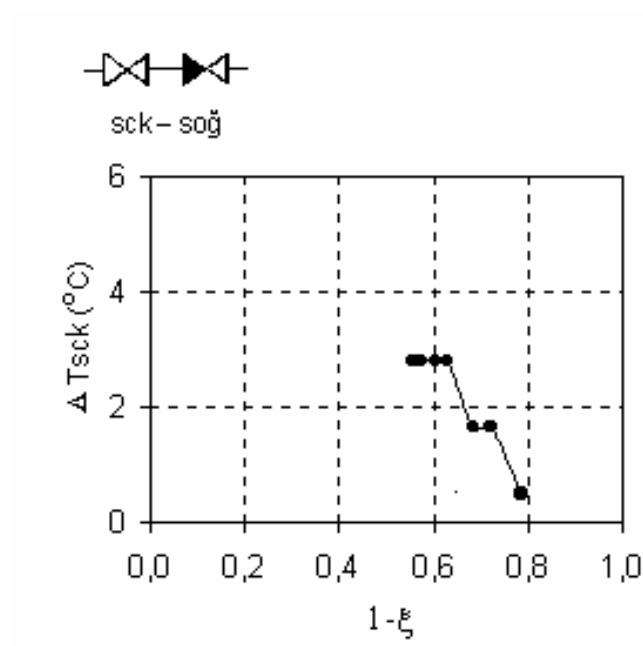


Ek-Şekil 6.26.  $P_{gir} = 140$  kPa'da  $\Delta T_{soğ}$ 'ın  $\xi$  ile değişimi (sck;A, soğ; A-K )

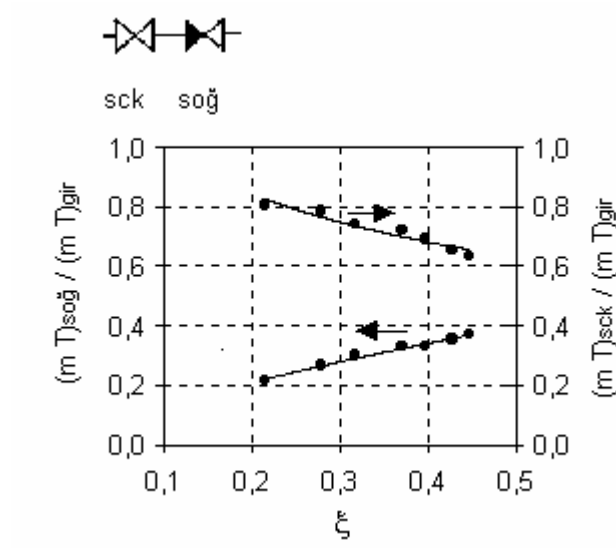




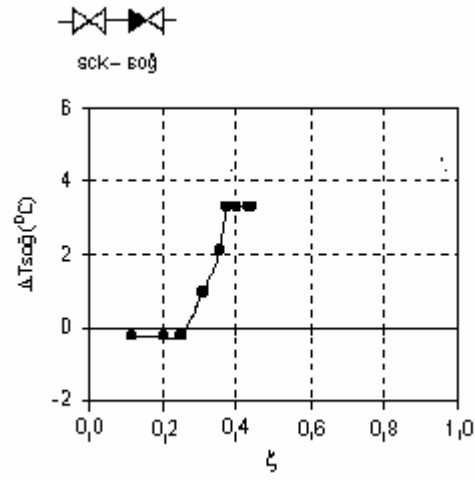
Ek-Şekil 6.29.  $P_{gir} = 160$  kPa’da  $\Delta T_{soğ}$ ’ın  $\xi$  ile değişimi (sck;A, soğ; A-K )



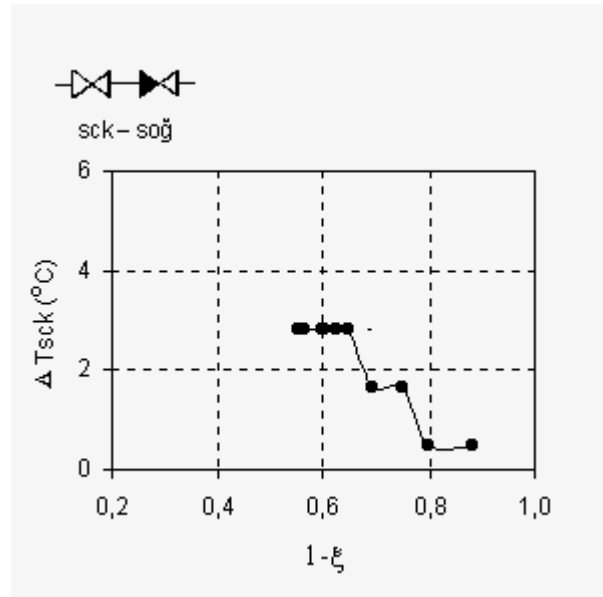
Ek-Şekil 6.30.  $P_{gir} = 160$  kPa’da  $\Delta T_{scck}$ ’ın  $1-\xi$  ile değişimi (sck;A, soğ; A-K )



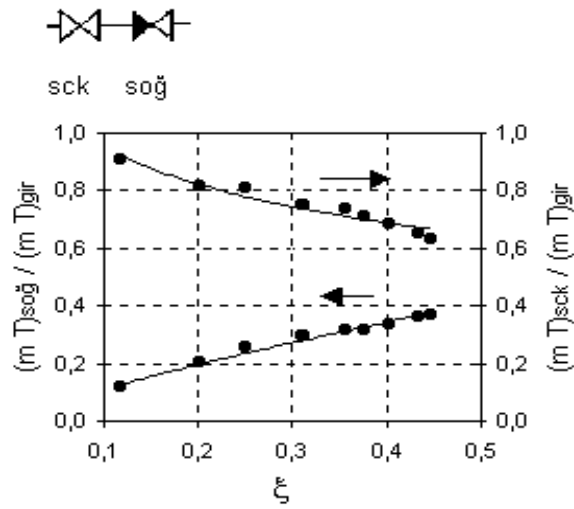
Ek-Şekil 6.31.  $P_{gir}=160$  kPa’da  $(mT)_{sck}/(mT)_{gir}$  ve  $(mT)_{soğ}/(mT)_{gir}$ ’nin  $\xi$  ile değişimi (sck;A, soğ; A-K )



Ek-Şekil 6.32.  $P_{gir} = 180$  kPa’da  $\Delta T_{soğ}$ ’ın  $\xi$  ile değişimi (sck;A, soğ; A-K )



Ek-Şekil 6.33.  $P_{gir} = 180$  kPa’da  $\Delta T_{sck}$ ’ın  $1-\xi$  ile değişimi (sck;A, soğ; A-K )



