

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI BOYUTLARDA TERMoeLEKTRİK  
JENERATÖRLER KULLANILARAK EGZOZ ISI  
ENERJİSİNİN GERİ KAZANIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ALİ GÜRCAN**

**DENİZLİ, EKİM - 2019**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**FARKLI BOYUTLARDA TERMoeLEKTRİK  
JENERATÖRLER KULLANILARAK EGZOZ ISI  
ENERJİSİNİN GERİ KAZANIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ALİ GÜRCAN**

**DENİZLİ, EKİM - 2019**

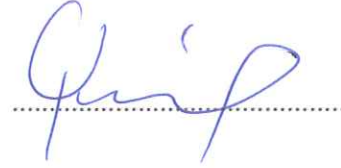
## KABUL VE ONAY SAYFASI

Ali GÜRCAN tarafından hazırlanan “FARKLI BOYUTLARDA TERMOELEKTRİK JENERATÖRLER KULLANILARAK EGZOZ ISI ENERJİSİNİN GERİ KAZANIMI” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 25.10.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Doç. Dr. Gülay YAKAR  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Doç. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Doç. Dr. Hakan ÇALIŞKAN  
Uşak Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
06/11/2019 tarih ve ...44/07... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL  
ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ tarafından  
2018FEBE035 numaralı proje olarak desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

  
**Ali GÜRCAN**

## ÖZET

### FARKLI BOYUTLARDA TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLER KULLANILARAK EGZOZ ISI ENERJİSİNİN GERİ KAZANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ GÜRCAN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. GÜLAY YAKAR)

DENİZLİ, EKİM- 2019

Bu çalışmada, turbo şarj sistemlerindeki kompresör ile ara soğutucu arasına termoelektrik jeneratör sistemi yerleştirilmiştir. Böylece, ara soğutucularda dışarıya atılacak olan ısı enerjisinden faydalanılarak güç elde edilmesi hedeflenmiştir. Termoelektrik jeneratör sisteminin, farklı dış çevre sıcaklıkları ve farklı boyuttaki modüller için numerik analizleri gerçekleştirilerek, en uygun sistem tasarlanmıştır. Çalışmada, hem korelasyon olarak hesaplamalar yapılmış hem de Ansys Fluent ve Thermal-Electric programları kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Thermal-Electric programında, Korelasyon ve Fluent analiz sonuçlarındaki çıkış parametreleri ve sıcaklık sınır koşulları kullanılarak, simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ticari TEJ modülü ile farklı boyuttaki TEJ modüllerinin, Thermal-Electric analiz sonuçları karşılaştırıldığında, TGM-199-1.6-2.0 için elde edilen elektriksel güç değerlerinin, TGM-199-1.4-2.0 (Ticari Modül) ve TGM-199-1.5-2.0 modüllerine göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir. En büyük akım değerlerinin de yine bu TEJ modülünde olduğu belirlenmiştir. Boyutsuz elektrik direncinin 1.25 ve dış ortam sıcaklığının da 268 K olduğu durumda, 28 adet TGM-199-1.6-2.0 modülünden oluşan TEJ sisteminden elde edilen toplam güç değeri 70.95 W ve akım değeri ise 22.71 A olmuştur. Dış ortam sıcaklığı 303 K ve boyutsuz elektriksel direnç 1.25 olduğunda ise aynı sistemde elde edilen güç ve akım değeri sırasıyla 40.9 W ve 17.25 A olarak tespit edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Termoelektrik Jeneratör, Elektriksel güç, Turbo Şarj

## **ABSTRACT**

### **RECOVERY OF EXHAUST HEAT ENERGY USING THERMOELECTRIC GENERATORS IN DIFFERENT SIZES**

**MSC THESIS**

**ALİ GÜRCAN**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:ASSİST. PROF. DR. GÜLAY YAKAR)**

**DENİZLİ, OCTOBER 2019**

In this study, thermoelectric generator system is placed between compressor and intercooler in turbo charging systems. Thus, it is aimed to obtain power by utilizing the heat energy to be exhausted in the intercoolers. Numerical analysis of thermoelectric generator system for different external ambient temperatures and modules of different sizes has been performed and the optimal system has been designed. In the study, both the correlation calculations were calculated and the simulations of Ansys Fluent and Thermal-Electric programs were performed. In the Thermal-Electric program, were performed simulations using output parameters and temperature boundary conditions in Correlation and Fluent analysis results. Comparing the results of Thermal-Electric analysis of TEG modules of different sizes with the commercial TEG module, the electrical power values obtained for TGM-199-1.6-2.0 were found to be greater than those of TGM-199-1.4-2.0 (Commercial Module) and TGM-199-1.5-2.0. It is determined that the maximum current values are also in this TEG module. When the dimensionless electrical resistance is 1.25 and the external ambient temperature is 268 K, the total power value obtained from the TEG system consisting of 28 TGM-199-1.6-2.0 modules was 70.95 W and the current value was 22.71 A. When the external ambient temperature is 303 K and dimensionless electrical resistance is 1.25, the power and current values obtained in the same system are 40.9 W and 17.25 A respectively.

**KEYWORDS:** Thermoelectric Generator, Electrical Power, Turbo Charger

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖZET.....                                                                                   | i   |
| ABSTRACT .....                                                                              | ii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                           | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                                         | vi  |
| TABLO LİSTESİ .....                                                                         | ix  |
| SEMBOL LİSTESİ .....                                                                        | x   |
| ÖNSÖZ.....                                                                                  | xii |
| 1. GİRİŞ.....                                                                               | 1   |
| 1.1 Tezin Amacı .....                                                                       | 1   |
| 1.2 Termoelektrik Modülün Tarihçesi.....                                                    | 2   |
| 1.3 Literatür Özeti .....                                                                   | 3   |
| 2. TERMoeLEKTRİK.....                                                                       | 7   |
| 2.1 Termoelektrik Modül .....                                                               | 7   |
| 2.2 Termoelektrik Etkiler .....                                                             | 8   |
| 2.2.1 Seebeck Etkisi.....                                                                   | 8   |
| 2.2.2 Peltier Etkisi.....                                                                   | 8   |
| 2.2.3 Thomson Etkisi .....                                                                  | 9   |
| 2.2.3.1 Thomson İlişkileri .....                                                            | 10  |
| 3. TURBO ŞARJ SİSTEMLERİ.....                                                               | 11  |
| 3.1 Dizel Motorlarda Aşırı Doldurma .....                                                   | 11  |
| 3.2 Turbo Şarj Sisteminin Amacı .....                                                       | 13  |
| 3.3 Turbo Şarj Sisteminin Çalışma Prensibi.....                                             | 14  |
| 3.4 Turbo Şarjın Yapısı .....                                                               | 16  |
| 4. TERMoeLEKTRİK JENERATÖR TASARIMI .....                                                   | 17  |
| 4.1 Düz Levha Tipi Kanat .....                                                              | 17  |
| 4.1.1 Modülün Sıcak Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Optimum Kanat Kalınlığı.....      | 18  |
| 4.1.2 Modülün Soğuk Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Optimum Kanat Kalınlığı.....      | 19  |
| 4.2 Düz Levha Tipi Kanatların Isı Taşınım Katsayıları .....                                 | 20  |
| 4.2.1 Havanın İdeal Gaz Kabulü.....                                                         | 21  |
| 4.2.2 Isı Taşınım Denklemleri .....                                                         | 21  |
| 4.2.3 Modülün Sıcak Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Isı Taşınım Katsayısı .....       | 22  |
| 4.2.4 TEJ Modülünün Soğuk Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Isı Taşınım Katsayısı ..... | 23  |
| 4.3 Termoelektrik Jeneratör Modülünün Modellenmesi .....                                    | 24  |
| 4.4 Bir TEJ Modülünün Performans Parametreleri .....                                        | 25  |
| 4.5 Bir Termoelektrik Jeneratör Modülü İçin Maksimum Parametreler ..                        | 26  |
| 4.6 Etkin Malzeme Özellikleri .....                                                         | 27  |
| 4.6.1 Seçilen TEJ Modülünün Etkin Malzeme Özellikleri.....                                  | 29  |
| 4.7 Termoelektrik Jeneratörler için En Uygun Tasarım.....                                   | 30  |
| 4.7.1 Termoelektrik Jeneratörler için En Uygun Tasarımın Bulunması                          | 33  |
| 4.8 Normalleştirilmiş Parametreler .....                                                    | 35  |
| 4.8.1 Normalleştirilmiş Parametrelerin Hesaplanması .....                                   | 36  |

|           |                                                                                                                                                                          |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.9       | Basınç Kayıpları .....                                                                                                                                                   | 37        |
| 4.9.1     | Düz Levha Tipi Kanatlardaki Basınç Kaybı .....                                                                                                                           | 37        |
| 4.9.2     | Düz Levha Tipi Kanatların Basınç Kaybı Hesaplanması .....                                                                                                                | 37        |
| 4.9.3     | Daralma ve Genişlemedeki Basınç Kayıpları .....                                                                                                                          | 38        |
| 4.9.4     | Daralma ve Genişlemedeki Basınç Kaybı Hesaplamaları .....                                                                                                                | 38        |
| 4.9.5     | Dairesel Borudaki Basınç Kayıpları .....                                                                                                                                 | 39        |
| 4.9.6     | Dairesel Borudaki Basınç Kayıplarının Hesaplanması .....                                                                                                                 | 39        |
| 4.9.7     | Toplam Basınç Kaybı .....                                                                                                                                                | 40        |
| <b>5.</b> | <b>HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) .....</b>                                                                                                                       | <b>41</b> |
| 5.1       | HAD (FLUENT) Teorisi .....                                                                                                                                               | 41        |
| 5.1.1     | Navier-Stokes ve Süreklilik Denklemleri .....                                                                                                                            | 41        |
| 5.1.2     | Türbülans Modeli .....                                                                                                                                                   | 41        |
| 5.2       | CAD Modelinin Oluşturulması .....                                                                                                                                        | 43        |
| 5.2.1     | Design Modeler .....                                                                                                                                                     | 45        |
| 5.2.2     | Mesh Optimizasyonu .....                                                                                                                                                 | 45        |
| 5.2.3     | Sınır Koşulları .....                                                                                                                                                    | 46        |
| 5.2.4     | Malzeme Seçimi .....                                                                                                                                                     | 47        |
| 5.2.5     | Çözüm Özellikleri .....                                                                                                                                                  | 48        |
| 5.2.6     | Giriş ve Çıkış Parametrelerinin Ayarlanması .....                                                                                                                        | 48        |
| 5.2.7     | Hybrid Başlatma .....                                                                                                                                                    | 49        |
| 5.3       | Tez Çalışmasının Nümerik Çözümlemesinin Doğrulanması .....                                                                                                               | 51        |
| 5.4       | ANSYS - FLUENT Analiz Sonuçları .....                                                                                                                                    | 52        |
| 5.5       | TGM-199-1.4-2.0, TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0<br>Termoelektrik Jeneratör Modüllerinin Ansys Fluent Analiz Çıkış Parametreleri<br>55                                |           |
| <b>6.</b> | <b>TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERİN SONLU ELEMANLAR<br/>METODU İLE ANALİZİ .....</b>                                                                                         | <b>58</b> |
| 6.1       | Termal-Elektrik Sonlu Elemanlar Metodu Teorisi .....                                                                                                                     | 58        |
| 6.2       | Malzeme Tanımlama .....                                                                                                                                                  | 60        |
| 6.3       | Mesh ve Sınır Koşulları .....                                                                                                                                            | 60        |
| 6.4       | Termal-Elektrik Simülasyonu .....                                                                                                                                        | 62        |
| 6.5       | En Uygun Tasarımda Kullanılan Ticari TEJ'in Termal-Elektrik<br>Simülasyonu .....                                                                                         | 63        |
| 6.6       | Ansys Fluent Çıkış Parametre Sonuçlarına Göre Thermal-Electric<br>Simülasyonu .....                                                                                      | 68        |
| 6.6.1     | Ticari Termoelektrik Jeneratör Modülü TGM-199-1.4-2.0'nin Ansys<br>Fluent Çıktı Değerleri ile Thermal-Electric Simülasyonu .....                                         | 68        |
| 6.6.2     | Farklı Boyutlardaki Termoelektrik Jeneratör Modülleri TGM-199-<br>1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0'nin Ansys Fluent Çıktı Değerleri ile Thermal-<br>Electric Simülasyonu ..... | 72        |
| <b>7.</b> | <b>BULGULAR .....</b>                                                                                                                                                    | <b>79</b> |
| 7.1       | Ticari Termoelektrik Jeneratör Modülü TGM-199-1.4-2.0'nin<br>Performans Eğrileri .....                                                                                   | 79        |
| 7.2       | Ticari Termoelektrik Jeneratör Modülü TGM-199-1.4-2.0'nin<br>Normalleştirilmiş Parametre Eğrileri .....                                                                  | 82        |
| 7.3       | TGM-199-1.4-2.0 Ticari TEJ Modülünün En Uygun Tasarım ve Termal-<br>Elektrik Simülasyon Değerleri .....                                                                  | 85        |
| 7.4       | Ansys Fluent Çıktı Parametrelerine Göre Termoelektrik Jeneratör<br>Modüllerinin Termal-Elektrik Simülasyon Sonuçları .....                                               | 88        |
| <b>8.</b> | <b>SONUÇ .....</b>                                                                                                                                                       | <b>94</b> |