Ek-Şekil 6.34.  $P_{gir} = 180$  kPa’da  $(mT)_{sck}/(mT)_{gir}$  ve  $(mT)_{soğ}/(mT)_{gir}$ ’nin  $\xi$  ile değişimi (sck;A, soğ; A-K )

### Ek-6.6. Sonuçlar

Bu çalışmada hiçbir hareketli parçası bulunmayan ve giriş çıkış kütleli debileri (sıcak ve soğuk çıkış) ayarlanabilir bir Ranque-Hilsch vorteks tüp imal edilmiştir. Geliştirilen bu vorteks tüpün performansını incelemek amacıyla üç grup deney

yapılmıştır. Basınç, hız ve sıcaklık ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılarak gerekli olan hesaplamalar yapılmış ve vorteks tüpün performansına dair grafikler çizilerek öneriler getirilmiştir. Vorteks tüpün girişindeki basınç yükseldikçe, soğuk çıkış tarafındaki vananın tam açık kalarak sıcak çıkış tarafındaki vananın kademe-kademe kapatılması durumunda,  $\Delta T$  180 kPa’da maksimum 9,6 °C’tür. Sıcak çıkış tarafındaki vananın tam açık kalarak soğuk çıkış tarafındaki vananın kademe-kademe kapatılması durumunda,  $\Delta T$  180 kPa’da maksimum 6,1 °C’tür. Bu iki sonuç birbiri ile mukayese edildiğinde, vorteks tüplerde girişteki basınç yükseldikçe, sıcak çıkış tarafındaki vananın kademe-kademe kapatılması durumunda, performansın daha yüksek olduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir (Ek-Çizelge 6.1-6.40). Bu deneysel çalışma ile vorteks tüplerin sıcak ve soğuk akımın hızlarının kontrol edilerek enerji ayırma olayının gerçekleşebileceği görülmüştür. Ancak sıcak akımın kontrolünün daha etkin olduğu deneysel çalışmalar sonucunda anlaşılmıştır.

Ek Çizelge 6.1. Vorteks tüpe 120 kPa giriş basıncında, giriş sıcak ve soğuk akımın ısı çiftlerinden okunmuş sıcaklıkları, soğuk ve sıcak akımın cıvalı manometreden okunmuş olan hız değerleri (Sck; A-K, Soğ;A)

| Pgir, kPa | Tgir, °C | Tsck, °C | Tsoğ, °C | mmHg,(sck) | mmHg, (soğ) |
|-----------|----------|----------|----------|------------|-------------|
| 120       | 18       | 18       | 16       | 66         | 54          |
| 120       | 19       | 19       | 17       | 60         | 56          |
| 120       | 19       | 20       | 17       | 50         | 62          |
| 120       | 19       | 20       | 17       | 40         | 74          |
| 120       | 20       | 21       | 18       | 30         | 86          |
| 120       | 20       | 21       | 19       | 24         | 96          |
| 120       | 20       | 21       | 20       | 10         | 144         |

Ek Çizelge 6.2. Vorteks tüpe giriş, soğuk ve sıcak akımlarının termometre değerleri ve sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=120$  kPa

| <b>T<sub>gir</sub>, °C</b> | <b>T<sub>sck</sub>, °C</b> | <b>T<sub>soğ</sub>, °C</b> | <b><math>\Delta T</math>, °C</b> |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 13,6                       | 14,1                       | 11,4                       | 2,7                              |
| 14,8                       | 15,3                       | 12,6                       | 2,7                              |
| 14,8                       | 16,4                       | 12,6                       | 3,8                              |
| 14,8                       | 16,4                       | 12,6                       | 3,8                              |
| 15,9                       | 17,6                       | 13,8                       | 3,8                              |
| 15,9                       | 17,6                       | 15,0                       | 2,6                              |
| 15,9                       | 17,6                       | 16,1                       | 1,5                              |

Ek Çizelge 6.3. Vorteks tüpe 120 kPa giriş basıncında nozul, sıcak ve soğuk akımın hızları (Sck;A-K, Soğ; A)

| <b>V<sub>nozul</sub>, m/s</b> | <b>V<sub>sck</sub>, m/s</b> | <b>V<sub>soğ</sub>, m/s</b> |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 125,49                        | 22,93                       | 18,44                       |
| 123,48                        | 21,97                       | 18,77                       |
| 120,92                        | 20,25                       | 19,73                       |
| 120,15                        | 18,33                       | 21,53                       |
| 118,07                        | 16,12                       | 23,18                       |
| 117,05                        | 14,59                       | 24,47                       |
| 118,07                        | 9,87                        | 29,88                       |

Ek Çizelge 6.4. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki hacimsel debiler (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=120$  kPa

| <b>Q<sub>gir</sub>, m<sup>3</sup>/s</b> | <b>Q<sub>sck</sub>, m<sup>3</sup>/s</b> | <b>Q<sub>soğ</sub>, m<sup>3</sup>/s</b> |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 0,0071                                  | 0,0041                                  | 0,0030                                  |
| 0,0070                                  | 0,0039                                  | 0,0031                                  |
| 0,0068                                  | 0,0036                                  | 0,0033                                  |
| 0,0068                                  | 0,0032                                  | 0,0036                                  |
| 0,0067                                  | 0,0028                                  | 0,0038                                  |
| 0,0066                                  | 0,0026                                  | 0,0040                                  |
| 0,0067                                  | 0,0017                                  | 0,0049                                  |

Ek Çizelge 6.5. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki kütleli debiler,  $\xi$  ve  $1-\xi$  (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=120$  kPa

| mgir, kg/s | msck, kg/s | msğk, kg/s | $\xi$ | $1-\xi$ |
|------------|------------|------------|-------|---------|
| 0,0085     | 0,0049     | 0,0037     | 0,43  | 0,57    |
| 0,0084     | 0,0047     | 0,0037     | 0,44  | 0,56    |
| 0,0082     | 0,0043     | 0,0039     | 0,48  | 0,52    |
| 0,0082     | 0,0039     | 0,0043     | 0,52  | 0,48    |
| 0,0080     | 0,0034     | 0,0046     | 0,57  | 0,43    |
| 0,0079     | 0,0031     | 0,0048     | 0,61  | 0,39    |
| 0,0080     | 0,0021     | 0,0059     | 0,74  | 0,26    |

Ek Çizelge 6.6. Vorteks tüpe 140 kPa giriş basıncında, giriş sıcak ve soğuk akımın ısı çiftlerinden okunmuş sıcaklıkları, soğuk ve sıcak akımın cıvalı manometreden okunmuş olan hız değerleri (Sck; A-K, Soğ;A)

| Pgir, kPa | Tgir, °C | Tsck, °C | Tsoğ, °C | mmHg, (sck) | mmHg, (soğ) |
|-----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|
| 140       | 18       | 20       | 16       | 76          | 86          |
| 140       | 19       | 21       | 17       | 64          | 100         |
| 140       | 19       | 21       | 17       | 50          | 106         |
| 140       | 19       | 21       | 17       | 44          | 124         |
| 140       | 19       | 21       | 17       | 30          | 140         |
| 140       | 19       | 21       | 18       | 20          | 164         |

Ek Çizelge 6.7. Vorteks tüpe giriş, soğuk ve sıcak akımlarının termometre değerleri ve sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=140$  kPa

| Tgir, °C | Tsck, °C | Tsğk, °C | $\Delta T$ , °C |
|----------|----------|----------|-----------------|
| 13,6     | 16,4     | 11,4     | 5,0             |
| 14,8     | 17,6     | 12,6     | 5,0             |
| 14,8     | 17,6     | 12,6     | 5,0             |
| 14,8     | 17,6     | 12,6     | 5,0             |
| 14,8     | 17,6     | 12,6     | 5,0             |
| 14,8     | 17,6     | 13,8     | 3,8             |

Ek Çizelge 6.8. Vorteks tüpe 140 kPa giriş basıncında nozul, sıcak ve soğuk akımın hızları (Sck;A-K, Soğ; A)

| Vnozul, m/s | Vsck, m/s | Vsğk, m/s |
|-------------|-----------|-----------|
| 144,01      | 24,42     | 23,18     |
| 143,59      | 22,62     | 24,97     |
| 138,32      | 20,25     | 25,70     |
| 140,83      | 19,13     | 27,76     |
| 136,42      | 16,12     | 29,47     |
| 135,03      | 13,45     | 31,85     |

Ek Çizelge 6.9. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki hacimsel debiler Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=140$  kPa

| Qgir, m <sup>3</sup> /s | Qsck, m <sup>3</sup> /s | Qsğk, m <sup>3</sup> /s |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,0081                  | 0,0043                  | 0,0038                  |
| 0,0081                  | 0,0040                  | 0,0041                  |
| 0,0078                  | 0,0036                  | 0,0042                  |
| 0,0080                  | 0,0034                  | 0,0046                  |
| 0,0077                  | 0,0028                  | 0,0049                  |
| 0,0076                  | 0,0024                  | 0,0053                  |

Ek Çizelge 7.10. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki kütleli debiler,  $\xi$  ve  $1-\xi$  (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=140$  kPa

| m <sub>gir</sub> , kg/s | m <sub>sck</sub> , kg/s | m <sub>sğk</sub> , kg/s | $\xi$ | $1-\xi$ |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|---------|
| 0,0098                  | 0,0043                  | 0,0038                  | 0,47  | 0,53    |
| 0,0097                  | 0,0040                  | 0,0041                  | 0,51  | 0,49    |
| 0,0094                  | 0,0036                  | 0,0042                  | 0,54  | 0,46    |
| 0,0096                  | 0,0034                  | 0,0046                  | 0,58  | 0,42    |
| 0,0093                  | 0,0028                  | 0,0049                  | 0,68  | 0,37    |
| 0,0092                  | 0,0024                  | 0,0053                  | 0,79  | 0,31    |

Ek Çizelge 6.11. Vorteks tüpe 160 kPa giriş basıncında, giriş sıcak ve soğuk akımın ısı çiftlerinden okunmuş sıcaklıkları, soğuk ve sıcak akımın cıvalı manometreden okunmuş olan hız değerleri (Sck; A-K, Soğ; A)

| Pgir, kPa | Tgir, °C | Tsck, °C | Tsoğ, °C | mmHg, (sck) | mmHg, (soğ) |
|-----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|
| 160       | 19       | 22       | 16       | 138         | 114         |
| 160       | 19       | 22       | 16       | 130         | 116         |
| 160       | 19       | 22       | 16       | 128         | 120         |
| 160       | 19       | 22       | 16       | 116         | 124         |
| 160       | 20       | 23       | 17       | 90          | 158         |
| 160       | 20       | 23       | 17       | 70          | 170         |
| 160       | 20       | 23       | 17       | 56          | 186         |
| 160       | 20       | 23       | 18       | 40          | 228         |
| 160       | 20       | 23       | 18       | 30          | 240         |

Ek Çizelge 6.12. Vorteks tüpe giriş, soğuk ve sıcak akımlarının termometre değerleri ve sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark (Sck; A-K, Soğ; A); P<sub>gir</sub>=160 kPa

| Tgir, °C | Tsck, °C | Tsgk, °C | ΔT, °C |
|----------|----------|----------|--------|
| 14,8     | 18,7     | 11,4     | 7,3    |
| 14,8     | 18,7     | 11,4     | 7,3    |
| 14,8     | 18,7     | 11,4     | 7,3    |
| 14,8     | 18,7     | 11,4     | 7,3    |
| 15,9     | 19,9     | 12,6     | 7,3    |
| 15,9     | 19,9     | 12,6     | 7,3    |
| 15,9     | 19,9     | 12,6     | 7,3    |
| 15,9     | 19,9     | 13,8     | 6,1    |
| 15,9     | 19,9     | 13,8     | 6,1    |

Ek Çizelge 6.13. Vorteks tüpe 160 kPa giriş basıncında nozul, sıcak ve soğuk akımın hızları (Sck; A-K, Soğ; A)

| Vnozul, m/s | Vsck, m/s | Vsgk, m/s |
|-------------|-----------|-----------|
| 177,40      | 31,88     | 26,63     |
| 175,44      | 31,04     | 26,86     |
| 176,09      | 30,83     | 27,31     |
| 173,24      | 29,50     | 27,76     |
| 173,62      | 26,34     | 31,27     |
| 168,23      | 23,54     | 32,42     |
| 165,53      | 21,31     | 33,89     |
| 166,66      | 18,33     | 37,46     |
| 162,55      | 16,12     | 38,42     |

Ek-Çizelge 6.14. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki hacimsel debiler (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=160$  kPa

| <b>Q<sub>gir</sub>, m<sup>3</sup>/s</b> | <b>Q<sub>sck</sub>, m<sup>3</sup>/s</b> | <b>Q<sub>sğk</sub>, m<sup>3</sup>/s</b> |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 0,0100                                  | 0,0056                                  | 0,0044                                  |
| 0,0099                                  | 0,0055                                  | 0,0044                                  |
| 0,0100                                  | 0,0054                                  | 0,0045                                  |
| 0,0098                                  | 0,0052                                  | 0,0046                                  |
| 0,0098                                  | 0,0047                                  | 0,0052                                  |
| 0,0095                                  | 0,0042                                  | 0,0054                                  |
| 0,0094                                  | 0,0038                                  | 0,0056                                  |
| 0,0094                                  | 0,0032                                  | 0,0062                                  |
| 0,0092                                  | 0,0028                                  | 0,0063                                  |