|                                                                                                        |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>9. KAYNAKLAR.....</b>                                                                               | <b>96</b>  |
| <b>10. EKLER.....</b>                                                                                  | <b>100</b> |
| EK A Modülün Sıcak Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Optimum Kalınlığının Matlab Program Kodu..... | 100        |
| EK B Modülün Soğuk Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Optimum Kalınlığının Matlab Program Kodu..... | 102        |
| EK C Tablo A-1 .....                                                                                   | 104        |
| EK D Tablo A-15 .....                                                                                  | 105        |
| EK E Termoelektrik Jeneratör Modülünün En Uygun Tasarımının Matlab Program Kodu .....                  | 106        |
| EK F Termoelektrik Jeneratör Modülünün En Uygun Tasarımının Tablo Okuma Matlab Program Kodu .....      | 108        |
| EK G Thermal-Electric Giriş Komut Dosyasındaki Mekanik APDL Kodlamaları .....                          | 110        |
| EK H Thermal-Electric Çözüm Komut Dosyasındaki Mekanik APDL Kodlamaları .....                          | 111        |
| <b>11. ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                               | <b>112</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1: Termoelektrik Modül Yapı ve Elemanları.....                                                                                                                       | 7  |
| Şekil 2.2: Seebeck Etkisi (Lee 2017). ....                                                                                                                                   | 8  |
| Şekil 2.3: Peltier etkisi ve Thomson etkisi (Lee 2017). ....                                                                                                                 | 9  |
| Şekil 3. 1: Turbo şarjın kesit görünüşü (Özcan 2009). ....                                                                                                                   | 14 |
| Şekil 3.2: Turbo şarjda havanın akış şeması (Özcan 2009). ....                                                                                                               | 15 |
| Şekil 3.3: Turbo şarjın kısımları 1-Türbin; 2-Kompresör; 3-Türbin mili; 4-Yataklar (Gülyaşar 2008). ....                                                                     | 16 |
| Şekil 4.1: TEJ modülünün sıcak yüzeyindeki düz levha tipi kanatların optimum kanat kalınlığı. ....                                                                           | 19 |
| Şekil 4.2: TEJ modülünün soğuk yüzeyindeki düz levha tipi kanatların optimum kanat kalınlığı. ....                                                                           | 20 |
| Şekil 4.3: Düz levha tipi kanatların boyutları. ....                                                                                                                         | 22 |
| Şekil 4.4: (a) İki kanatçıklı yapıya sahip termoelektrik jeneratör modülü (TEJ) ve (b) ısı çifti (Lee 2017). ....                                                            | 30 |
| Şekil 5.1: (a) CAD Modelin Montajı (b) CAD Modelin Montaj Kesiti .....                                                                                                       | 44 |
| Şekil 5.2: CAD modelinin basit gösterimi. ....                                                                                                                               | 44 |
| Şekil 5.3: CAD Modelin oluşturulan meshi. ....                                                                                                                               | 46 |
| Şekil 5.4: $L=L_{TEJ}=180\text{mm}$ ve $h_e=1800\text{W/m}^2\text{K}$ olan sistemde x-y ve y-z eksenlerindeki kesit alanlarının sıcaklık dağılımı (Weng ve Huang 2013). .... | 51 |
| Şekil 5.5: $L=L_{TEJ}=180\text{mm}$ ve $h_e=1800\text{W/m}^2\text{K}$ ve olan sistemde y-z kesit alanındaki sıcaklık dağılımı. ....                                          | 52 |
| Şekil 5.6: $L=L_{TEJ}=180\text{mm}$ ve $h_e=1800\text{W/m}^2\text{K}$ olan sistemde x-y kesit alanındaki sıcaklık dağılımı. ....                                             | 52 |
| Şekil 5.7: Tüm sistemdeki gövdelerin x-y eksenindeki kesit alanına göre oluşan sıcaklık dağılımı. ....                                                                       | 53 |
| Şekil 5.8: y-z kesit alanına göre kompresör havasının düz levha tipli kanatlardan geçerken oluşan sıcaklık dağılımı. ....                                                    | 54 |
| Şekil 5.9: x-y kesit alanına göre kompresör havasının düz levha tipli kanatlardan geçerken oluşan sıcaklık dağılımı. ....                                                    | 54 |
| Şekil 6.1: Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 için oluşturulan mesh. ....                                                                                                     | 61 |
| Şekil 6.2: (a) Skewness (b) Orthogonal Kalite .....                                                                                                                          | 61 |
| Şekil 6.3: Oluşturulan mesh'in düğüm ve element sayıları. ....                                                                                                               | 61 |
| Şekil 6.4: Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin sıcaklık dağılımı. ....                                                                                                     | 62 |
| Şekil 6.5: Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin elektrik gerilim dağılımı. ....                                                                                             | 63 |
| Şekil 6.6: 268 K dış ortam sıcaklığında ve $R_f=1.261$ boyutsuz elektrik direncinde hesaplanan sıcaklık değerlerinin Termal-Elektrik programında uygulanması. ....           | 64 |
| Şekil 6.7: 268 K dış ortam sıcaklığında ve $R_f=1.261$ boyutsuz elektrik direncinde meydana gelen ticari TEJ modülünün sıcaklık dağılımı. ....                               | 65 |
| Şekil 6.8: 268 K dış ortam sıcaklığı ve $R_f=1.261$ boyutsuz elektrik direncinde meydana gelen ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin gerilim dağılımı. ....                  | 65 |

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.9: 268 K dış ortam sıcaklığı ve $R_t=1.261$ boyutsuz elektrik direncinde meydana gelen ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin akım yoğunluğu dağılımı. .... | 66 |
| Şekil 6.10: (a) Voltaj Probu (b) Akım Yoğunluğu Probu .....                                                                                                        | 66 |
| Şekil 6.11: Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin 268 K dış ortam sıcaklığındaki farklı elektriksel dirençlerdeki tasarım noktaları. ....                          | 69 |
| Şekil 6.12: TGM-199-1.4-2.0'nin güç çıktısının farklı boyutsuz dirençlere göre değişimi ( $T_{\infty} = 268$ K için). ....                                         | 70 |
| Şekil 6.13: TGM-199-1.4-2.0'nin ısı veriminin farklı boyutsuz dirençlere göre değişimi ( $T_{\infty} = 268$ K için) .....                                          | 70 |
| Şekil 6.14: TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, ve 1.5 değerlerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre tasarım noktaları. ....      | 71 |
| Şekil 6.15: Farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.5-2.0'nin oluşturulan mesh yapısı. ....                                                                          | 73 |
| Şekil 6.16: Farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'nin oluşturulan mesh yapısı. ....                                                                          | 73 |
| Şekil 6.17: TGM-199-1.5-2.0 için (a) Skewness Kalite (b)Orthogonal Kalite                                                                                          | 74 |
| Şekil 6.18: TGM-199-1.6-2.0 için (a) Skewness Kalite (b)Orthogonal Kalite                                                                                          | 74 |
| Şekil 6.19: Farklı Boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.5-2.0'nin element ve düğüm sayısı. ....                                                                          | 74 |
| Şekil 6.20: Farklı Boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'nin element ve düğüm sayısı. ....                                                                          | 74 |
| Şekil 6.21: TGM-199-1.5-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre tasarım noktaları. ....            | 75 |
| Şekil 6.22: TGM-199-1.6-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerlerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre tasarım noktaları.              | 77 |
| Şekil 7.1: Farklı dış ortam sıcaklıklara göre TGM-199-1.4-2.0'nin nümerik olarak elde edilen güç çıktıları. ....                                                   | 79 |
| Şekil 7.2: Farklı dış ortam sıcaklıkları ile TGM-199-1.4-2.0 modülünün ısı verimlerinin değişimi. ....                                                             | 80 |
| Şekil 7.3: TGM-199-1.4-2.0'nin akım değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi. ....                                                                  | 81 |
| Şekil 7.4: Farklı dış ortam sıcaklıklara göre TGM-199-1.4-2.0'nin voltaj değerlerinin değişimi. ....                                                               | 81 |
| Şekil 7.5: TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncine göre normalize edilmiş güç çıkışının değişimi. ....                                                    | 82 |
| Şekil 7.6: TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncine göre normalize edilmiş akımın değişimi. ....                                                           | 83 |
| Şekil 7.7: TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncine göre normalize edilmiş voltajın değişimi. ....                                                         | 84 |
| Şekil 7.8: TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncine göre normalize edilmiş ısı veriminin değişimi. ....                                                    | 84 |
| Şekil 7.9: Matlab ve Termal-Elektrik simülasyon ile elde edilen akım değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi (TGM-199-1.4-2.0 için). ....          | 85 |
| Şekil 7.10: Matlab ve Termal-Elektrik simülasyon ile elde edilen voltaj değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi (TGM-199-1.4-2.0 için). ....       | 86 |

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 7.11: Matlab ve Termal-Elektrik simülasyon ile elde edilen güç çıkışı değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi (TGM-199-1.4-2.0 için).....           | 87 |
| Şekil 7.12: Matlab ve Termal-Elektrik simülasyon ile elde edilen ısı verim değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi (TGM-199-1.4-2.0 için).....            | 87 |
| Şekil 7.13: Farklı dış ortam sıcaklıklar ve farklı boyutsuz elektrik dirençler için, üç farklı boyuttaki modülün, akım yönünden karşılaştırılmaları. ..                   | 90 |
| Şekil 7.14:Farklı dış ortam sıcaklıklar ve farklı boyutsuz elektrik dirençler için, üç farklı boyuttaki modülün, elektriksel güç çıkışı yönünden karşılaştırılmaları..... | 92 |
| Şekil 8.1: 28 adet farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'den oluşan TEJ sistemi.....                                                                                | 95 |



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 4.1: Dış ortam sıcaklığına ( $T_{\infty 2}$ ) bağlı olarak çıkan optimum değerler...                                                                                    | 20 |
| Tablo 4.2: Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin, $T_{\infty 2}$ 'ye bağlı olarak çıkan optimum boyutsuz değerleri.....                                                       | 34 |
| Tablo 4.3: TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin, $T_{\infty 2}$ 'ye bağlı olarak çıkan optimum ticari değerleri. ....                                                               | 35 |
| Tablo 4.4: $T_{\infty 2}$ 'ye bağlı olarak elde edilen normalleştirilmiş değerler.....                                                                                        | 36 |
| Tablo 5.1: Mesh optimizasyonu.....                                                                                                                                            | 46 |
| Tablo 5.2: Giriş ve çıkış sınır koşulları.....                                                                                                                                | 46 |
| Tablo 5.3: Dış ortam sıcaklığına göre hesaplanan, zorlanmış taşınım ile olan ısı taşınım katsayısı değerleri.....                                                             | 47 |
| Tablo 5.4: Kullanılan malzemelerin özellikleri.....                                                                                                                           | 47 |
| Tablo 5.5: Kompresör ve fanın hava özellikleri.....                                                                                                                           | 48 |
| Tablo 5.6: TEJ modülünde oluşan sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.....                                                                                                  | 52 |
| Tablo 5.7: Ticari TGM-199-1.4-2.0 için FLUENT programının giriş parametreleri ile oluşan çıkış parametreleri.....                                                             | 55 |
| Tablo 5.8: TGM-199-1.5-2.0 için Ansys Fluent programının giriş parametreleri ile oluşan çıkış parametreleri.....                                                              | 56 |
| Tablo 5.9: TGM-199-1.6-2.0 için Ansys Fluent programının giriş parametreleri ile oluşan çıkış parametreleri.....                                                              | 56 |
| Tablo 6.1: Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin, $R_L=R$ ve dış ortam sıcaklığı $22^{\circ}\text{C}$ için maksimum sınır şartları ve çıktı değerleri (Kryotherm 2018). ....  | 58 |
| Tablo 6.2: Malzeme tanımlamaları.....                                                                                                                                         | 60 |
| Tablo 6.3: Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin katalog ve Termal-Elektrik değerleri.....                                                                                    | 63 |
| Tablo 6.4: Matlab ile hesaplanan değerler ile Termal-Elektrik Simülasyon değerleri.....                                                                                       | 67 |
| Tablo 6.5: Tablo 6.4'deki değerlerin bağıl hata oranları.....                                                                                                                 | 67 |
| Tablo 6.6: $T_{\infty 2} = 268\text{ K}$ için farklı $R_r$ değerlerine göre TGM-199-1.4-2.0'nin Termal-Elektrik simülasyonu sonucu oluşan çıktı parametreleri...              | 69 |
| Tablo 6.7: TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerlerinde, farklı dış ortam sıcaklıklarına göre elde edilen çıkış parametre değerleri..... | 72 |
| Tablo 6.8: TGM-199-1.5-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerlerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre çıkış parametreleri.....                    | 76 |
| Tablo 6.9: TGM-199-1.6-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerlerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre çıkış parametreleri.....                    | 78 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                                  |   |                                                         |
|----------------------------------|---|---------------------------------------------------------|
| <b>Z</b>                         | : | Değerlik katsayısı [1/K] ( $Z = \alpha^2 / \rho k$ )    |
| <b>V</b>                         | : | Voltaj [V]                                              |
| <b><math>\alpha</math></b>       | : | Seebeck katsayısı [V/K]                                 |
| <b><math>\Delta T</math></b>     | : | Sıcaklık farkı [K]                                      |
| <b><math>T_h</math></b>          | : | TEJ modülünün sıcak yüzey sıcaklığı [K]                 |
| <b><math>T_c</math></b>          | : | TEJ modülünün soğuk yüzey sıcaklığı [K]                 |
| <b><math>\dot{Q}</math></b>      | : | Birim zamandaki ısı miktarı [W]                         |
| <b><math>\pi</math></b>          | : | Peltier katsayısı [J/C]                                 |
| <b>I</b>                         | : | Akım [A]                                                |
| <b><math>\tau</math></b>         | : | Thomson katsayısı [V/K]                                 |
| <b>R</b>                         | : | Elektrik direnci [ $\Omega$ ]                           |
| <b><math>\epsilon_k</math></b>   | : | Kompresörün aşırı doldurması                            |
| <b><math>\dot{m}</math></b>      | : | kütleli debi [kg/s]                                     |
| <b><math>T_{\infty 1}</math></b> | : | Isının alındığı ortamın sıcaklığı [K]                   |
| <b><math>T_{\infty 2}</math></b> | : | Isının atıldığı dış ortam sıcaklığı [K]                 |
| <b>P</b>                         | : | Basınç [Pa]                                             |
| <b><math>W_{kanat}</math></b>    | : | Kanat genişliği [m]                                     |
| <b><math>n_f</math></b>          | : | Kanat sayısı                                            |
| <b>t</b>                         | : | Kanat kalınlığı [m]                                     |
| <b>z</b>                         | : | Kanat aralığı [m]                                       |
| <b>b</b>                         | : | Kanat boyu [m]                                          |
| <b>h</b>                         | : | Isı taşınım katsayısı [ $W/m^2K$ ]                      |
| <b>k</b>                         | : | Isı iletim katsayısı [ $W/mK$ ]                         |
| <b>L</b>                         | : | Kanat uzunluğu [m]                                      |
| <b><math>A_f</math></b>          | : | Kanatın ısı transfer alanı [ $m^2$ ]                    |
| <b><math>A_t</math></b>          | : | Kanatlı yüzeyin toplam ısı transfer alanı [ $m^2$ ]     |
| <b><math>\eta_f</math></b>       | : | Tek kanat verimi [%]                                    |
| <b><math>\eta_0</math></b>       | : | Tüm kanatlı yüzeylerin verimi [%]                       |
| <b><math>\eta_1</math></b>       | : | TEJ sıcak yüzeyindeki tüm kanatlı yüzeylerin verimi [%] |
| <b><math>\eta_2</math></b>       | : | TEJ soğuk yüzeyindeki tüm kanatlı yüzeylerin verimi [%] |
| <b><math>\theta</math></b>       | : | Sıcaklık farkı [K]                                      |
| <b><math>q_{tot}</math></b>      | : | Kanatlı yüzeylerden toplam ısı transferi [Watt]         |
| <b>z</b>                         | : | Sıkıştırılabilirlik çarpanı                             |
| <b><math>R_{gaz}</math></b>      | : | Evrensel gaz sabiti [J/molK]                            |
| <b><math>\nu</math></b>          | : | Kinematik viskozite [ $m^2/s$ ]                         |
| <b>U</b>                         | : | Hız [m/s]                                               |
| <b>Re</b>                        | : | Reynolds Sayısı                                         |
| <b>Pr</b>                        | : | Prandtl Sayısı                                          |
| <b>d</b>                         | : | Yoğunluk [ $kg/m^3$ ]                                   |
| <b><math>T_f</math></b>          | : | Film sıcaklığı [K]                                      |
| <b><math>A_c</math></b>          | : | Çapraz akış alanı [ $m^2$ ]                             |
| <b><math>\rho</math></b>         | : | Öz direnç [ $\Omega m$ ]                                |
| <b>K</b>                         | : | Isıl iletkenlik [W/K]                                   |
| <b>n</b>                         | : | Bir modüldeki p-n çiftlerinin sayısı                    |
| <b><math>R_L</math></b>          | : | Dış yük direnci [ $\Omega$ ]                            |
| <b><math>\dot{W}</math></b>      | : | Güç [W]                                                 |
| <b><math>\eta_{th}</math></b>    | : | Isıl verim [%]                                          |

|             |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $\eta_c$    | : Carnot verimi [%]                                                      |
| $\bar{T}$   | : Ortalama sıcaklık değeri [K]                                           |
| $\eta_{mp}$ | : Maksimum güç verimi [%]                                                |
| $\rho^*$    | : Etkin öz direnç                                                        |
| $k^*$       | : Etkin ısı iletkenlik katsayısı                                         |
| $Z^*$       | : Etkin değerlik katsayısı                                               |
| $\alpha^*$  | : Etkin seebeck katsayısı                                                |
| $A_e$       | : Bir elementin kesit alanı                                              |
| $N_k$       | : Boyutsuz ısı iletkenlik                                                |
| $N_h$       | : Boyutsuz taşınım                                                       |
| $R_r$       | : Boyutsuz elektrik direnci                                              |
| $T^*$       | : Boyutsuz sıcaklık                                                      |
| $Q^*$       | : Boyutsuz ısı transfer oranı                                            |
| $W^*$       | : Boyutsuz güç                                                           |
| $N_I$       | : Boyutsuz akım                                                          |
| $N_V$       | : Boyutsuz voltaj                                                        |
| $D_h$       | : Hidrolik çap [m]                                                       |
| $f_h$       | : Sürtünme faktörü                                                       |
| $\Delta P$  | : Basınç farkı [Pa]                                                      |
| $\epsilon$  | : Eş değer pürüzlülük sayısı                                             |
| $k$         | : Türbülans kinetik enerjisi                                             |
| $\epsilon$  | : Türbülans dağılım oranı                                                |
| $\mu$       | : Dinamik viskozite [kg/ms]                                              |
| $G_b$       | : Basınç değişimi sonuca oluşan türbülans kinetik enerjisi [J]           |
| $G_k$       | : Kaldırma kuvveti sonucu oluşan türbülans kinetik enerjisi [J]          |
| $Y_M$       | : Sıkıştırılabilir türbülanstaki dalgalı dilatasyonun genel dağılım hızı |
| $w$         | : Açısal hız [rad/s]                                                     |
| $c_p$       | : Özgül ısınma ısı [J/kgK]                                               |
| $VOF$       | : Akış hacmi [m <sup>3</sup> ]                                           |
| $\dot{V}$   | : Hacimsel debi [m <sup>3</sup> /s]                                      |

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca bilimsel katkısı, yol gösterici ve sürekli teşvik edici sözleri ve uygulamalarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Doç. Dr. Gülay YAKAR hocama, desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU hocama, manevi olarak destek olan Prof. Dr. Nazım USTA'ya ve bana her zaman destek olup, yol gösteren Arş. Gör. Osman YELER'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Her zaman maddi ve manevi desteklerini üzerimde hissettiğim annem İrep, babam Seyit Ahmet ve eşim Hatice'ye gösterdikleri sabırdan ve manevi desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, BAP-TEZ ile desteklenmiştir. Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

Dünyadaki genel elektrik üretim sistemlerinin önemli ölçüde çevresel ve ekonomik etkileri olmaktadır. Bu nedenle, alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Kömür, petrol, doğalgaz, LPG, odun, biyogaz, gibi tüm fosil yakıtlar ile hidrolik, rüzgâr, dalga enerjileri gibi enerji temini için kullanılan tüm enerji kaynakları sınırlıdır. Şu anki enerji kullanım koşulları göz önüne alınarak yapılan en iyimser tahminlerde bile en geç 2100 yılında petrol rezervlerinin büyük ölçüde tükeneceği ve ihtiyacı karşılayamayacağı görünmektedir. Doğalgaz için şu anki rezervlerle yaklaşık 100-120 yıl, kömür içinse yine yaklaşık 180-200 yıllık bir kullanım süresi tahmin edilmektedir (Ünsaç 2010). Enerji sorunlarının gelecek yıllarda büyük sorunlara neden olacağı düşünülmektedir. Bu yüzden alternatif enerji kaynakları için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Günümüzde enerji sorununa bazı alternatif çözümler bulunmuştur ve bu çözümlerden biri ise enerjinin verimli kullanımıdır. Bir sistemdeki atık ısıların değerlendirilmesi de enerjinin verimli kullanımının başlıca yollarındandır. Termoelektrik jeneratörler, bu gibi atık ısının kullanılması ile iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkından dolayı güç elde edilebilen bir cihazdır (Ünsaç 2010). Örneğin bir otomobilde yanma sonrası açığa çıkan egzoz atık ısısının geri kazanımı için çeşitli termoelektrik jeneratör uygulamaları ile sisteme ya da sistemsel elemanlara güç veya enerji olarak yeniden kazandırılmak istenmiştir. Bu ve bunun gibi alternatif durumlar için yeni tasarımlar ve bu tasarımların optimum tasarımları yapılmaktadır.

Optimum tasarımı yapılmak istenen sistemlerin maliyetini minimuma indirmek için çeşitli yazılımlarla oluşturulmuş paket programlar sayesinde numerik hesaplamalar ve simülasyonları yapılabilmektedir.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, turbo şarj sistemlerin kompresörü ile ara soğutucu arasına termoelektrik jeneratör sistemi yerleştirilmektedir. Böylece, ara soğutucularda dışarıya atılacak olan ısı enerjisinden faydalanılarak güç elde edilmesi

hedeflenmektedir. Termoelektrik jeneratör (TEJ) sisteminin, farklı dış çevre sıcaklıkları (yaz ve kış aylarına ait) ve p-n ısı çiftlerinin farklı geometri alanları ile nümerik olarak en uygun sistem tasarlanmaktadır. Bu elde edilen elektriksel güç ile, söz konusu TEJ sistemin kullanıldığı, turbo şarjlı dizel traktördeki harcanan elektriksel enerjinin bir kısmı karşılanabilecektir.

Çalışmada, hem korelasyon olarak hesaplamalar yapılmakta hem de Ansys Fluent ve Thermal-Electric kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmektedir. Thermal-Electric programı ile gerçekleştirilen simülasyonlarda ise Korelasyon ve Fluent analiz ile elde edilen çıkış parametreleri ve sıcaklık sınır koşulları girdi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, farklı boyutlarda modüller oluşturularak, element (p-n çifti) kesit alanları arttırılmakta ve bunlarında nümerik olarak analizleri gerçekleştirilmektedir. Böylece, Ticari TEJ modülü ile farklı boyuttaki TEJ modüllerin Thermal-Electric analiz sonuçları karşılaştırılmakta ve en yüksek elektriksel gücün elde edildiği boyut belirlenmektedir.

## **1.2 Termoelektrik Modülün Tarihçesi**

Termoelektriğe ilişkin ilk bulgu, 1821 yılında Alman bilim adamı Thomas Seebeck tarafından ortaya konmuştur. Thomas Seebeck, iki farklı tür metalin içerisinde bulunduğu kapalı bir devrede bir bağlantı noktası ısıtıldığında, bir elektromotor kuvveti veya potansiyel farkının üretilebileceği bulgusunu elde etmiştir (Seebeck 1823).

1834'lere gelindiğinde, Fransız fizikçi Jean-Peltier, Seebeck Etkisi'ni araştırırken, elektrik akımının kapalı bir döngüde dolaştığı sırada, termal enerjinin farklı jonksiyonlardan birinde absorbe edilirken, diğerinde deşarj olduğunu fark ederek, teoriye bambaşka bir bakış açısı getirmiştir (Ioffe 1957). Bundan 20 yıl sonra William Thomson (Lord Kelvin olarak da bilinir), Seebeck ve Peltier etkilerini kapsayan ve bunların ilişkilerini açıklayan bir bildiri yayınlamıştır (Thomson 1851).

1930'larda ise Rus bilim adamları, bazı termoelektrik çalışmaları kullanarak, ülkeleri boyunca uzak yerleşim yerlerinde kullanılmak üzere, güç jeneratörleri kurarak araştırmalarına başlamışlardır. Rusların termoelektrik sistemlere olan ilgileri dünyanın diğer ülkelerine de yansımış ve daha pratik termoelektrik modüllerin gelişimine yol açmıştır. Bugün, daha önceki deneylerde kullanılan farklı metal

jonksiyonları yerine, termoelektrik soğutucularda modern yarı iletken materyaller teknolojisinin kullanımı sağlanmıştır. Seebeck, Peltier ve Thomson etkileri ile birlikte diğer bulgularda, işlevsel termoelektrik modülün temellerini oluşturmaktadırlar (Dikmen 2002).

### 1.3 Literatür Özeti

Massaguer ve diğ. (2017) pek çok model ve prototipi çok umut verici sonuçlar ile geliştirmişlerdir. Çalışmalarının çoğunu, kararlı durumlu motor koşulları altında test etmişlerdir. Ayrıca, sürekli kararlı motor koşullarında ve geçici Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC) altında bir otomotiv termoelektrik jeneratörü (ATEJ) analiz etmişlerdir. Onların sonuçları, termal eylemsizliğin ve basınç düşüşünün gerçek uygulamalar için bir ATEJ tasarımında önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

He ve diğ. (2017) bir termoelektrik jeneratör (TEJ) sistemi benzinli motor egzozundan gelen atık ısıyı geri kazanmak için kullanıldığı zaman, egzoz gazının termal parametrelerinin büyük ölçüde değiştiğini ve bu TEJ sisteminin optimum performansı üzerinde bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, akış hızının ve TEJ modül alanının TEJ sisteminin optimizasyonu için iki önemli parametre olduğunu göstermiştir. Ayrıca, tüm optimal performans parametreleri, korelasyon denklemlerini çıkararak türetmişlerdir. Bu korelasyonları kullanarak, TEJ sisteminin optimum performansını ve ideal tepe net gücünü, herhangi bir egzoz termik parametresi için rahatlıkla elde etmişlerdir.

Chi ve diğ. (2017) çalışmalarında, bir ısı borusu ile desteklenen bir TEJ (Termoelektrik jeneratör) sisteminin maksimum güç çıkışının nasıl arttırılacağını incelemişlerdir. Isı borusu ile TEJ sisteminin (%15-20 yüklü, 20°-30° eğik konfigürasyon) birlikte çalışması ile en iyi performansı elde etmişlerdir.

Li ve diğ. (2017) ısı borusu teknolojilerine entegre olan eş merkezli şekle uyarlanmış TEJ modüllerine, iyileştirilmiş bir ısı kaynağı kullanılarak yenilikçi bir yol sunmuşlardır. Çalışmalarında, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> tabanlı bir termoelektrik materyal için en yüksek güç değeri ZT değeri 0.87 için 0.45 L başına 29.8 W elde etmişlerdir. Çalışmaları, diğer yüksek sıcaklık termoelektrik malzemeler için yapısal olarak erişilebilir bir ısı eşanjörü sistemine dair bir fikir vermiştir.

Hervas-Blasco ve diğ. (2017) ana enerji kayıplarını gidererek elde edilen bir CNG-güç aktarma organında potansiyel yakıt tasarrufunu sağlamışlardır. Analizleri, bir termoelektrik jeneratör (TEJ) ve bir turbo jeneratör (TBJ) ve ana yardımcıların elektrifikasyonu olan kademeli yaklaşım kullanarak egzoz gazı atık ısı geri kazanımını bir kayış marş jeneratörü (BSG) tarafından kinetik enerji geri kazanımını içermiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, derecelendirme noktasındaki tahminler (600 Nm ve 1200 dev / dak), 4 kWh'ye kadar bir elektrik üretimine ve %7.5 yakıt tasarrufuna neden olduğunu göstermiştir.

Li ve diğ. (2017) bir nano sıvı soğutucu sıvısı ile termoelektrik esash otomotiv atık ısı geri kazanım sisteminin çıktı performansını bu çalışmada analiz etmişlerdir. Egzozun giriş sıcaklığı 500-710 K'de değişirken, %3'lük bir nano sıvı konsantrasyonu için güç çıkışı artırımının, EG-Su'ya kıyasla 2.5 – 8 W (%12.65-13.95) olduğunu tespit etmişlerdir.

Osipkov ve diğ. (2017) çalışmalarında, araçlarda kullanılan düşük kapasiteli içten yanmalı motorların termoelektrik jeneratör (TEJ) işletme karakteristikleri için bir hesaplama modelini önermişlerdir. İki TEJ yapısı düşünülmüşlerdir: (1) hava soğutmalı TEJ ve (2) su soğutmalı TEJ. Modellemeyi iki hesaplama aşamasından oluşturmuşlardır. İlk aşamada, sıcak ve soğuk değiştiricilerin ısı değişim katsayılarını hesaplamalı akışkan dinamikleri kullanarak belirlemişlerdir. İkinci aşamada, TEJ'nin çalışma karakteristiklerini, ısı transferi ve güç dengesinin doğrusal olmayan denklemlerini temel alarak modellemişlerdir. Modelleme sonuçlarına dayanarak, TEJ'in temel çalışma özelliklerinin (TEJ tarafından üretilen elektrik gücü ve verimliliği ve kütlesi gibi) işletme koşulları veya tasarım parametrelerine bağımlılığını belirlemişlerdir. Örneğin, bir Yamaha WR450F motosiklet motoru için  $0,449 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  hacmine sahip bir TEJ tarafından üretilen elektrik enerjisini 100 W olarak hesaplamışlardır. Önerilen TEJ düzenlemelerinin kullanımını, içten yanmalı motorların yeniden tasarlanmasına ihtiyaç duymadan, küçük kapasiteli araçlar için ek elektrik enerjisi üretimi ile doğrulamışlardır.

Zhang ve diğ. (2017) bu çalışmada, bir termoelektrik jeneratör, bir termoelektrik soğutucu ve bir SOFC'den oluşan başlıca yeni bir hibrit sistemi, performansı arttırmak için SOFC'den atık ısıyı geri kazanmak için önermişlerdir. Her bileşendeki termodinamik ve elektrokimyasal tersinmez kayıpları tamamen göz önüne almışlardır. SOFC işletme akımı yoğunluğu ile termoelektrik cihazların boyutsuz elektrik akımı arasında analitik bir ilişki türetmişlerdir; termoelektrik

cihazların etkili biçimde çalışmasına izin veren SOFC işletme akımı yoğunluğu aralığını belirlemişlerdir. Hibrit sistemin eşdeğer güç çıkışını ve verimliliğini, farklı işletim akım yoğunluğu bölgeleri altında belirtmişlerdir. Önerilen sistemin güç yoğunluğunun ve verimliliğinin sırasıyla bağımsız SOFC'nin güç yoğunluğundan ve verimliliğinden %2.3 ve %4.6 daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Chen ve diğ. (2017) önceki çalışmalarına ait olan 1 KW'lık (120°C'lik bir sıcaklık farkında) TEJ sistemini yeniden tasarlanmış ve değiştirmişlerdir. Sistemin çıktı gücünü yaklaşık %34.6 daha fazla geliştirmişlerdir; TEJ sisteminin anlık verimliliğinin yaklaşık %6.5'e ulaştığını belirlemişlerdir.

Xu ve diğ. (2017) çalışmalarında, bir katı oksit yakıt hücresine (SOFC) bir katı hal iki kademeli termoelektrik jeneratörü (TTEJ) bağlayan yeni bir hibrid sistemi, performans artırımı için SOFC'den atık ısının hasat edilmesi için önermişlerdir. Üst ve alt aşamalarındaki termoelektrik elementlerin sayısını, TTEJ'nin güç çıkışını maksimize etmek için optimize etmişlerdir. SOFC'nin işletme akım yoğunluğu ve optimize edilmiş TTEJ'nin boyutsuz elektrik akımı arasında ilişki türetmişlerdir. Önerdikleri sistemin, tek başına SOFC, SOFC-tek aşamalı TEJ hibrit sistemi ve daha birçok ortaya çıkan SOFC tabanlı hibrit sistemlerden daha etkili olduğu bulmuşlardır. İşletim ve tasarım parametrelerinin sistem performansına etkilerini araştırmak için kapsamlı parametrik çalışmalar yürütmüşlerdir.

Huang ve diğ. (2017) bu çalışmada, eş merkezli bir silindirik termoelektrik jeneratörün (CCTEJ) ve bir dairesel termoelektrik modülün (ATEM) yeni tasarımlarını sunmuşlardır. Simülasyonları, ATEM'in ve geleneksel kare şekilli termoelektrik modülün (STEM) performansını karşılaştırmak için gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, ısı iletiminin iyileştirilmesi için ısı borularının kullanılabilme kabiliyetini göstermek ve böylece tasarımın uygulanabilirliğini ispatlamak için de deneysel çalışmalar yapmışlardır. Onların Simülasyon sonuçları, ATEM'in açık devre elektrik potansiyelinin STEM'inkinden %17 daha fazla olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçları ise, CCTEJ sisteminin çeşitli koşullar altında iyi performans gösterdiğini göstermiştir. Bu sonuçları, aynı zamanda ısı emici sisteme ısı boruları ilave fikri TEJ sisteminin kompaktlığını korurken daha yüksek termoelektrik jeneratör (TEJ) performansı elde etmek için pratik bir çözüm olduğunu göstermiştir.