Ek Çizelge 6.15. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki kütleli debiler,  $\xi$  ve  $1-\xi$  (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=160$  kPa

| <b>m<sub>gir</sub>, kg/s</b> | <b>m<sub>sck</sub>, kg/s</b> | <b>m<sub>sğk</sub>, kg/s</b> | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>1-\xi</math></b> |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0,0120                       | 0,0068                       | 0,0053                       | 0,44                    | 0,56                      |
| 0,0119                       | 0,0066                       | 0,0053                       | 0,45                    | 0,55                      |
| 0,0119                       | 0,0065                       | 0,0054                       | 0,45                    | 0,55                      |
| 0,0118                       | 0,0063                       | 0,0055                       | 0,47                    | 0,53                      |
| 0,0118                       | 0,0056                       | 0,0062                       | 0,53                    | 0,47                      |
| 0,0114                       | 0,0050                       | 0,0064                       | 0,56                    | 0,44                      |
| 0,0112                       | 0,0045                       | 0,0067                       | 0,60                    | 0,40                      |
| 0,0113                       | 0,0039                       | 0,0074                       | 0,66                    | 0,34                      |
| 0,0110                       | 0,0034                       | 0,0076                       | 0,69                    | 0,31                      |

Ek-Çizelge 6.16. Vorteks tüpe 180 kPa giriş basıncında, giriş sıcak ve soğuk akımın ısı çiftlerinden okunmuş sıcaklıkları, soğuk ve sıcak akımın cıvalı manometreden okunmuş olan hız değerleri (Sck; A-K, Soğ;A)

| <b>P<sub>gir</sub>, kPa</b> | <b>T<sub>gir</sub>, °C</b> | <b>T<sub>sck</sub>, °C</b> | <b>T<sub>soğ</sub>, °C</b> | <b>mmHg, (sck)</b> | <b>mmHg, (soğ)</b> |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
| 180                         | 21                         | 24                         | 17                         | 194                | 166                |
| 180                         | 21                         | 24                         | 17                         | 180                | 170                |
| 180                         | 21                         | 24                         | 17                         | 170                | 174                |
| 180                         | 21                         | 25                         | 17                         | 138                | 182                |
| 180                         | 21                         | 25                         | 17                         | 126                | 210                |
| 180                         | 22                         | 26                         | 18                         | 110                | 220                |
| 180                         | 22                         | 26                         | 18                         | 86                 | 232                |
| 180                         | 22                         | 26                         | 18                         | 74                 | 266                |
| 180                         | 22                         | 26                         | 19                         | 66                 | 290                |
| 180                         | 22                         | 26                         | 19                         | 48                 | 310                |
| 180                         | 22                         | 26                         | 20                         | 40                 | 336                |
| 180                         | 22                         | 26                         | 21                         | 30                 | 404                |
| 180                         | 22                         | 26                         | 22                         | 20                 | 450                |

Ek-Çizelge 6.17. Vorteks tüpe giriş, soğuk ve sıcak akımlarının termometre değerleri ve sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=180$  kPa

| Tgir, °C | Tsck, °C | Tsoğ, °C | $\Delta T$ , °C |
|----------|----------|----------|-----------------|
| 17,1     | 21,1     | 12,6     | 8,5             |
| 17,1     | 21,1     | 12,6     | 8,5             |
| 17,1     | 21,1     | 12,6     | 8,5             |
| 17,1     | 22,2     | 12,6     | 9,6             |
| 17,1     | 22,2     | 12,6     | 9,6             |
| 18,3     | 23,4     | 13,8     | 9,6             |
| 18,3     | 23,4     | 13,8     | 9,6             |
| 18,3     | 23,4     | 13,8     | 9,6             |
| 18,3     | 23,4     | 15,0     | 8,4             |
| 18,3     | 23,4     | 15,0     | 8,4             |
| 18,3     | 23,4     | 16,1     | 7,3             |
| 18,3     | 23,4     | 17,3     | 6,1             |
| 18,3     | 23,4     | 18,5     | 4,9             |

Ek Çizelge 6.18. Vorteks tüpe 180 kPa giriş basıncında nozul, sıcak ve soğuk akımın hızları (Sck;A-K, Soğ; A)

| Vnozul, m/s | Vsck, m/s | Vsoğ, m/s |
|-------------|-----------|-----------|
| 209,57      | 37,12     | 32,04     |
| 206,86      | 35,90     | 32,42     |
| 205,12      | 35,00     | 32,79     |
| 197,53      | 31,88     | 33,53     |
| 200,70      | 30,61     | 35,97     |
| 197,50      | 28,81     | 36,80     |
| 190,97      | 25,81     | 37,78     |
| 193,41      | 24,13     | 40,41     |
| 194,78      | 22,93     | 42,16     |
| 189,38      | 19,89     | 43,57     |
| 189,66      | 18,33     | 45,33     |
| 195,32      | 16,12     | 49,64     |
| 194,87      | 13,45     | 52,34     |

Ek Çizelge 6.19. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki hacimsel debiler (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=180$  kPa

| $Q_{gir}, m^3/s$ | $Q_{sck}, m^3/s$ | $Q_{sğk}, m^3/s$ |
|------------------|------------------|------------------|
| 0,0119           | 0,0066           | 0,0053           |
| 0,0117           | 0,0063           | 0,0054           |
| 0,0116           | 0,0062           | 0,0054           |
| 0,0112           | 0,0056           | 0,0055           |
| 0,0113           | 0,0054           | 0,0059           |
| 0,0112           | 0,0051           | 0,0061           |
| 0,0108           | 0,0046           | 0,0062           |
| 0,0109           | 0,0043           | 0,0067           |
| 0,0110           | 0,0041           | 0,0070           |
| 0,0107           | 0,0035           | 0,0072           |
| 0,0107           | 0,0032           | 0,0075           |
| 0,0110           | 0,0028           | 0,0082           |
| 0,0110           | 0,0024           | 0,0086           |