Stobart ve diğ. (2017) çalışmalarında, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kodlamaları kullanan bir modelleme sürecinin uygulanabilir olduğunu

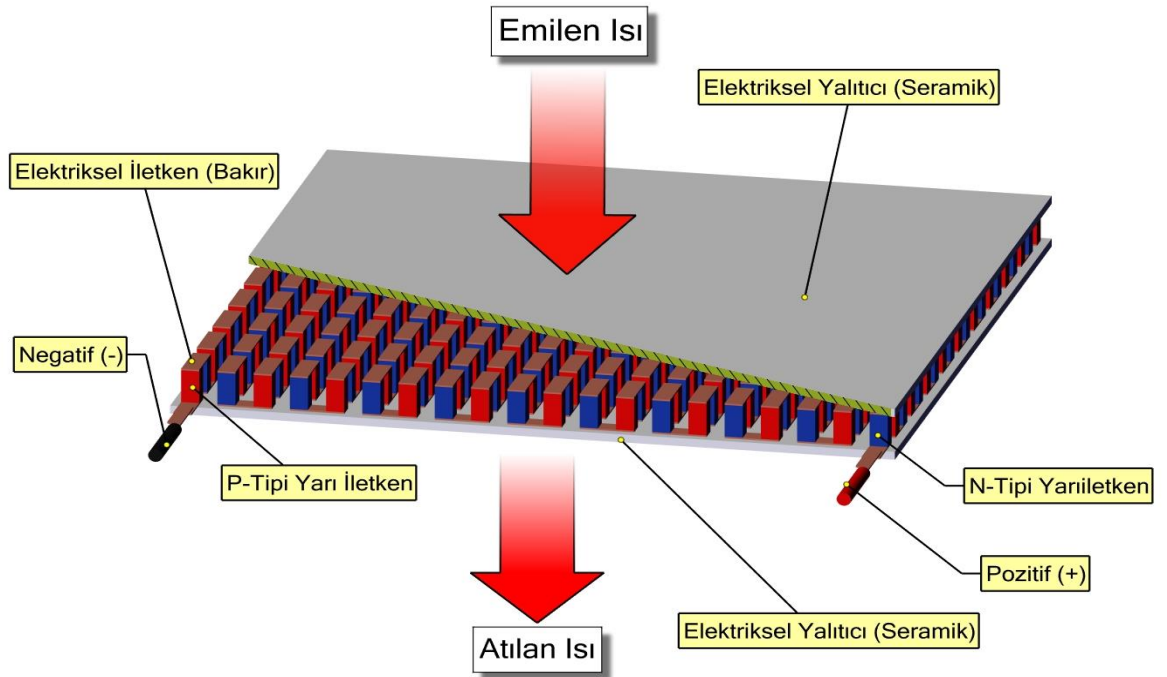
göstermişlerdir. İlk simüle ettikleri ve daha sonra bir motor test yatağında çalıştırdıkları bir kıyaslama TEJ tasarımı, simülasyon ve deney arasında %10'luk bir uyum sağladığını göstermiştir. Modülün ve genel TEJ tasarımının optimize edilmiş performansı için kapalı form sonuçlarını literatürde belitmişler ve uygulama yöntemlerine ilişkin önemli bilgiler sunmuşlardır. Ayrıntılı bir değerlendirmeyi, TEJ parametreleri ve malzeme özelliklerini sağlayacak bir CFD kodu ısı değiştiricisinin plaka-yüzgeç tasarımı ile göstermişlerdir.

He ve diğ. (2017) egzoz gazı ısısının geri kazanımı için kullanılan bir termoelektrik jeneratör (TEJ) modelini yaygın bir plaka tipi egzoz ısı değiştiricisine uygulayarak bu çalışmada sunmuşlardır. Modelleri, sadece akışkan debi yönü boyunca sıcaklık eğrisini değil, aynı zamanda akışkan ısı iletimini ve akış direncini de içermiştir. Çalışmalarında, Isı değiştiricisi ölçekleri, ısı transferi ve akış direnci özellikleri ve termoelektrik performans arasındaki etkileşim ilişkileri Fortran programını kullanarak sayısal simülasyonlar ile ağırlıklı olarak kullanılmıştır. Sonuçları, yüksek TEJ gücünün küçük kesit alanından elde edilebileceğini ve küçük bir optimal modül alanına karşılık geldiğini göstermiştir. Akışkan akış direnciyle maksimum net gücü elde etmek için, en uygun kesit alanının, bir otomotiv araçta uyguladıkları zaman 0.005 m yükseklikte ve 0.56 m uzunluğunda optimum ölçeklerle birlikte 0.0056 m<sup>2</sup> olduğunu tespit etmişlerdir.

## 2. TERMoeLEKTRİK

### 2.1 Termoelektrik Modül

Termoelektrik, kelimenin tam anlamıyla termal ve elektrik olaylarıyla ilişkilidir. Termoelektrik işlemler, doğrudan termal enerjiyi elektrik enerjisine veya elektrik enerjisini termal enerjiye dönüştürebilir. Her biri p-tipi ve n-tipi yarı iletken elementlerden oluşan bir dizi ısı çift, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, bir termoelektrik modül oluşturmak için, düşük elektriksel iletkenliğe sahip seramik plakalar arasına, elektriksel olarak seri ve ısı olarak da paralel olacak şekilde bağlanırlar.



Şekil 2.1: Termoelektrik Modül Yapı ve Elemanları.

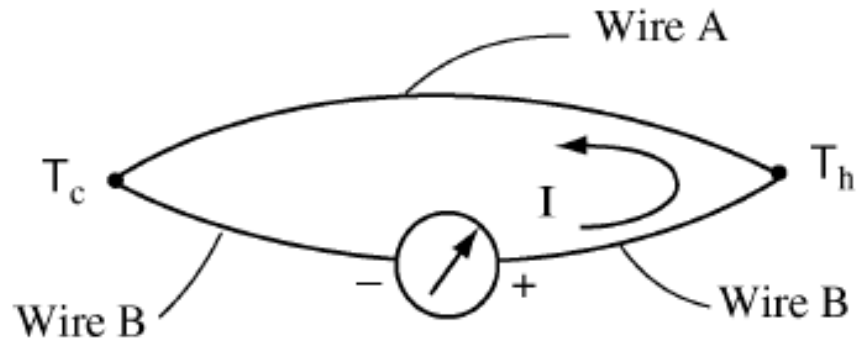
## 2.2 Termoelektrik Etkiler

### 2.2.1 Seebeck Etkisi

Seebeck etkisi, bir sıcaklık farkının bir elektrik akımına dönüştürülmesidir. Şekil 1.2’de gösterildiği gibi, A telinin her iki ucu B teline birleştirilir ve bir voltmetre B teline eklenir. Bir sıcaklık farkının, iki birleşme yerinin arasına uygulandığını varsayalım; daha sonra, bir potansiyel fark veya voltaj (V) voltmetre üzerinde görünecektir. Potansiyel fark, sıcaklık farkıyla orantılıdır. Potansiyel farkı (2.1)’deki eşitlikle elde edilir;

$$V = \alpha_{AB}\Delta T \quad (2.1)$$

Burada  $\Delta T = T_h - T_c$  ve  $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$ ’dir.  $\alpha_{AB}$  genellikle  $\mu V/K$  cinsinden ölçülen Seebeck katsayısıdır. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, elektromotor kuvveti, sıcak bağlantı noktasından soğuk bağlantı noktasına, A teli yoluyla bir elektrik akımı kullanma eğiliminde olursa  $\alpha$  işareti pozitifdir. Pratikte mutlak Seebeck katsayısı nadiren ölçülür, çünkü gerilim ölçer, daima A ve B kabloları arasındaki bağıl Seebeck katsayısını okumaktadır. Mutlak Seebeck katsayısı Thomson katsayısından hesaplanabilir (Lee 2017).

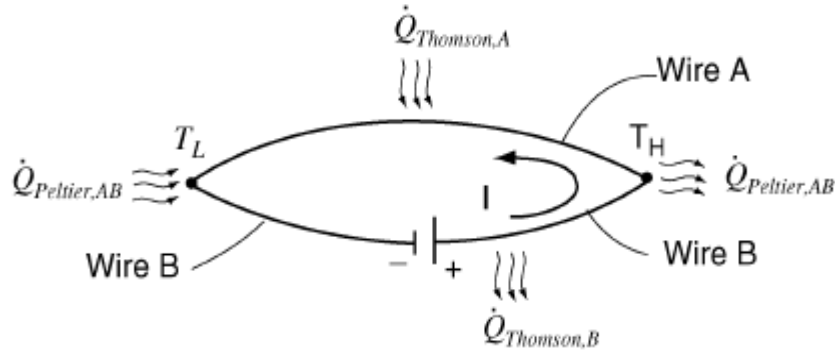


Şekil 2.2: Seebeck Etkisi (Lee 2017).

### 2.2.2 Peltier Etkisi

Jean Peltier, iki farklı tel arasındaki bir birleşme yeri boyunca akımı kapalı bir devre içerisinde dolaştırdığında, Şekil 2.3’de gösterildiği gibi, ısıнын bir bağlantı

noktasından sürekli emildiği ve bir diğer bağlantı noktasından ısının ortama verildiğini gözlemlemiştir.



**Şekil 2.3:** Peltier etkisi ve Thomson etkisi (Lee 2017).

Isı, akım ile orantılıdır ve akım ters çevrildiği zaman işaret değişir. Böylece emilen veya serbest bırakılan Peltier ısısı Denklem (2.2) ile verilmiştir.

$$\dot{Q}_{\text{Peltier}} = \pi_{AB} I \quad (2.2)$$

Burada  $\pi_{AB}$  Peltier katsayısıdır ve eğer akımın A teline girdiği bağlantı noktası ısıtılır ve akımın A telini bıraktığı bağlantı noktası soğutulursa  $\pi_{AB}$  işareti pozitifdir. Peltier ısıtma veya soğutma, ısı ve elektrik arasında tersine çevrilebilir. Bu, ısıtma (veya soğutma) elektrik üreteceği ve elektriğin enerji kaybı olmadan ısıtma (veya soğutma) sağlayacağı anlamına gelir (Lee 2017).

### 2.2.3 Thomson Etkisi

Şekil 2.3’de gösterildiği gibi, akım aktığında, malzemeye bağlı olarak, ısı negatif sıcaklık değişiminden dolayı A teline emilir ve B telinde ise pozitif sıcaklık değişiminden dolayı serbest kalır, ki bu deneysel gözlemdir (Lee 2017). Thomson ısısı ( $\dot{Q}_{\text{Thomson}}$ ) hem elektrik akımı hem de sıcaklık değişimi ( $T_H - T_L$ ) ile orantılıdır, ki bu Şekil 2.3’de şematik olarak gösterilmektedir. Böylece, bir telin içine emilen veya serbest bırakılan Thomson ısısı:

$$Q_{\text{Thomson}} = -\tau_{AB} I \nabla T \quad (2.3)$$

Burada  $\tau$  Thomson katsayısıdır. Thomson katsayısı, üç termoelektrik katsayı arasında benzersizdir çünkü bireysel malzemeler için doğrudan ölçülebilen tek termoelektrik katsayıdır. Ayrıca, ters çevrilemez ve her zaman bir telde akım akışı

olarak üretilen Joule ısınması ( $I^2R$ ) adı verilen başka bir ısı biçimi de vardır. Thomson ısısı, ısı ve elektrik arasında tersine çevrilebilir (Nettleton 1922).

### 2.2.3.1 Thomson İlişkileri

Üç termoelektrik etki arasındaki karşılıklı ilişki, temel olguyu anlamak amacıyla önemlidir. Thomson, 1854 yılında, termodinamik olarak ilişkileri incelemiş ve termoelektrikte tersinir ve tersinmez süreçlerin ayrı olabileceği varsayımıyla termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarını uygulayarak Denklem (2.4) ve (2.5)'de gösterildiği gibi iki ilişki sağlamıştır. Bu varsayımın gerekliliği yeni termodinamiğin ortaya çıktığı zamana kadar, teoriye karşı bir itiraz olmaya devam etmiştir. Thomson etkisi, Peltier etkisi ile karşılaştırıldığında oldukça küçüktür ancak Thomson ilişkilerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır (Thomson 1854).

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB}T \quad (2.4)$$

$$\tau_{AB} = T \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad (2.5)$$

Denklem (2.4), Denklem (2.2)'de kullanılarak, Peltier ısısı Denklem (2.6)'ya dönüşür:

$$\dot{Q}_{\text{Peltier}} = \alpha_{AB}TI \quad (2.6)$$

Burada  $T$ , iki farklı malzeme arasındaki birleşim noktasının sıcaklığıdır ve  $\dot{Q}$  ise birim zamanda taşınan ısı miktarını göstermektedir.

### 3. TURBO ŞARJ SİSTEMLERİ

#### 3.1 Dizel Motorlarda Aşırı Doldurma

İçten yanmalı motorların motor gücü, yaklaşık olarak silindirlerinde yakılan yakıt ve yanma için kullanılan hava miktarı ile orantılıdır. Aynı hacimdeki bir motordan daha fazla güç elde etmek için, silindir içerisine daha fazla hava almak gerekir. Bu da harici bir kompresör kullanılarak gerçekleştirilir. Doğal emişli bir motora nazaran, harici bir kompresörle, silindirine bir çevrimde alınan hava miktarı arttırılan motora, aşırı doldurmalı motor, bu işleme de aşırı doldurma denir (Gülyaşar 2008).

Aynı strok hacminden daha fazla güç almak veya belirli bir çıkış gücü için motorun ağırlığını ve hacmini düşürmek, aşırı doldurmanın temel mantığıdır. Bu durum, kompresör tarafından silindire yüksek basınç altında daha fazla hava gönderilerek, yakılabilecek yakıt miktarının arttırılması ile sağlanır. Böylece aşırı doldurmalı motorlar, doğal emişli motorlara göre daha hafif ve küçük hacimli olurlar. Bu ise, birim çıkış gücü başına daha az maliyet demektir (Özcan 2009).

Çalışma şartlarına bağlı olarak, kısmi yüklerde ve özellikle maksimum gücün yarısına kadar olan düşük güç aralığında, aşırı doldurmalı bir dizel motorunun özgül yakıt tüketimi daha düşük değerler almaktadır.

Aşırı doldurmada sıkıştırma başlangıcı basıncı yüksek olduğundan, sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklık değerleri de yüksek olur. Böylece aşırı doldurma uygulanan bir dizel motorunda tutuşma gecikmesi kısalmır. Bu da motorun daha tatlı ve yumuşak çalışmasına neden olur. Çünkü tutuşma gecikmesinin düşmesi, yanma karakteristiklerinin yükselmesine, daha kaliteli bir yanma elde edilmesine veya motorun daha düşük kaliteli yakıt ile çalıştırılmasına izin verir ve motor daha az titreşimli çalışır. Silindir içine alınan havanın miktarı, aşırı doldurma uygulaması ile arttığından, kontrollü bir yanma sağlanarak daha düşük egzoz gazı emisyon değerleri elde edilir. Doğal emişli motorlarda, yüksekliğe bağlı güç düşmeleri her 1000 m’de %10 dolayında iken aşırı doldurmalı motorlarda bu değer %1-2 arasında kalmaktadır (Gülyaşar 2008).

Aşırı doldurmalı bir dizel motoru bütün bu üstünlüklerin yanında, artmış olan gaz kuvvetlerine karşı dayanabilecek kuvvetlendirilmiş bir tasarıma ihtiyaç duyar.