Ek Çizelge 6.20. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki kütleli debiler,  $\xi$  ve  $1-\xi$  (Sck;A-K, Soğ; A);  $P_{gir}=180$  kPa

| $m_{gir}, kg/s$ | $m_{sck}, kg/s$ | $m_{sğk}, kg/s$ | $\xi$ | $1-\xi$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------|---------|
| 0,0142          | 0,0079          | 0,0063          | 0,45  | 0,55    |
| 0,0140          | 0,0076          | 0,0064          | 0,46  | 0,54    |
| 0,0139          | 0,0074          | 0,0065          | 0,47  | 0,53    |
| 0,0134          | 0,0068          | 0,0066          | 0,50  | 0,50    |
| 0,0136          | 0,0065          | 0,0071          | 0,52  | 0,48    |
| 0,0134          | 0,0061          | 0,0073          | 0,54  | 0,46    |
| 0,0130          | 0,0055          | 0,0075          | 0,58  | 0,42    |
| 0,0131          | 0,0051          | 0,0080          | 0,61  | 0,39    |
| 0,0132          | 0,0049          | 0,0084          | 0,63  | 0,37    |
| 0,0129          | 0,0042          | 0,0086          | 0,67  | 0,33    |
| 0,0129          | 0,0039          | 0,0090          | 0,70  | 0,30    |
| 0,0133          | 0,0034          | 0,0098          | 0,74  | 0,26    |
| 0,0132          | 0,0029          | 0,0104          | 0,78  | 0,22    |

Ek Çizelge 6.21. Vorteks tüpe 120 kPa giriş basıncında, giriş sıcak ve soğuk akımın ısı çiftlerinden okunmuş sıcaklıkları, soğuk ve sıcak akımın cıvalı manometreden okunmuş olan hız değerleri (Sck; A, Soğ; A-K)

| Pgir, kPa | Tgir, °C | Tsck, °C | Tsoğ, °C | mmHg, (sck) | mmHg, (soğ) |
|-----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|
| 120       | 23       | 25       | 22       | 66          | 56          |
| 120       | 23       | 25       | 22       | 72          | 46          |
| 120       | 24       | 26       | 23       | 78          | 34          |
| 120       | 24       | 26       | 23       | 110         | 20          |

Ek Çizelge 6.22. Vorteks tüpe giriş, soğuk ve sıcak akımlarının termometre değerleri ve sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark (Sck; A, Soğ; A-K); P<sub>gir</sub>=120 kPa

| Tgir, °C | Tsck, °C | Tsoğ, °C | ΔT, °C |
|----------|----------|----------|--------|
| 19,4     | 22,2     | 18,4     | 3,8    |
| 19,4     | 22,2     | 18,4     | 3,8    |
| 20,6     | 23,4     | 19,6     | 3,8    |
| 20,6     | 23,4     | 19,6     | 3,8    |

Ek Çizelge 6.23. Vorteks tüpe 120 kPa giriş basıncında nozul, sıcak ve soğuk akımın hızları (Sck; A, Soğ; A-K)

| Vnozul, m/s | Vsck, m/s | Vsoğ, m/s |
|-------------|-----------|-----------|
| 126,46      | 22,93     | 18,77     |
| 124,25      | 23,84     | 17,04     |
| 120,08      | 24,71     | 14,68     |
| 123,05      | 28,81     | 11,31     |

Ek Çizelge 6.24. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki hacimsel debiler (Sck; A, Soğ; A-K); P<sub>gir</sub>=120 kPa

| Qgir, m <sup>3</sup> /s | Qsck, m <sup>3</sup> /s | Qsğk, m <sup>3</sup> /s |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,0072                  | 0,0041                  | 0,0031                  |
| 0,0070                  | 0,0042                  | 0,0028                  |
| 0,0068                  | 0,0044                  | 0,0024                  |
| 0,0070                  | 0,0051                  | 0,0019                  |



Ek Çizelge 6.28. Vorteks tüpe 140 kPa giriş basıncında nozul, sıcak ve soğuk akımın hızları (Sck; A, Soğ; A-K)

| Vnozul, m/s | Vsck, m/s | Vsoğ, m/s |
|-------------|-----------|-----------|
| 131,08      | 20,35     | 22,93     |
| 129,32      | 19,42     | 23,24     |
| 127,84      | 17,04     | 24,99     |
| 126,25      | 15,91     | 25,54     |
| 126,59      | 13,81     | 27,61     |
| 128,00      | 11,31     | 30,39     |

Ek Çizelge 6.29. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki hacimsel debiler (Sck; A, Soğ; A-K);  $P_{gir}=140$  kPa

| Qgir, m <sup>3</sup> /s | Qsck, m <sup>3</sup> /s | Qsgk, m <sup>3</sup> /s |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,0074                  | 0,0041                  | 0,0034                  |
| 0,0073                  | 0,0041                  | 0,0032                  |
| 0,0072                  | 0,0044                  | 0,0028                  |
| 0,0071                  | 0,0045                  | 0,0026                  |
| 0,0072                  | 0,0049                  | 0,0023                  |
| 0,0072                  | 0,0054                  | 0,0019                  |

Ek Çizelge 6.30. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki kütleli debiler,  $\xi$  ve  $1-\xi$  (Sck; A, Soğ; A-K);  $P_{gir}=140$  kPa

| mgir, kg/s | msck, kg/s | mşgk, kg/s | $\xi$ | $1-\xi$ |
|------------|------------|------------|-------|---------|
| 0,0089     | 0,0049     | 0,0040     | 0,45  | 0,55    |
| 0,0088     | 0,0049     | 0,0038     | 0,44  | 0,56    |
| 0,0087     | 0,0053     | 0,0034     | 0,39  | 0,61    |
| 0,0086     | 0,0054     | 0,0032     | 0,37  | 0,63    |
| 0,0086     | 0,0059     | 0,0027     | 0,32  | 0,68    |
| 0,0087     | 0,0064     | 0,0022     | 0,26  | 0,74    |

Ek Çizelge 6.31. Vorteks tüpe 160 kPa giriş basıncında, giriş sıcak ve soğuk akımın ısı çiftlerinden okunmuş sıcaklıkları, soğuk ve sıcak akımın cıvalı manometreden okunmuş olan hız değerleri (Sck; A, Soğ; A-K)

| Pgir, kPa | Tgir, °C | Tsck, °C | Tsoğ, °C | mmHg, (sck) | mmHg, (soğ) |
|-----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|
| 160       | 23       | 25       | 20       | 138         | 122         |
| 160       | 23       | 25       | 20       | 146         | 110         |
| 160       | 23       | 25       | 20       | 152         | 88          |
| 160       | 23       | 25       | 21       | 166         | 76          |
| 160       | 23       | 24       | 22       | 194         | 54          |
| 160       | 23       | 24       | 22       | 210         | 40          |
| 160       | 23       | 23       | 23       | 260         | 24          |

Ek Çizelge 6.32. Vorteks tüpe giriş, soğuk ve sıcak akımlarının termometre değerleri ve sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark (Sck; A, Soğ; A-K); Pgir=160 kPa

| Tgir, °C | Tsck, °C | Tsoğ, °C | ΔT, °C |
|----------|----------|----------|--------|
| 19,4     | 22,2     | 16,1     | 6,2    |
| 19,4     | 22,2     | 16,1     | 6,2    |
| 19,4     | 22,2     | 16,1     | 6,2    |
| 19,4     | 22,2     | 17,3     | 5,0    |
| 19,4     | 21,1     | 18,4     | 2,6    |
| 19,4     | 21,1     | 18,4     | 2,6    |
| 19,4     | 19,9     | 19,6     | 0,3    |

Ek Çizelge 6.33. Vorteks tüpe 160 kPa giriş basıncında nozul, sıcak ve soğuk akımın hızları (Sck; A, Soğ; A-K); Pgir=160 kPa

| Vnozul, m/s | Vsck, m/s | Vsoğ, m/s |
|-------------|-----------|-----------|
| 180,04      | 27,54     | 31,88     |
| 178,58      | 26,17     | 32,69     |
| 172,49      | 23,45     | 33,29     |
| 171,90      | 21,81     | 34,62     |
| 169,85      | 18,44     | 37,12     |
| 166,64      | 15,91     | 38,46     |
| 168,35      | 12,37     | 42,31     |

Ek Çizelge 6.34. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki hacimsel debiler (Sck;A, Soğ; A-K);  $P_{gir}=160$  kPa

| <b>Q<sub>gir</sub>, m<sup>3</sup>/s</b> | <b>Q<sub>sck</sub>, m<sup>3</sup>/s</b> | <b>Q<sub>sğk</sub>, m<sup>3</sup>/s</b> |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 0,0102                                  | 0,0056                                  | 0,0045                                  |
| 0,0101                                  | 0,0058                                  | 0,0043                                  |
| 0,0098                                  | 0,0059                                  | 0,0039                                  |
| 0,0097                                  | 0,0061                                  | 0,0036                                  |
| 0,0096                                  | 0,0066                                  | 0,0030                                  |
| 0,0094                                  | 0,0068                                  | 0,0026                                  |
| 0,0095                                  | 0,0075                                  | 0,0020                                  |

Ek Çizelge 6.35. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki kütleli debiler,  $\xi$  ve 1- $\xi$  (Sck; A, Soğ; A-K);  $P_{gir}=160$  kPa

| <b>m<sub>gir</sub>, kg/s</b> | <b>m<sub>sck</sub>, kg/s</b> | <b>m<sub>sğk</sub>, kg/s</b> | <b><math>\xi</math></b> | <b>1-<math>\xi</math></b> |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0,0122                       | 0,0068                       | 0,0055                       | 0,45                    | 0,55                      |
| 0,0121                       | 0,0069                       | 0,0052                       | 0,43                    | 0,57                      |
| 0,0117                       | 0,0071                       | 0,0046                       | 0,40                    | 0,60                      |
| 0,0117                       | 0,0073                       | 0,0043                       | 0,37                    | 0,63                      |
| 0,0115                       | 0,0079                       | 0,0037                       | 0,32                    | 0,68                      |
| 0,0113                       | 0,0082                       | 0,0032                       | 0,28                    | 0,72                      |
| 0,0114                       | 0,0090                       | 0,0025                       | 0,21                    | 0,79                      |

Ek Çizelge 6.36. Vorteks tüpe 180 kPa giriş basıncında, giriş sıcak ve soğuk akımın ısı çiftlerinden okunmuş sıcaklıkları, soğuk ve sıcak akımın cıvalı manometreden okunmuş olan hız değerleri (Sck; A, Soğ; A-K)

| <b>P<sub>gir</sub>, kPa</b> | <b>T<sub>gir</sub>, °C</b> | <b>T<sub>sck</sub>, °C</b> | <b>T<sub>sğk</sub>, °C</b> | <b>mmHg, (sck)</b> | <b>mmHg, (soğ)</b> |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
| 180                         | 23                         | 25                         | 20                         | 189                | 162                |
| 180                         | 23                         | 25                         | 20                         | 196                | 150                |
| 180                         | 23                         | 25                         | 20                         | 224                | 130                |
| 180                         | 23                         | 25                         | 20                         | 240                | 112                |
| 180                         | 23                         | 25                         | 21                         | 244                | 94                 |
| 180                         | 23                         | 24                         | 22                         | 268                | 68                 |
| 180                         | 23                         | 24                         | 23                         | 334                | 46                 |
| 180                         | 23                         | 23                         | 23                         | 396                | 30                 |
| 180                         | 23                         | 23                         | 23                         | 448                | 9                  |

Ek Çizelge 6.37. Vorteks tüpe giriş, soğuk ve sıcak akımlarının termometre değerleri ve sıcak akımın sıcaklığı ile soğuk akımın sıcaklığı arasındaki fark (Sck; A, Soğ; A-K);  $P_{gir}=180$  kPa

| T <sub>gir</sub> , °C | T <sub>sck</sub> , °C | T <sub>soğ</sub> , °C | $\Delta T$ , °C |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| 19,4                  | 22,2                  | 16,1                  | 6,1             |
| 19,4                  | 22,2                  | 16,1                  | 6,1             |
| 19,4                  | 22,2                  | 16,1                  | 6,1             |
| 19,4                  | 22,2                  | 16,1                  | 6,1             |
| 19,4                  | 22,2                  | 17,3                  | 4,9             |
| 19,4                  | 21,1                  | 18,5                  | 2,6             |
| 19,4                  | 21,1                  | 19,7                  | 1,4             |
| 19,4                  | 19,9                  | 19,7                  | 0,2             |
| 19,4                  | 19,9                  | 19,7                  | 0,2             |

Ek Çizelge 6.38. Vorteks tüpe 180 kPa giriş basıncında nozul, sıcak ve soğuk akımın hızları (Sck; A, Soğ; A-K)

| V <sub>nozul</sub> , m/s | V <sub>sck</sub> , m/s | V <sub>soğ</sub> , m/s |
|--------------------------|------------------------|------------------------|
| 207,11                   | 36,69                  | 31,66                  |
| 205,56                   | 37,29                  | 30,48                  |
| 206,67                   | 39,59                  | 28,41                  |
| 204,68                   | 40,83                  | 26,40                  |
| 199,25                   | 41,13                  | 24,22                  |
| 194,34                   | 42,89                  | 20,65                  |
| 197,64                   | 47,32                  | 17,04                  |
| 199,90                   | 51,07                  | 13,81                  |
| 190,92                   | 53,96                  | 7,63                   |