İşletme durumlarında, motorun ilk harekete geçirilmesi sırasında yağ pompasından basılan yağın, turbo kompresör mil ve yataklarına varması hayli zaman alacağı için, ani gaz vermekten kaçınılmalıdır. Diğer bir durum ise, motorun durdurulması sırasında turbo kompresör milinin ataletinden dolayı, bir süre daha dönmeye devam edeceğinin unutulmaması gereğidir. Bu sırada yağ pompası çalışmadığı için, ünite yağlanamamaktadır. Bu yüzden motor, önce rölanti devrine düşürülmeli, sonra durdurulmalıdır.

Belli bir çıkış gücü için aşırı doldurmanın üstünlükleri;

1. Daha küçük bir hacim ihtiyacı (az sayıda silindir ve daha kısa bir motor)
2. Daha hafif bir motor, birim çıkış gücü başına daha küçük bir özgül ağırlık
3. Egzoz turbo kompresörü ile daha yüksek bir verim,
4. Özellikle büyük motorlarda birim çıkış gücü başına daha düşük maliyet,
5. Daha küçük bir radyatör, normal emişli motorlardan daha az ısı kaybı,
6. Egzoz türbini ile daha az egzoz gürültüsü,
7. Düşük çevre basıncından daha az etkilenme,
8. Kontrollü bir yanma ile daha düşük kirletici değerleri.

Aşırı doldurmanın mahsurları;

1. Daha büyük mekanik ve termal yükler,
2. Düşük moment karakteristikleri,
3. Düşük ivmelenme, dizel motorlu taşıtlarda ivmelendirme sırasında ise emisyonlarında büyük artışlar meydana gelmektedir. Özellikle aşırı doldurmalı motorlarda bu durum daha da belirgindir. Bunun nedeni aşırı doldurma sisteminin (türbin-kompresör çifti) gaz pedalına ani olarak basılarak ani olarak arttırılan yakıt debisi ile orantılıyı havayı silindirler içine gönderememesi ve belli bir cevap gecikmesi ile yakıt sistemini izlemesidir. Böylece ortamda yeteri hava olmamasından dolayı is oluşumu artmaktadır.

Aşırı doldurmanın amacı, silindir içine giren havanın basıncını ve yoğunluğunu arttırmak sureti ile volümetrik verimi arttırmaktır. Aşırı doldurma ile bir motorun hızı arttırılmadan, gücü arttırılabilir veya belirli bir çıkış gücü için motorun ağırlık ve hacmi düşürülebilir. Aynı zamanda yakıtın tam yanması sağlanarak egzoz emisyonlarında bir düzelme görülür.

Aşırı doldurma benzin ve dizel motorlarının her ikisine de uygulanabilir. Ancak aşırı doldurma uygulanan bir benzin motorunda, vuruntu riskinden dolayı sıkıştırma oranını düşürmek gerekir. Bu da aşırı doldurma uygulamasının cazibesini gölgeler. Bu yüzden benzin motorlarında aşırı doldurma uygulamasının pek rağbet görmemesine karşın, dizel motorlarında yüksek performans ve yumuşak çalışma gibi özelliklerinden dolayı yaygın halde kullanılmaktadır (Özcan 2009).

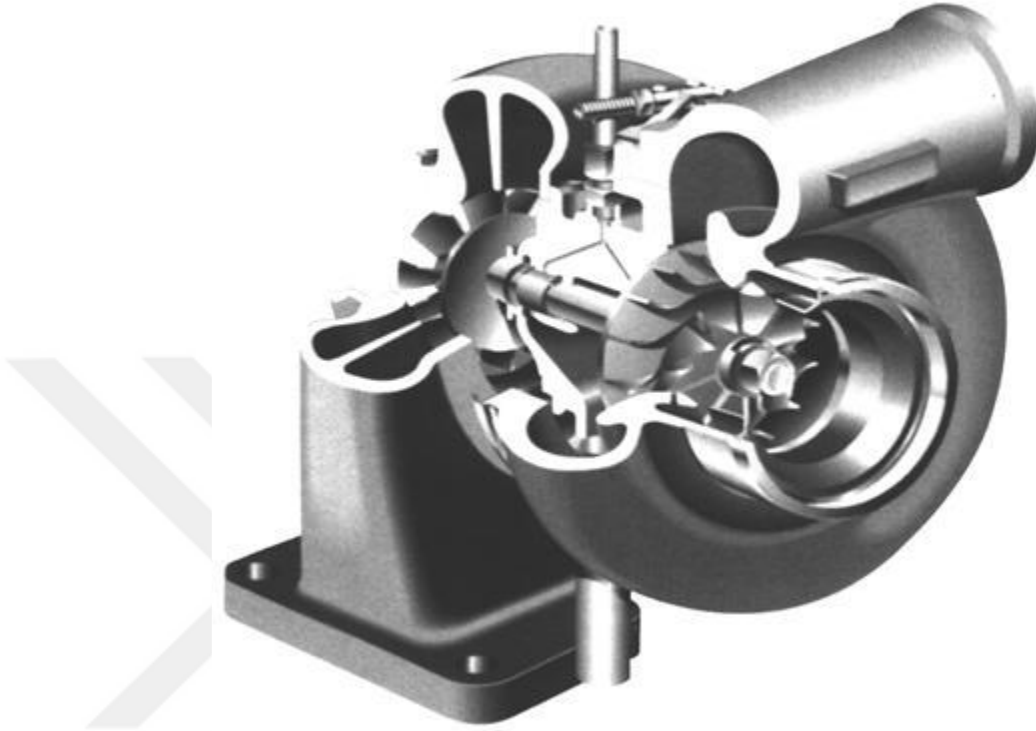
### 3.2 Turbo Şarj Sisteminin Amacı

Egzoz türbinli doldurucu da denilen bu yöntemde, mekanik kompresörün tersine motordan güç almadan doldurma yapılmaktadır. Çalışma prensibi de oldukça basittir. Egzozdan faydasız olarak atılan egzoz gazı enerjisiyle direkt olarak türbin çarkı tahrik edilmektedir. Türbin tarafından aynı mile bağlı olarak fakat ayrılmış gövde içerisindeki bir kompresör aynı hızla döndürülmektedir. Bu pompa taze havayı emmekte, sıkıştırmakta ve 1 atmosfer veya üzerindeki basınçta silindirlere gönderilmektedir. Böylece optimal karışım gönderilmektedir. Silindirlere atılan egzoz gazlarının genişleme sonundaki enerjileri bir gaz türbini vasıtasıyla mekanik işe dönüştürülür. Gaz türbininin mekanik enerjisi, miline bağlı bir kompresörü tahrik ederek, aşırı doldurma havasının sıkıştırılması sağlanır. Böylece optimal bir dolgu elde edilir (Gülyaşar 2008).

Bu şekilde türbin ve kompresör ünitesiyle sağlanan aşırı doldurma turbo şarj olarak tanımlanır, Şekil 3.1’de ise bir turbo şarjın kesit görünüşü verilmiştir. Türbin ve kompresör ünitesinin toplam kütlesi motor kütlesinin %8’ini geçmez. Turbo şarjlı motorlarda birim güç maliyetinin daha az olması ve %50’nin üstünde güç artışı sağlanması nedeniyle, otomotiv dâhil geniş uygulama alanı vardır (Özcan 2009).

Aşırı doldurmada yanma daha fazla hava fazlalık katsayısıyla gerçekleştiğinden egzoz gazlarındaki zararlı emisyon yüzdeleri azalır. Turbo şarjlı motorlarda hız azalması, çevrim başına silindirden atılan egzoz gazlarının fazla değişmediği göz önüne alındığında, türbine giren egzoz gazlarının sıcaklıklarının düşmesine yol açar. Bu durum, türbin gücünü düşürür ve daha düşük güçle tahrik edilen kompresörün çıkış basıncı  $P_k$ ’yı azaltır. Turbo şarj yönteminde aşırı doldurma basıncının motor hızına bu şekilde bağımlılığı, rezerv moment sağlanamaması nedeniyle motorun ivmelenmesini kötüleştirir. Aşırı doldurmanın etkinleştirilmesi

için, egzoz supabı serbest kesitinin zamana göre değişim değerinin arttırılması için dizaynda özen gösterilmesi gerekir.  $\epsilon_k > 2$  şartlarında turbo şarj yöntemiyle aşırı doldurma için, genelde iki egzoz ve iki emme supabı uygulaması yoluna gidilir (Özcan 2009).



**Şekil 3. 1:** Turbo şarjın kesit görünüşü (Özcan 2009).

Mekanik ve termik zorlanmaların makul sınırlarda tutulabilmesi için 1.6-1.8 sınırlarında tutulmalıdır.  $\epsilon_k > 2-2.2$  şartlarında, kompresör çıkışında hava soğutucu kullanılma yoluna gidilir. Yaklaşık olarak hava sıcaklığının  $10^{\circ}\text{C}$  düşürülmesi yoğunluğu %3, aynı özgül yakıt sarfiyatı için gücü %3 arttırmaktadır (Özcan 2009).

Türbin çevresel hızı taşıt motoru uygulamasında 250-380 m/s arasındadır. Türbin rotor çapının artması türbin ünitesinin ataletini arttıracığından, bu durum motorun ivmelenmesini olumsuz etkiler. Bu nedenle türbin rotoru dış çapı küçük tutulur. Normal işletme şartlarında, türbin hızları 55000-80000 1/min arasında değişir (Özcan 2009).

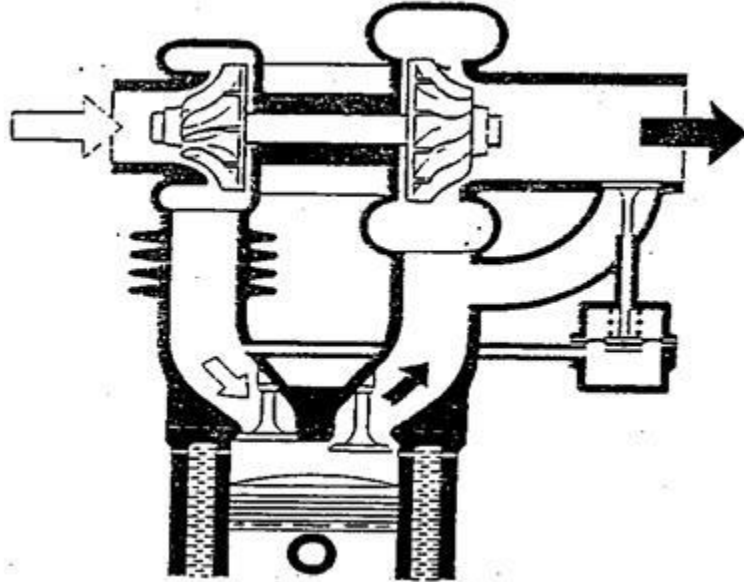
### 3.3 Turbo Şarj Sisteminin Çalışma Prensibi

Turbo şarjın çalışması, egzoz manifoldundan çıkan yanmış egzoz gazlarının enerjilerine bağımlı olarak değişir. Silindirden çıkan egzoz gazları, egzoz

manifoldunun ağızındaki türbin bölümüne girer. Çevresel ve merkeze doğru daralan bir kanaldan geçen sıcak gazlar bir yandan genişlemek isterken, diğer taraftan daralmakta olan bu kanalda hız kazanırlar. Bu noktadan sonra gaz, türbin çarkının dış ucundan türbin odası merkezine geçerken kanatçıklara çarparak türbini yüksek bir hızla döndürür ve türbin ortasından egzoz borusuna geçerler. Türbin çarkı ve kompresör çarkı aynı mil üzerinde bağlı olduklarından aynı hızla dönerler (Gülyaşar 2008).

Kompresörde hava filtresinden emdiği temiz havayı merkezden alır ve çark kanatlarıyla yüksek hızla çevreye savurur. 100.000 d/d'ya erişebilen bir hızla dönen kompresör çark, havayı santrifüj kuvvetlerle ağırlık kazandırır ve merkezden çevresel kanata doğru fırlatır. Dış basınca göre yaklaşık iki misli basınca buradan da besleme borusu ile emme manifolduna girer. Emme supabının açılmasıyla beraber emme manifolduna yığılı bulunan basınçlı hava silindir içerisine dolar. Şekil 3.2'de hava akış durumu gösterilmiştir (Gülyaşar 2008).

Santrifüj kompresör çarkının temel tipi eksen yönünde kıvrılmış kanatları bulunan levha biçimli bir mildir. Kanatlar döndükçe merkezden hava toplar, merkezkaç hareketi ile havayı dış kenardaki sarmal kıvrımlardan oluşan bir difüzöre doğru iterler. Bu difüzör havayı yavaşlatarak kinetik enerjiyi basınç enerjisine dönüştürür.



**Şekil 3.2:** Turbo şarjda havanın akış şeması (Özcan 2009).

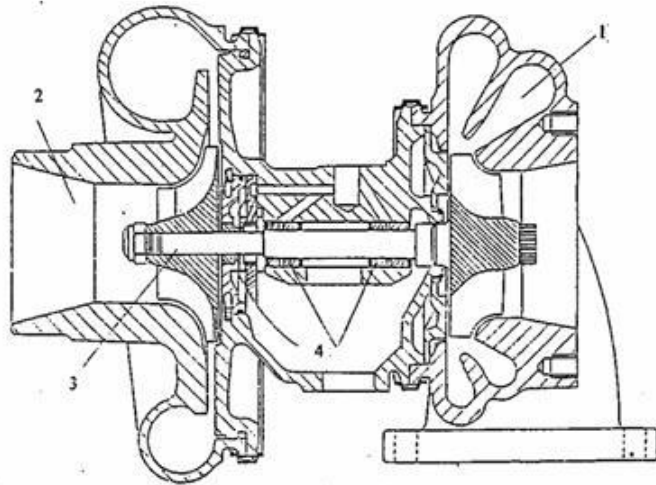
Motorun hızı arttıkça egzoz gazlarını hacmi ve buna bağlı olarak hızları artar, böylece türbin üzerindeki etkisi de artmış olur. Turbo kompresör milinin

20.000 d/d ile 120.000 d/d arasında dönebilmesi mümkündür. Böylece hız arttıkça kompresörün bastığı hava miktarı ve buna bağlı olarak da motorun verimli beygir gücü de artmaktadır. Egzoz devresinde meydana gelebilecek basınç dalgalanmalarına önleyebilecek aynı anda egzoz yapmayan iki veya üçer silindirden oluşan gruplar oluşturulur. Böylece basınç dalgalanması önlenmiş olur (Gülyaşar 2008).

### 3.4 Turbo Şarjın Yapısı

Doldurucu egzoz gazlarının enerjisiyle çalışan bir türbin tarafından tahrik edilir. Santrifüj doldurucuya benzer olarak türbinde radyal veya eksenel tipte olabilir. Ancak doldurucuların, aksine radyal tipin yanında eksenel tip türbin oldukça sık kullanılmaktadır. Eksenel tipte çap küçüldükçe kanatlarla gövde arasındaki boşluk toplam kanat alanına göre göreceli olarak büyümekte ve kaçaklar arttığı için verim düşmektedir. Bu bakımdan 150 mm'den daha küçük çaplarda eksenel tip kullanılmaz (Gülyaşar 2008).

Büyük çaplarda ise, radyal türbin durumunda imalat ve mukavemet problemleri ile karşılaşilmektedir. Bu nedenle 300 mm'den daha büyük çaplarda radyal tip kullanılmaktadır. Gerçekten radyal türbinler karışık kanat şekilleri nedeniyle daha çok döküm yoluyla imal edilmektedir. Bu bakımdan çap büyüdükçe iyi bir döküm kalitesi elde etmek ve azalan sayılar için ekonomik bir imalat gerçekleştirmek zorlaşmaktadır. Ayrıca radyal türbinlerin bütün gövdesi ısıya maruz kaldığı için çap büyüdükçe termik gerilmeler büyümektedir. Turbo şarjın kısımları Şekil 3.3'de görülmektedir.