Ek Çizelge 6.39. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki hacimsel debiler (Sck; A, Soğ; A-K);  $P_{gir}=180$  kPa

| Q <sub>gir</sub> , m <sup>3</sup> /s | Q <sub>sck</sub> , m <sup>3</sup> /s | Q <sub>soğ</sub> , m <sup>3</sup> /s |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 0,0117                               | 0,0065                               | 0,0052                               |
| 0,0116                               | 0,0066                               | 0,0050                               |
| 0,0117                               | 0,0070                               | 0,0047                               |
| 0,0116                               | 0,0072                               | 0,0044                               |
| 0,0113                               | 0,0073                               | 0,0040                               |
| 0,0110                               | 0,0076                               | 0,0034                               |
| 0,0112                               | 0,0084                               | 0,0028                               |
| 0,0113                               | 0,0090                               | 0,0023                               |
| 0,0108                               | 0,0095                               | 0,0013                               |

Ek Çizelge 6.40. Vorteks tüpe giriş, sıcak ve soğuk çıkıştaki kütleli debiler,  $\xi$  ve  $1-\xi$  (Sck; A, Soğ; A-K);  $P_{gir}=180$  kPa

| mgir, kg/s | msck, kg/s | msğk, kg/s | $\xi$ | $1-\xi$ |
|------------|------------|------------|-------|---------|
| 0,0141     | 0,0078     | 0,0063     | 0,45  | 0,55    |
| 0,0139     | 0,0079     | 0,0060     | 0,43  | 0,57    |
| 0,0140     | 0,0084     | 0,0056     | 0,40  | 0,60    |
| 0,0139     | 0,0087     | 0,0052     | 0,38  | 0,62    |
| 0,0135     | 0,0087     | 0,0048     | 0,35  | 0,65    |
| 0,0132     | 0,0091     | 0,0041     | 0,31  | 0,69    |
| 0,0134     | 0,0100     | 0,0034     | 0,25  | 0,75    |
| 0,0136     | 0,0108     | 0,0027     | 0,20  | 0,80    |
| 0,0130     | 0,0114     | 0,0015     | 0,12  | 0,88    |

## EK-7. VORTEKS TÜPÜN PERFORMANSININ DENEYSEL ARAŞTIRILMASINA AİT ÖRNEK HESAPLAMA

Üzerinde çalışılmaya karar verilmiş olan L/D, nozul sayısı, hareketli vida çapı, hareketli vidanın konumu ve basınç aralığına bağlı olarak deneysel sistem hazırlanmıştır. Sistem ısı dengeye geldikten sonra istenen basınca getirilerek deneysel veriler alınmıştır. Deneysel veriler kullanılarak hesaplamalar yapılarak şekiller çizilmiştir. Yapılmış olan hesaplamalardan birisi burada sunulmuştur.

L/D=15, N=4, d=6 mm,  $P_{gir}=320$  kPa, sıcak çıkış tarafında ki cıvalı manometre de okunmuş olan değer 25 mm, soğuk çıkış tarafındaki cıvalı manometre ise 15 mm olarak okunmuştur. 1 no'lu ısı çiftten (girişteki) okunan değer 30 °C, 2 no'lu ısı çift (soğuk çıkış tarafındaki ısı çift)'ten okunan değer 9,1 °C ve 3 nolu ısı çift (sıcak çıkış tarafındaki ısı çift)'ten okunan değer ise 46,2 °C'tur.

Deneysel sistemdeki cıvalı manometrelerin kalibrasyonu rotametreler ile yapılmıştır. Sıcak çıkış tarafındaki cıvalı manometrenin kalibrasyon eşitliği Ek-Eş. 6.1 ile verilmiştir.

$$Q_{sck} = (3E^{-05} * (-\Delta P_{sck,okunan})^5 - 0,0033 * (-\Delta P_{sck,okunan})^4 + 0,1424 * (-\Delta P_{sck,okunan})^3 - 2,8526 * (-\Delta P_{sck,okunan})^2 + 28,913 * (-\Delta P_{sck,okunan}) - 15,413) \text{ l/dak} \quad [\text{Ek-6.1}]$$

Sıcak çıkış tarafındaki cıvalı manometredeki okunan değer Ek-Eş. 6.1 ile işlem yapılmış ve

$$Q_{sck} = 153,44 \text{ l/dak}$$

olarak hesaplanmıştır. Soğuk çıkış tarafındaki cıvalı manometrenin kalibrasyon eşitliği, Ek-Eş. 6.2

$$Q_{soğ} = 3E^{-05} * (-\Delta P_{soğ,okunan})^5 - 0,0037 * (-\Delta P_{soğ,okunan})^4 + 0,1463 * (-\Delta P_{soğ,okunan})^3 - 2,5769 * (-\Delta P_{soğ,okunan})^2 + 22,222 * (-\Delta P_{soğ,okunan}) + 6,8894 \text{ l/dak} \quad [\text{Ek-6.2}]$$

şeklindedir. Soğuk çıkış tarafındaki manometreden okunmuş olan değer, Ek- Eş. 6.2 ile işlem yapılarak  $Q_{soğ}$  bulunmuştur.

$$Q_{soğ} = 89,64 \text{ l/dak}$$

olarak bulunmuştur. 1 no'lu ısıtıcı çift kalibrasyonu Ek-Eş. 6.3'de verilmiştir.

$$T_{gir} = 0,9871 * T_{okunan} + 0,4228 \quad [\text{Ek-6.3}]$$

dir. 1 nolu ısıtıcı çiftten okunan değer kalibrasyon denklemi ile işlem yapılarak,

$$T_{gir} = 0,9871 * 30 + 0,4228 = 30,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

termometre sıcaklığı bulunmuştur. 2 no'lu ısıtıcı çiftte ait kalibrasyon eşitliği ise

$$T_{soğ} = 0,9985 * T_{okunan} + 0,096 \quad [\text{Ek-6.4}]$$

şeklindedir. Buna karşılık gelen 2 no'lu ısıtıcı çiftin termometre değeri ise,

$$T_{soğ} = 0,9985 * 9,1 + 0,096 = 9,18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

dir. 3 nolu ısıtıcı çiftin kalibrasyon eşitliği, Ek-Eş.6.5 ile verilmiştir. Buna karşılık gelen termometre değeri de

$$T_{sck} = 0,9973 * T_{okunan} + 0,1043 \quad [\text{Ek-6.5}]$$

$$T_{sck} = 0,9985 * 46,2 + 0,096 = 46,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

olarak bulunmuştur. 1, 2 ve 3 no'lu ısıtıcı çiftlerin termometre değerleri °C olarak hesaplanmış ve 273,15 ilave edilmiş ve K olarak sayısal değerleri bulunmuştur. Bunlar sırası ile 303,18 K; 282,33 K; 319,32 K'dir.

Sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki hacimsel debiler l/dak olarak hesaplanmıştır. l/dak olarak bulunan değerler ise Ek-Eş. 6.6 ile m<sup>3</sup>/s' ye çevrilmiştir.

$$Q = l/dak * 1/(60*1000), m^3/s \quad [Ek-6.6]$$

$$Q_{sck} = 153,44325 * 1/(60*1000) = 0,0025 m^3/s$$

$$Q_{soğ} = 89,64815 * 1/(60*1000) = 0,0014 m^3/s$$

Pa<sub>sck</sub> ve Pa<sub>soğ</sub> değerleri ise, Ek-Eş. 4.8 ve Ek-Eş. 4.9 ile bulunmuştur.

$$P_b = 0,907 \text{ Patm} = 690 \text{ mmHg (Ankara için)} \quad [Eş-6.7]$$

$$Pa_{sck} = P_b + (-\Delta P_{sck}), \text{ mmHg} \quad [Ek-6.8]$$

$$Pa_{soğ} = P_b + (-\Delta P_{soğ}), \text{ mmHg} \quad [Ek-6.9]$$

Sıcak çıkış tarafındaki Pa<sub>sck</sub>

$$Pa_{sck} = 690 + 25 = 715 \text{ mmHg}$$

ve soğuk çıkış tarafındaki Pa<sub>soğ</sub>

$$Pa_{soğ} = 690 + 15 = 705 \text{ mmHg}$$

olarak hesaplanmıştır. K<sub>sior</sub>=P<sub>b</sub>/P<sub>a</sub>'dır ve Ek-Eş. 6.10'da ki gibi yazılır.

$$K_{sior}=P_b/P_a \quad [Ek-6.10]$$

Sıcak çıkış tarafındaki  $K_{sior}$

$$K_{sior}= P_b/P_a=690/715= 0,96$$

ve soğuk çıkış tarafındaki  $K_{sior}$

$$K_{sior}= P_b/P_a=690/705= 0,97$$

şeklinde hesaplanmıştır. Sıcak ve soğuk çıkış tarafındaki yoğunluğu veren eşitlikler sırası ile Ek-Eş. 6.11 ve Ek-Eş. 6.12 ile verilmiştir.

$$\rho_{asck,} = ((P_a/ 760) * 29) / ((0,08260) * (T_{sck,} K)) \quad [Ek-6.11]$$

$$\rho_{asoğ} = ((P_a/ 760) * 29) / ((0,08260) * (T_{soğ,} K)) \quad [Ek-6.12]$$

Sıcak çıkış tarafındaki yoğunluk,

$$\rho_{asck}=1,03 \text{ kg/m}^3$$

ve soğuk çıkış tarafında ki yoğunluk ise

$$\rho_{asoğ}=1,15 \text{ kg/m}^3$$

olarak hesaplanmıştır. Kütleli debi, yoğunluk ile hacimsel debinin çarpımına eşittir. Sıcak ve soğuk akışkanın kütle debileri Ek-Eş. 6.13 ve Ek-Eş. 6.14 ile bulunmuştur.

$$m_{sck}=\rho_{asck} * Q_{sck,} \text{ kg/s} \quad [Ek-6.13]$$

$$m_{sck}=1,034 * 0,0025= 0,0026 \text{ kg/s}$$

$$m_{soğ} = \rho_{asoğ} * Q_{soğ}, \text{ kg/s} \quad [\text{Ek-6.14}]$$

$$m_{soğ} = 1,153 * 0,0014 = 0,0017 \text{ kg/s}$$

Vorteks tüpe girişteki akışkanın kütleli debisi, sıcak çıkış tarafındaki kütleli debi ile soğuk çıkış tarafındaki akışın kütleli debilerin toplamından bulunmuştur (Ek-Eş. 6.15).

$$m_{gir} = m_{sck} + m_{soğ}, \text{ kg/s} \quad [\text{Ek-6.15}]$$

$$m_{gir} = 0,0026 + 0,0017 = 0,0043 \text{ kg/s}$$

$\xi$ , soğuk akışın kütleli debisinin girişteki akışın kütleli debisine oranı ve  $1-\xi$  ise sıcak akışın kütleli debisinin girişteki akışın kütleli debisine oranıdır (Eş. 3.19).

$$\xi = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \text{ ve } (1-\xi) = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} \quad [3.19]$$

$$\xi = 0,0017 / 0,0043 = 0,39$$

$$1-\xi = 0,0026 / 0,0043 = 0,61$$

Sıcak akışın sıcaklığı ( $T_{sck}$ ) ile girişteki akışkanın sıcaklığı ( $T_{gir}$ ) arasındaki fark Ek-Eş.6.17'den bulunmuştur.

$$\Delta T_{sck} = T_{sck} - T_{gir} \quad [\text{Ek-6.17}]$$

$$\Delta T_{sck} = 319,32 - 282,33 = 16,14 \text{ K}$$

Soğuk akışın sıcaklığı ( $T_{soğ}$ ) ile girişteki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark ise Ek-Eş. 6.18 şeklinde yazılmış ve

$$\Delta T_{\text{soğ}} = T_{\text{soğ}} - T_{\text{gir}} \quad [\text{Ek-6.18}]$$

$$\Delta T_{\text{soğ}} = 282,33 - 303,18 = -20,85 \text{ K}$$

olarak hesaplanmıştır. Sıcak akışın sıcaklığı ve soğuk akışın sıcaklığı arasındaki fark, sistemin performansını belirlemede kullanılmış olan  $\Delta T$ , Ek-Eş. 6.19 ile hesaplanmıştır. Buradaki hesaplamalar yapılırken (34) no'lu kaynaktan yararlanılmıştır.

$$\Delta T = T_{\text{sck}} - T_{\text{soğ}} \quad [\text{Ek-6.19}]$$

$$\Delta T = 319,32 - 282,33 = 36,99 \cong 40 \text{ K}$$

## ÖZGEÇMİŞ

Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümünde, Araştırma Görevlisi olarak görev yapmakta iken, 35. madde kapsamında, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalına, kadrosu ile birlikte 1999 yılında atanmıştır. Lisansı, Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümünde, 1. Yüksek Lisansı, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde, 2. Yüksek Lisansı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde tamamlamıştır. Ayrıca Açık Öğretim Fakültesi, Halkla İlişkiler bölümünü bitirmiştir. Pascal, Fortran, C++, donanım ve web sayfası tasarımı olmak üzere 5 ayrı bilgisayar kursundan sertifikası bulunmaktadır. Yabancı dil olarak, İngilizce ve Fransızca eğitim almıştır.