**Şekil 3.3:** Turbo şarjın kısımları 1-Türbin; 2-Kompresör; 3-Türbin mili; 4-Yataklar (Gülyaşar 2008).

## 4. TERMOELEKTRİK JENERATÖR TASARIMI

Potur (2009)'un çalışmasında tasarımı gerçekleştirilen, FAZ-IIIB emisyon standardına cevap veren dizel traktör motorunun turbo şarj sistemi, bu tez çalışmasında kullanılarak, farklı boyutlardaki modüllere sahip Termoelektrik Jeneratör sistemi (TEJ), söz konusu sistemin kompresörü ile ara soğutucusu arasına yerleştirilmektedir. TEJ sisteminde ise 28 adet modül kullanılmaktadır. Ayrıca, bu turbo şarj sisteminin kompresörüne ait, basınç artış oranı  $p_k / p_o = 2.2$  , kompresörden çıkan havanın kütleli debisi  $\dot{m}_k = 0.162 \text{ kg/s}$  , kompresörün çıkışındaki hava sıcaklığı  $T_{\infty 1} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$  değerleri, bu çalışmada kullanılarak, farklı boyutlardaki TEJ sistemlerinin nümerik analizleri gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bu analizler, 7 farklı dış ortam sıcaklığı (268, 278, 283, 288, 293, 298 ve 303 K) için yapılmaktadır.

### 4.1 Düz Levha Tipi Kanat

Boyutları bilinen bir kanatçıklı yapının optimum kalınlık ve optimum kanat aralığını bulmak için kanat kalınlığı cinsinden fonksiyon oluşturulup Matlab programında kodlamalar yapılarak optimum kanat kalınlığı bulunmuştur. Bunun içinde maksimum ısı enerjisi için olan kanat kalınlığı, optimum kanat kalınlığı olacaktır.

Düz levha tipi kanatların kanat sayısı;

$$n_f = \frac{W_{\text{kanat}}}{z_{\text{opt}} + t} \quad (4.1)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Burada,  $W$  kanat genişliği,  $z_{\text{opt}}$  optimum kanat aralığı,  $t$  kanat kalınlığıdır.

$\beta$  değeri;

$$\beta = b \left( \frac{2h}{k_{al}t} \right) \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada,  $b$  kanat boyu,  $h$  ısı taşınım katsayısı,  $k_{al}$  alüminyumun ısı iletim katsayısıdır. Burada  $b$  kanat boyu sabit alınmıştır.

Kanat verimi;

$$\eta_f = \frac{\tanh(\beta)}{\beta} \quad (4.3)$$

ifadesiyle belirlenmektedir.

Tek kanat için ısı transfer alanı:

$$A_f = 2(L + t)b \quad (4.4)$$

şeklindedir. Burada L kanat uzunluğudur.

Düz levha tipi kanatlı yüzeye ait toplam ısı transfer alanı:

$$A_t = n_f(A_f + Lz_{opt}) \quad (4.5)$$

Kanatlı yüzey verimi:

$$\eta_o = 1 - n_f \frac{A_f}{A_t} (1 - \eta_f) \quad (4.6)$$

Düz levha tipi kanatlı yüzeyden gerçekleşen toplam ısı transferi:

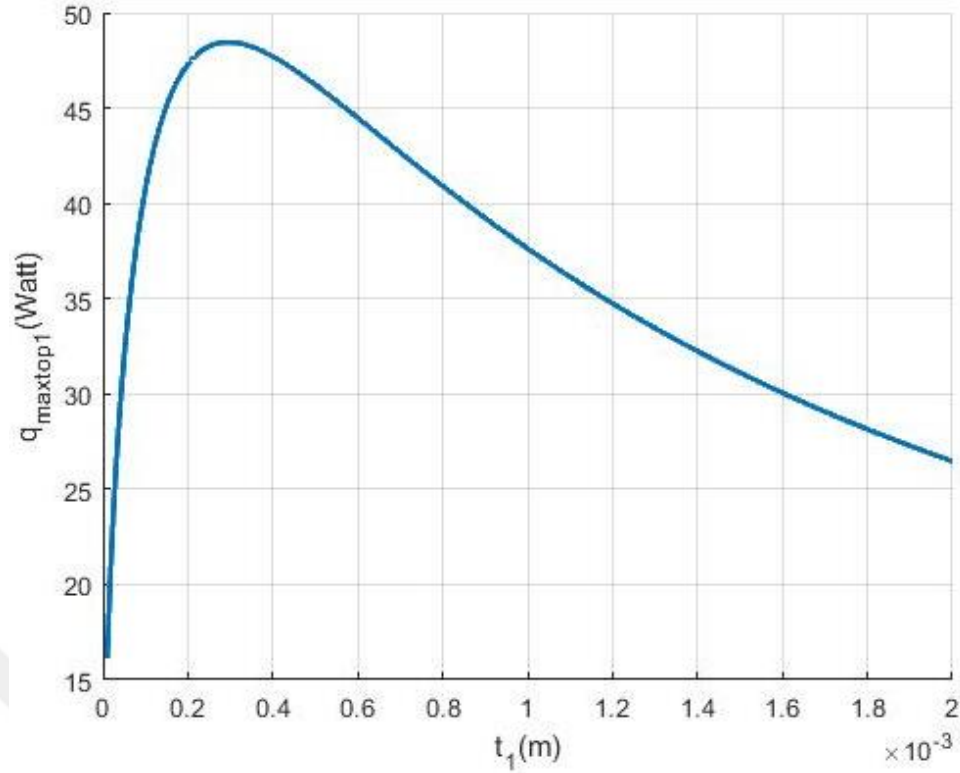
$$q_{top} = \eta_o A_t h \theta \quad (4.7)$$

bağıntısıyla elde edilmektedir. Burada  $\theta$  sıcaklık farkıdır (Lee 2010).

#### **4.1.1 Modülün Sıcak Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Optimum Kanat Kalınlığı**

Denklem (4.1) ile (4.7) arasındaki tüm eşitliklerde dâhil olmak üzere, bu eşitlikleri bir fonksiyon olarak yazarak, kanat kalınlığı; Matlab programında hesaplatılmıştır. Matlab programında yapılan kodlamalar Ek A'da gösterilmiştir.

Burada  $t_1$  kanat kalınlığı,  $t_1 = 0,00001, 0,0000101, 0,0000102, \dots, 0,002$  mm değerleri Matlab programında for döngüsü içinde konularak plot koduyla Şekil 4.1 elde edilmiştir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, maksimum  $q_{top1}$  değerinde optimum kalınlık  $t_1$  değerine ulaşılmıştır. Buna göre, elde edilen verilerle,  $q_{maxtop1} = 48.45W$ ,  $t_{opt1} = 0.295mm$ ,  $n_{f1} = 34.08$ ,  $A_{t1} = 0.0561 m^2$ ,  $\eta_{o1} = 0.7353$  elde edilmiştir (Şekil 4.1).

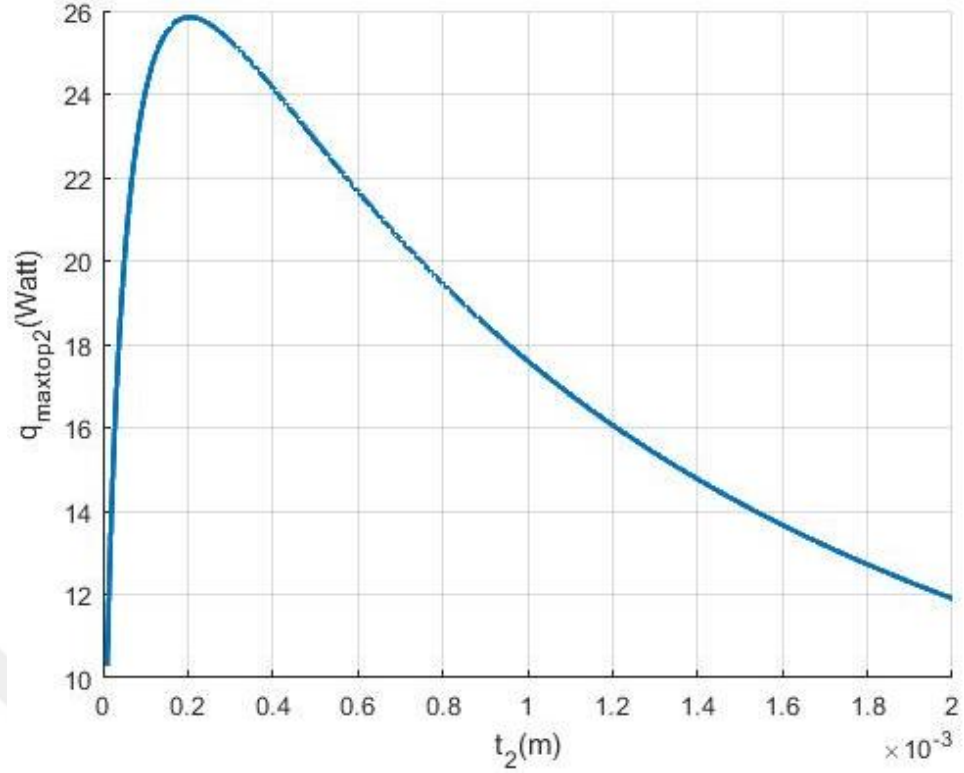


**Şekil 4.1:** TEJ modülünün sıcak yüzeyindeki düz levha tipi kanatların optimum kanat kalınlığı.

#### 4.1.2 Modülün Soğuk Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Optimum Kanat Kalınlığı

Denklem (4.1)'den ve (4.7)'e kadar tüm eşitlikler ile bu eşitliklerde bir fonksiyon olarak yazarak, kanat kalınlığı; Matlab programında hesaplatılmıştır. Kodlamalar Ek B tablosunda gösterilmiştir.

Burada  $t_2$  kanat kalınlığı,  $t_2 = 0,00001, 0,0000101, 0,0000102, \dots, 0,002$  mm değerleri Matlab programında for döngüsü içinde konularak plot koduyla Şekil 4.2 elde edilmiştir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, maksimum  $q_{top2}$  değerinde optimum kalınlık  $t_2$  değerine ulaşılmıştır. Buna göre, elde edilen verilerle ortaya çıkan optimum kalınlık değerine karşılık gelen optimum değerler sırasıyla,  $q_{max\_top2} = 25.8442$  W,  $t_{opt2} = 0.2$  mm,  $n_{f2} = 40$ ,  $A_{t2} = 0.0527$  m<sup>2</sup>,  $\eta_{o2} = 0.7880$  bulunmuştur (Şekil 4.2).



**Şekil 4.2:** TEJ modülünün soğuk yüzeyindeki düz levha tipi kanatların optimum kanat kalınlığı.

Isı makinelerinde, ısının atıldığı ısı enerji deposunun sıcaklık değeri, bu makinenin ısı verimi için çok önemlidir. Bu sıcaklık azaldıkça ısı verim artmaktadır. Bu nedenle, dış ortam sıcaklığını bir parametre olarak belirleyerek, farklı dış ortam sıcaklığı için elde edilen optimum değerler Tablo 4.1’de verilmiştir.

**Tablo 4.1:** Dış ortam sıcaklığına ( $T_{\infty 2}$ ) bağlı olarak çıkan optimum değerler.

| $T_{\infty 2} (K)$ | $z_{opt2} (mm)$ | $t_{opt2} (mm)$ | $q_{maxtop2} (W)$ | $n_{f2}$ | $A_{t2} (m^2)$ | $\eta_{o2}$ | $h_2 (W/m^2K)$ | $\theta_2$ |
|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------|----------------|-------------|----------------|------------|
| 268                | 0.7964          | 0.20460         | 25.8442           | 39.96    | 0.0527         | 0.7880      | 62.2506        | 10         |
| 278                | 0.8229          | 0.20800         | 25.1681           | 38.80    | 0.0512         | 0.7911      | 62.1389        | 10         |
| 283                | 0.8358          | 0.20960         | 24.8534           | 38.26    | 0.0505         | 0.7925      | 62.0936        | 10         |
| 288                | 0.8492          | 0.21130         | 24.5360           | 37.77    | 0.0499         | 0.7927      | 62.0431        | 10         |
| 293                | 0.8624          | 0.21300         | 24.2293           | 37.19    | 0.0491         | 0.7954      | 61.9855        | 10         |
| 298                | 0.8754          | 0.21460         | 23.9368           | 36.69    | 0.0485         | 0.7967      | 61.9389        | 10         |
| 303                | 0.8885          | 0.21620         | 23.6476           | 36.20    | 0.0479         | 0.7980      | 61.8862        | 10         |

#### 4.2 Düz Levha Tipi Kanatların Isı Taşınım Katsayıları

#### 4.2.1 Havanın İdeal Gaz Kabulü

Borunun giriş koşullarına bakıldığında;  $P_k = 222915 \text{ Pa} = 222.915 \text{ kPa}$   
 $T_{\infty 1} = 135 \text{ }^\circ\text{C} = 408 \text{ K}$ 'dir.  $z$ , sıkıştırılabilirlik çarpanı Denklem (4.8)'de verilmiştir.

$$z = \frac{Pv}{RT} \quad (4.8)$$

Ek C'de gösterilen Tablo A-1'deki hava için kritik nokta özellikleri;  $T_{kr} = 132.5 \text{ K}$ ,  $P_{kr} = 3.77 \text{ MPa}$  ve  $v_{kr} = 0.0883 \text{ m}^3/\text{kmol}$  verilmiştir. İndirgenmiş basınç  $P_R$  ve indirgenmiş sıcaklık  $T_R$ , sırasıyla Denklem (4.9) ve (4.10)'da verilmiştir (Çengel ve Boles 2015).

$$P_R = \frac{P}{P_{kr}} \quad (4.9)$$

$$T_R = \frac{T}{T_{kr}} \quad (4.10)$$

Denklem (4.9) ve (4.10) kullanılarak, indirgenmiş basınç ve indirgenmiş sıcaklık değerleri  $P_R = 0.0591$  ve  $T_R = 3.0792$  olarak hesaplanmıştır. Yüksek sıcaklıklarda ( $T_R > 2$ ), basınç çok yüksek ( $P_R \gg 1$ ) olmadığı sürece gazlar mükemmel gaz gibi davranırlar (Çengel ve Boles 2015). Bu ifadeye göre; çalışmada kullanılan hava için elde edilen,  $P_R = 0.0591$  ve  $T_R = 3.0792$  değerlerine bakıldığında, bu hava mükemmel gaz olarak kabul edilebilmektedir.

#### 4.2.2 Isı Taşınım Denklemleri

TEJ modülünün sıcak yüzey ve soğuk yüzeyleri için Reynolds sayıları, sırasıyla, Denklem (4.11) ve (4.12)'de verilmiştir.

$$Re_1 = \frac{U_1 L_1}{v_1} \quad (4.11)$$

$$Re_2 = \frac{U_2 L_{c2}}{v_2} \quad (4.12)$$

Buradaki uzunluk  $L_{c2} = L_2/2$ 'dir. TEJ modülünün sıcak yüzey ve soğuk yüzeyi için optimum kanat aralığı Denklem (4.13) ve (4.14)'de verilmiştir (Lee 2010).

$$z_{opt1} = L_1 3.24 Re_1^{-\frac{1}{2}} Pr_{hava1}^{-\frac{1}{4}} \quad (4.13)$$

$$z_{opt2} = L_{c2} 3.24 Re_2^{-\frac{1}{2}} Pr_{hava2}^{-\frac{1}{4}} \quad (4.14)$$

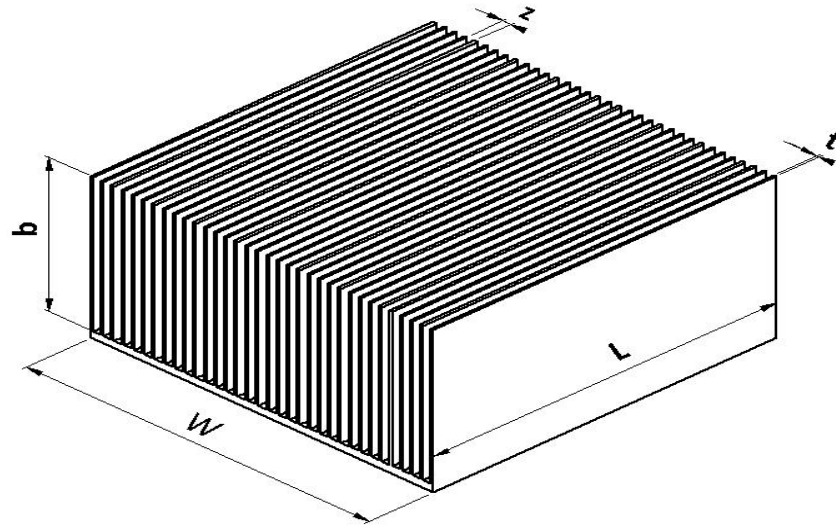
TEJ modülünün sıcak yüzey ve soğuk yüzeyleri için ısı taşınım katsayıları sırasıyla Denklem (4.15) ve (4.16) ile hesaplanmıştır (Lee 2010).

$$h_1 = \frac{k_{hava1}}{L_1} 0.664 Re_1^{\frac{1}{2}} Pr_{hava1}^{\frac{1}{3}} \quad (4.15)$$

$$h_2 = \frac{k_{hava1}}{L_{c2}} 0.664 Re_2^{\frac{1}{2}} Pr_{hava2}^{\frac{1}{3}} \quad (4.16)$$

#### 4.2.3 Modülün Sıcak Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Isı Taşınım Katsayısı

Düz levha tipi kanat boyutları Şekil 4.3’de gösterildiği gibi  $W \times L \times b$  şeklinde boyutlandırılmıştır. Burada  $W$  - genişlik,  $L$  - uzunluk,  $b$  - kanat uzunluğu(boyu),  $z$  - kanat aralığı ve  $t$  - kanat kalınlığıdır. Hesaplamalarda  $b$  – kanat uzunluğu sabit alınmıştır.



Şekil 4.3: Düz levha tipi kanatların boyutları.

TEJ sistemi içinde, sıcak yüzeydeki düz levha tipi kanatçıklı yapının boyutları;  $W_1 = 40$  mm,  $L_1 = 40$  mm,  $b_1 = 20$  mm olarak belirlenmiştir. Bir kenarı 45 mm olan düzgün sekizgen yapıdaki TEJ sisteminin kesit alanı  $0.0098 \text{ m}^2$ ’dir. Kompresörden çıkan havanın kütleli debisi  $\dot{m}_k = 0.162$  kg/s (Potur 2009) olduğu bilindiğine göre sekizgen borudaki havanın hızı,

$$U_1 = \frac{\dot{m}_k}{A_{\text{sekizgen}} d_{\text{hava}}} = \frac{0.162}{(0.0098)(1.96)} = 8.434 \text{ m / s 'dir.}$$

Burada  $d_{\text{hava}}$  havanın yoğunluğudur. Havanın yoğunluğu,  $T_f = 127.5$  °C için ideal gaz denklemi ile elde edilmiştir. TEJ’in sıcak yüzey sıcaklığının ( $T_1 = T_h$ )

genellikle ortam sıcaklığından yaklaşık 15°C daha yüksek olduğu ve böylece ısı yayılımının mümkün olabileceği varsayılmaktadır (Lee 2010). Söz konusu olan ortam sıcaklığı, bu çalışmada, Turbo şarj sisteminin kompresöründen çıkıp, TEJ sistemine giren havanın sıcaklığıdır ( $T_{\infty 1}$ ). Bu havanın termofiziksel özellikleri, film sıcaklığı için Ek D’de gösterilen Tablo A-15’de belirlenmiştir:

$$T_{\infty 1} = 135 \text{ °C ve } T_1 = 120 \text{ °C} \quad \theta_1 = 135 - 120 = 15 \text{ °C}$$

$$T_f = \frac{T_{\infty 1} + T_1}{2} = \frac{135 + 120}{2} = 127.5 \text{ °C}$$

$T_f = 127.5 \text{ °C}$  için Ek D’de gösterilen Tablo A-15’deki havanın özellikleri  $k_1 = 0.0329 \text{ W/mK}$ ,  $Pr_1 = 0.7061$ ,  $v_1 = 13.025 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ’dir (Çengel ve Ghajar 2015).

Denklem (4.11) kullanılarak TEJ modülünün sıcak yüzeyindeki düz levha tipi kanatlarındaki hava akışı için Reynolds sayısı hesaplanmıştır.

$$Re_1 = \frac{(8.434)(0.04)}{13.025 * 10^{-6}} = 25901$$

Denklem (4.13) ile TEJ modülünün sıcak yüzeyindeki düz levha tipi kanatların optimum kanat aralığı:

$$z_{opt1} = (0.04)(3.24)(25901)^{-\frac{1}{2}}(0.7061)^{-\frac{1}{4}}$$

$$z_{opt1} = 0.878 \text{ mm}$$

olarak belirlenmiştir.

TEJ modülünün sıcak yüzeyindeki düz levha tipi kanatların ısı taşınım katsayısı Denklem (4.15) ile hesaplanmıştır:

$$h_1 = \frac{0.0329}{0.04} (0.664)(25901)^{\frac{1}{2}} (0.7061)^{\frac{1}{3}}$$

$$h_1 = 78.268 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### 4.2.4 TEJ Modülünün Soğuk Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Isı Taşınım Katsayısı

Modülün soğuk yüzeyindeki kanatçıklı yapının boyutları  $W_2 = 40 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 40 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 16 \text{ mm}$  olarak belirlenmiştir. Dış ortamdaki fan tarafından sağlanan hacimsel debi,  $\dot{V}_{fan2} = 14 \text{ cfm} \cong 0.006607258 \text{ m}^3/\text{s}$ ’dir. Dış ortamdaki kanatçıklı yapının çapraz akış alanı,  $A_{c2} = b_2 W_2 = (0.016)(0.04) = (6.4)10^{-4} \text{ m}^2$ ’dir. Dış ortamdaki fandan kanatçıklı yapıya üflenilen havanın hızı,  $U_2 = (0.5)(0.006607258/(6.4)10^{-4}) = 5.162 \text{ m/s}$ ’dir.

TEJ modülünün soğuk yüzeyindeki sıcaklık ( $T_2 = T_c$ ), çevre havası sıcaklığından yaklaşık  $10^\circ\text{C}$  daha düşük olduğu ve böylece ısı yayılımının mümkün olabileceği varsayılmaktadır (Lee 2010). Film sıcaklığına göre, fan havasının özellikleri belirlenmiştir.

$$T_{\infty 2} = -5^\circ\text{C} \text{ ve } T_2 = 5^\circ\text{C} \quad \theta_1 = 5 - (-5) = 10^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{T_{\infty 2} + T_2}{2} = \frac{-5 + 5}{2} = 0^\circ\text{C}$$

$T_f = 0^\circ\text{C}$  için Ek D'de gösterilen Tablo A-15'deki havanın özellikleri  $k_1 = 0.02304 \text{ W/mK}$ ,  $Pr_1 = 0.7362$ ,  $\nu_1 = 13.38 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ' dir (Çengel ve Ghajar 2015).

Denklem (4.12) kullanılarak, TEJ modülünün sıcak yüzeyindeki düz levha tipi kanatlarındaki hava akışı için Reynolds sayısı hesaplanmıştır:

$$L_{c2} = L_2/2 = 0.02 \text{ m}$$

$$Re_1 = \frac{(5.162)(0.02)}{13.38 \times 10^{-6}} = 7715.8$$

Denklem (4.14) ile TEJ modülünün sıcak yüzeyindeki düz levha tipi kanatların optimum kanat aralığı bulunmuştur:

$$z_{opt2} = (0.02)(3.24)(7715.8)^{-\frac{1}{2}}(0.7362)^{-\frac{1}{4}}$$

$$z_{opt2} = 0.796 \text{ mm} \approx 0.8 \text{ mm}$$

TEJ modülünün soğuk yüzeyindeki düz levha tipi kanatlarından olan ısı taşınım katsayısı Denklem (4.16) ile hesaplanmıştır:

$$h_2 = \frac{0.02304}{0.02} (0.664)(7715.8)^{\frac{1}{2}}(0.7362)^{\frac{1}{3}}$$

$$h_2 = 62.2506 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### 4.3 Termoelektrik Jeneratör Modülünün Modellenmesi

TEJ modülünün sıcak yüzeyinden alınan ısı transferi, Denklem (4.17) ile verilmiştir (Lee 2017):

$$\dot{Q}_h = n \left[ (\alpha_p - \alpha_n) T_h I - \frac{1}{2} I^2 \left( \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) + \left( \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \right) (T_h - T_c) \right] \quad (4.17)$$

Denklem (4.17) sade bir şekilde yazılmak istenirse Denklem (4.18) elde edilir:

$$\dot{Q}_h = n \left[ \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c) \right] \quad (4.18)$$

Burada,

$$\alpha = |\alpha_p| + |\alpha_n| \quad (4.19)$$

$$R = \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \quad (4.20)$$

$$K = \frac{k_p A_p}{L_p} + \frac{k_n A_n}{L_n} \quad (4.21)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Burada, R elektrik direncidir ve K, termal iletkenliktir. P-tipi ve n-tipi ısı çiftlerinin benzer olduğunu varsayarsak  $R = \rho L/A$  ve  $K = kA/L$  olur, burada  $\rho = \rho_p + \rho_n$  ve  $k = k_p + k_n$  'dir.

Denklem (4.18), bilim ve endüstride yaygın olarak kullanılan ideal denklem olarak adlandırılır (Lee 2017). TEJ modülünün soğuk yüzeyinden serbest bırakılan ısı transfer miktarı Denklem (4.22) ile verilmiştir:

$$\dot{Q}_c = n \left[ \alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R + K(T_h - T_c) \right] \quad (4.22)$$

TEJ modül için termodinamiğin 1. kanunundan,  $\dot{W}_n = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c$  'dir. Toplam güç çıkışı, malzeme özellikleri açısından ifadesi, Denklem (4.23)'de verilmiştir:

$$\dot{W}_n = n[\alpha I(T_h - T_c) - I^2 R] \quad (4.23)$$

Bununla birlikte, toplam güç çıkışı, bir harici yük direnci ( $R_L$ ) ile Denklem (4.24)'de belirtilmiştir:

$$\dot{W}_n = n I^2 R_L \quad (4.24)$$

Denklem (4.23) ve (4.24) ile  $\dot{W}_n = IV_n$  eşitliği birlikte kullanılarak, toplam voltajı veren ifade elde edilmiştir. Bu ifade, Denklem (4.25)'de verilmiştir (Lee 2017):

$$V_n = n I R_L = n[\alpha(T_h - T_c) - IR] \quad (4.25)$$

#### 4.4 Bir TEJ Modülünün Performans Parametreleri

Denklem (4.25) kullanılarak, TEJ modülünün elektrik akımı;

$$I = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R_L + R} \quad (4.26)$$

olarak elde edilmektedir.

Akımın (I), ısı çiftlerinin sayısından bağımsız olduğunu unutmamak gerekir. Denklem (4.26)'yı Denklem (4.25)'de yerine koyarsak, TEJ modülünün gerilimi Denklem (4.27) gibi olmaktadır:

$$V_n = \frac{n\alpha(T_h - T_c)}{\frac{R_L}{R} + 1} \left( \frac{R_L}{R} \right) \quad (4.27)$$

Denklem (4.24)'ün, Denklem (4.26)'ya göre yeniden düzenlenmesi ile güç çıkışı:

$$\dot{W}_n = \frac{n\alpha^2(T_h - T_c)^2}{R} \frac{\frac{R_L}{R}}{\left(1 + \frac{R_L}{R}\right)^2} \quad (4.28)$$

şeklinde elde edilmektedir.

TEJ modülünün ısı verimliliği;

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_n}{\dot{Q}_h} \quad (4.29)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Denklem (4.29)'un Denklem (4.18) ve (4.28)'e göre yeniden düzenlenmesi ile TEJ modülünün ısı verimliliği;

$$\eta_{th} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \left(\frac{R_L}{R}\right)}{\left(1 - \frac{R_L}{R}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{1}{2Z\bar{T}} \left(1 - \frac{R_L}{R}\right)^2 \left(1 + \frac{T_c}{T_h}\right)} \quad (4.30)$$

olarak da ifade edilebilmektedir.

Burada,  $\bar{T} = \frac{T_h + T_c}{2}$  şeklinde ortalama sıcaklık değerini göstermektedir. Carnot ısı verimliliğinin  $\eta_c = (1 - T_c/T_h)$  olduğu belirtilmektedir (Lee 2017).

#### 4.5 Bir Termoelektrik Jeneratör Modülü İçin Maksimum Parametreler

Maksimum akım, Denklem (4.26)'da,  $R_L = 0$  (dış direncin olmaması) olduğunda, yani kısa devre yapıldığında, modül için maksimum akım değeri Denklem (4.31)'deki gibi olmaktadır:

$$I_{max} = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R} \quad (4.31)$$

Maksimum voltaj ise, doğal olarak Denklem (4.25)'de  $I=0$  (akım değeri sıfır) olduğunda, yani açık devrede meydana gelmektedir. Denklem (4.32)'de maksimum voltaj değeri verilmiştir:

$$V_{\max} = n\alpha(T_h - T_c) \quad (4.32)$$

Maksimum güç çıkışı, Denklem (4.28)'de verilen güç çıkışının, yük direncinin ( $R_L$ ) iç dirence ( $R$ ) oranına göre türevi alınıp sıfıra eşitlenmesi ile elde edilir. Sonuç olarak  $R_L/R = 1$  olduğunda bir ilişki ortaya çıkarır ve bu da maksimum güç çıkışıdır:

$$\dot{W}_{\max} = \frac{n\alpha^2(T_h - T_c)^2}{4R} \quad (4.33)$$

Maksimum ısı verimliliği, yük direncinin iç dirence oranına ve bu direncin sıfıra ayarlanmasına göre Denklem (4.30)'un yeniden düzenlenmesi ile elde edilebilir. Sonuç olarak  $R_L/R = \sqrt{1 + ZT}$  ile bir ilişki ortaya çıkarmaktadır. Denklem (4.34)'de maksimum ısı verim ( $\eta_{\max}$ ) oluşmaktadır:

$$\eta_{\max} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (4.34)$$

$I_{\max}$ ,  $V_{\max}$ ,  $\dot{W}_{\max}$  ve  $\eta_{\max}$  olmak üzere toplam dört temel maksimum parametre vardır. Bununla birlikte, maksimum güç verimliliği de vardır. Maksimum güç verimliliği, Denklem (4.30)'da  $R_L/R = 1$  olmasına izin verilerek elde edilir. Denklem (4.35)'de maksimum güç verimliliği ( $\eta_{mp}$ ) verilmiştir:

$$\eta_{mp} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)}{2 - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{2}{ZT}\left(1 + \frac{T_c}{T_h}\right)} \quad (4.35)$$

İki ısı verimliliği vardır: maksimum güç verimliliği  $\eta_{mp}$  ve maksimum ısı verimliliği  $\eta_{\max}$  (Lee 2017).

#### 4.6 Etkin Malzeme Özellikleri

Gerçek materyal özelliklerine sahip ideal denklemleri kullanarak hesaplanan performans eğrileri, ticari bir termoelektrik modülün ölçülen performans eğrileri ile karşılaştırıldığında genellikle önemli tutarsızlıklar gösterir çünkü ideal denklemler termal ve elektrik temas direnci (üretilebilirlik), Thomson etkisi (sıcaklık bağımlılığı) ve ısı kayıpları (mükemmel izolasyon yok) gibi çeşitli kayıpları içermez. Sorun

çeşitli kayıpların anlaşılması çok zordur, genellikle bilinmez. Bir sistemin tasarımında bu kayıpları içeren etkin malzeme özelliklerini geliştirmemizin nedeni budur. Aşağıdaki yöntem etkin malzeme özelliklerini nasıl belirleyeceğinizi göstermektedir (Lee 2017).

Daha önce belirtildiği gibi, dört maksimum parametre genellikle bir ticari modülün spesifikasyonu olarak üreticiler tarafından sağlanır. Fakat, modül için termoelektrik malzeme özellikleri ( $\alpha$ ,  $\sigma$  ve  $k$ ) genellikle imalatçılar tarafından verilmez, ki bu ideal denklemleri kullanarak modül işlemini simüle etmek isteyen sistem tasarımcıları için sıklıkla bir soruna neden olur. Isıl çiftin verilen geometrisi ( $A / L$ ) ve  $T_h$  ve  $T_c$  arasındaki iki bağlantı sıcaklığı ile üç malzeme özelliklerinin ( $\alpha$ ,  $\sigma$  ve  $k$ ) ideal bir fonksiyonu olan dört tane maksimum parametreye sahibiz ( $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $\dot{W}_{max}$  ve  $\eta_{mp}$ ). Üç malzeme özelliği, ideal olarak dört maksimum parametrenin üçü ile ifade edilebilir. Bu, iki parametrenin ( $I_{max}$  ve  $\eta_{mp}$ ) gerekli olduğunu ve  $V_{max}$  ya da  $\dot{W}_{max}$  'dan birinin kullanılabileceğini ortaya çıkardı. Üreticinin sunduğu dört maksimum parametreler ile bu üç malzeme özelliklerini çıkarmak istiyoruz. Bunlar bizi, iki parametreden birini ( $V_{max}$  ve  $\dot{W}_{max}$ ) ve gerekli iki parametreden ( $I_{max}$  ve  $\eta_{mp}$ ) birini seçmemizi zorlar. Güç çıkışının pratik önemi nedeniyle maksimum gerilim yerine maksimum güç çıkışını seçiyoruz. Etkin malzeme özellikleri burada üreticiler tarafından sağlanan maksimum parametrelerden çıkarılan gerçekçi malzeme özellikleri olarak tanımlanmaktadır. Hesaplanan etkin malzeme özellikleri, esas malzeme özelliklerine ek olarak termal ve elektrik temas direnci, özelliklerin sıcaklık bağımlılığı ve çevreye ısı kaybı nedeniyle her türlü kayıpları içerir. Bu, etkin malzeme özelliklerinin gerçek malzeme özelliklerinkinden biraz daha düşük olan boyutsuz bir değerlilik sayısının oluşmasına neden olur (Lee 2017). Denklem (4.36)'daki etkin elektrik öz direnci, Denklem (4.28) ve (4.30) kullanılarak elde edilir:

$$\rho^* = \frac{4(A/L)\dot{W}_{max}}{n(I_{max})^2} \quad (4.36)$$

Denklem (4.37)'deki etkin Seebeck katsayısı, Denklem (4.27) ve (4.68) kullanılarak elde edilir:

$$\alpha^* = \frac{4\dot{W}_{max}}{nI_{max}(T_h - T_c)} \quad (4.37)$$

Denklem (4.38)'deki etkin  $Z^*$  değer sayısı Denklem (4.34)'den elde edilir:

$$Z^* = \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{1 + \frac{\eta_{\max}}{\eta_c} \left( \frac{T_c}{T_h} \right)}{1 - \frac{\eta_{\max}}{\eta_c}} \right)^2 - 1 \right] \quad (4.38)$$

Burada  $\eta_c = (1 - T_c/T_h)$  Carnot ısı verimliliğidir. Alternatif olarak, etkin  $Z^*$  değer sayısı Denklem (4.35)'deki  $\eta_{mp}$  açısından Denklem (4.39) oluşur:

$$Z^* = \frac{\frac{2}{T} \left( 1 + \frac{T_c}{T_h} \right)}{\eta_c \left( \frac{1}{\eta_{mp}} + \frac{1}{2} \right) - 2} \quad (4.39)$$

Denklem (4.40)'daki etkin ısı iletim katsayısı, Denklem (4.38)'den elde edilen  $Z^*$  ile elde edilir:

$$k^* = \frac{(\alpha^*)^2}{\rho^* Z^*} \quad (4.40)$$

Etkin malzeme özellikleri temas direnci, Thomson etkisi ve radyasyon ve konveksiyon ısı kayıpları gibi çeşitli etkileri içerir. Bu etkin özelliklerin p-tipi ve n-tipi termoelementlerden dolayı ikiye bölünmesi gerektiğini unutmamak gerekir (Lee 2017).

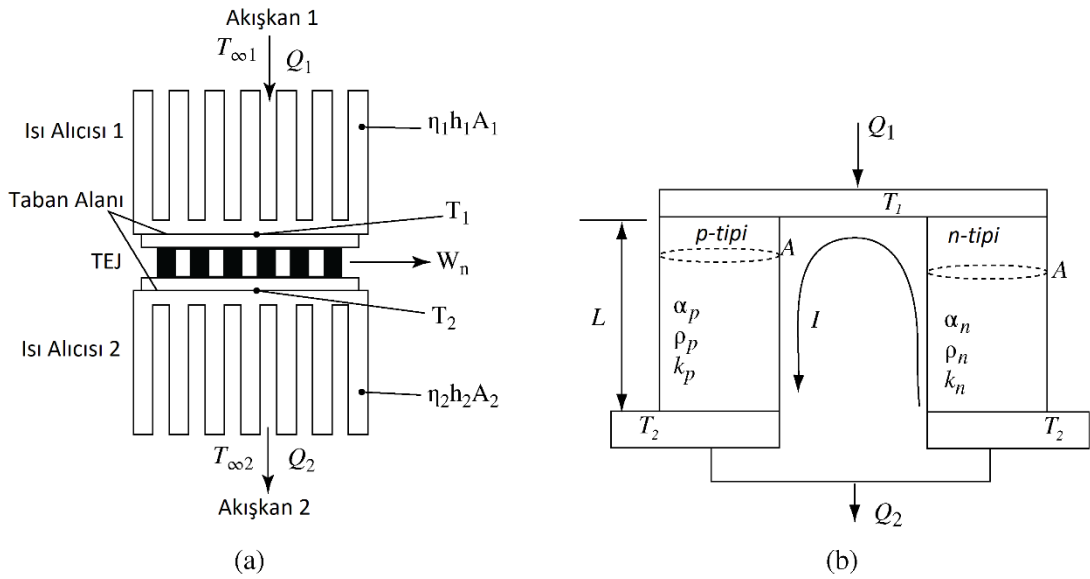
#### 4.6.1 Seçilen TEJ Modülünün Etkin Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada, Modül olarak  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  yarı iletken malzemesine sahip olan ticari TEJ modülü olan TGM199-1.4-2.0 modülü seçilmiştir ve bu ticari modülün maksimum parametre özellikleri;  $I_{\max} = 2.65 \text{ A}$ ,  $V_{\max} = 11 \text{ V}$ ,  $\eta_{\max} = \%5.3$  ve  $W_{\max} = 7.3 \text{ W}$  ve etkin malzeme özellikleri  $\alpha^* = 162.8 \text{ } \mu\text{V/K}$ ,  $k^* = 0.015 \text{ W/cmK}$ ,  $\rho^* = 1.024 * 10^{-3} \Omega\text{cm}$  olarak verilmiştir (Lee 2017).

Burada,  $\alpha^*$  etkin Seebeck katsayısı,  $k^*$  etkin ısı iletim katsayısı ve  $\rho^*$  etkin elektriksel öz dirençtir.  $I_{\max}$  maksimum akım,  $V_{\max}$  maksimum voltaj,  $\eta_{\max}$  maksimum verim ve  $W_{\max}$  maksimum güç; TGM199-1.4-2.0 ticari TEJ modülünün maksimum parametre çıktılarıdır. Ticari TEJ modülü TGM199-1.4-2.0'nin geometri özellikleri,  $A_e = 1.96 \text{ mm}^2$ ,  $L = 2 \text{ mm}$  ve  $n = 199$  şeklindedir.  $A_e$  - bir elementin kesit alanı,  $L$  - bir elementin bacak uzunluğu,  $n$  - ısı çift sayısıdır.

#### 4.7 Termoelektrik Jeneratörler için En Uygun Tasarım

Şekil 4.4 (a)'da gösterildiği gibi, iki düz levha tipi kanatçıklı yapılara sahip bir TEJ modülü üzerinde basitleştirilmiş bir kararlı rejimli ısı transferi düşünelim. Her bir düz levha tipi kanatlı yapılar,  $T_\infty$  sıcaklığında bir akışkan akışıyla karşı karşıyadır. Alt indis 1 ve 2, sırasıyla sıcak ve soğuk sıcaklıkları belirtir. TEJ'deki elektriksel ve termal temas direncinin önemsiz olduğunu, malzemenin sıcaklığından bağımsız olduğunu ve ayrıca TEJ'nin mükemmel bir şekilde izole edildiğini varsayıyoruz. TEJ'de, her ısı çiftin Şekil 4.4 (b)'de gösterildiği gibi aynı boyutlara sahip, p-tipi ve n-tipi termoelementlerden oluşan bir dizi ısı çifti vardır. Düz levha tipi kanatçıklı yapının (1) ısı direncinin, taşınım iletkenliği  $\eta_1 h_1 A_1$ 'e karşılık gelen değeri ile ifade edilebileceği belirtilmektedir; burada  $\eta_1$  kanat yüzey verimi,  $h_1$  taşınım katsayısı ve  $A_1$  düz levha tipi kanatçıklı yapının toplam yüzey alanıdır. Bundan sonra ısı direncinden ziyade taşınım iletkenliğini kullanıyoruz (Lee 2017).



**Şekil 4.4:** (a) İki kanatçıklı yapıya sahip termoelektrik jeneratör modülü (TEJ) ve (b) ısı çifti (Lee 2017).

İki düz levha tipi kanatçıklı yapıya sahip TEJ için temel denklemler (4.41)'den (4.45)'e kadar olan eşitlikler verilmiştir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_1 = \eta_1 h_1 A_1 (T_{\infty 1} - T_1) \quad (4.41)$$

$$\dot{Q}_1 = n \left( \alpha I T_1 - \frac{1}{2} I^2 R + \frac{Ak}{L} (T_1 - T_2) \right) \quad (4.42)$$

$$\dot{Q}_2 = n \left( \alpha I T_2 + \frac{1}{2} I^2 R + \frac{Ak}{L} (T_1 - T_2) \right) \quad (4.43)$$

$$\dot{Q}_2 = \eta_2 h_2 A_2 (T_2 - T_{\infty 2}) \quad (4.44)$$

$$I = \frac{\alpha(T_1 - T_2)}{R_L + R} \quad (4.45)$$

Burada,  $\alpha = |\alpha_p| + |\alpha_n|$ ,  $k = k_p + k_n$  ve  $\rho = \rho_p + \rho_n$  'dir. Denklem (4.41)'den (4.45)'e kadar olan denklemler ile  $T_1$  ve  $T_2$  (sırasıyla  $T_h$  ve  $T_c$ ) çözülebilir. Fakat TEJ optimizasyonunu incelemek için, birçok boyutsuz parametre eklenmiştir. Denklem (4.46)'daki boyutsuz termal iletkenlik, akışkan 2'deki ısı iletkenliğinin ısı taşınımına oranıdır (Lee 2017).

$$N_k = \frac{n(Ak/L)}{\eta_2 h_2 A_2} \quad (4.46)$$

Denklem (4.47)'deki boyutsuz taşınım, akışkan 1'deki ısı taşınımının akışkan 2'deki ısı taşınımına oranıdır:

$$N_h = \frac{\eta_1 h_1 A_1}{\eta_2 h_2 A_2} \quad (4.47)$$

Denklem (4.48)'deki boyutsuz elektrik direnci, yük direncinin dâhili(iç) elektrik direncine oranıdır:

$$R_r = \frac{R_L}{R} \quad (4.48)$$

Boyutsuz sıcaklıklar Denklem (4.49), (4.50) ve (4.51)'de verilmiştir:

$$T_1^* = \frac{T_1}{T_{\infty 2}} \quad (4.49)$$

$$T_2^* = \frac{T_2}{T_{\infty 2}} \quad (4.50)$$

$$T_{\infty}^* = \frac{T_{\infty 1}}{T_{\infty 2}} \quad (4.51)$$

(4.52) ve (4.53) eşitliklerinde iki boyutsuz ısı transferi oranı ve (4.54) eşitliğinde boyutsuz güç çıkışı verilmiştir.

$$Q_1^* = \frac{\dot{Q}_1}{\eta_2 h_2 A_2 T_{\infty 2}} \quad (4.52)$$

$$Q_2^* = \frac{\dot{Q}_2}{\eta_2 h_2 A_2 T_{\infty 2}} \quad (4.53)$$

$$W_n^* = \frac{\dot{W}_n}{\eta_2 h_2 A_2 T_{\infty 2}} \quad (4.54)$$

Yukarıdaki boyutsuz parametrelerin başlangıçta  $\eta_2 h_2 A_2 T_{\infty 2}$ 'nin sağlanması gerektiği anlamına gelen akışkan 2'deki ısı taşınımına dayandığına dikkat edilmelidir. Denklem (4.46)'dan (4.51)'e kadar olan tüm denklemlerde tanımlanan

boyutsuz parametreleri kullanarak Denklem (4.41)'den (4.45)'e kadar olan eşitlikler ile Denklem (4.55) ve (4.56) eşitlikleri gibi iki eşitliğe indirgenir:

$$\frac{N_h(T_\infty^* - T_1^*)}{N_k} = \frac{ZT_{\infty 2}(T_1^* - T_2^*)T_1^*}{R_r + 1} - \frac{ZT_{\infty 2}(T_1^* - T_2^*)^2}{2(R_r + 1)^2} + (T_1^* - T_2^*) \quad (4.55)$$

$$\frac{T_2^* - 1}{N_k} = \frac{ZT_{\infty 2}(T_1^* - T_2^*)T_2^*}{R_r + 1} + \frac{ZT_{\infty 2}(T_1^* - T_2^*)^2}{2(R_r + 1)^2} + (T_1^* - T_2^*) \quad (4.56)$$

Burada Z - değerlik katsayısı olarak adlandırılır ( $Z = \alpha^2/\rho k$ ). Denklem (4.52) ve (4.53),  $T_1^*$  ve  $T_2^*$  için çözülebilir. Denklem (4.57) ve (4.58)'deki boyutsuz sıcaklıklar, beş bağımsız boyutsuz parametrenin bir fonksiyonudur.

$$T_1^* = f(N_k, N_h, R_r, T_\infty^*, ZT_{\infty 2}) \quad (4.57)$$

$$T_2^* = f(N_k, N_h, R_r, T_\infty^*, ZT_{\infty 2}) \quad (4.58)$$

$T_\infty^*$  bir girdidir ve  $ZT_{\infty 2}$  girdisi malzeme özelliğidir ve her ikisi de başlangıçta sağlanır. Bu yüzden, optimizasyon yalnızca ilk üç parametre ( $N_k, N_h$  ve  $R_r$ ) ile gerçekleştirilebilir.

İki boyutsuz sıcaklıklar ( $T_1^*$  ve  $T_2^*$ ) çözüldükten sonra, TEJ'in hem sıcak hem de soğuk bağlantı noktalarındaki boyutsuz ısı transfer değerleri, Denklem (4.59) ve (4.60) ile elde edilebilir:

$$Q_1^* = N_h(T_\infty^* - T_1^*) \quad (4.59)$$

$$Q_2^* = T_2^* - 1 \quad (4.60)$$

Daha sonra Denklem (4.61) ile boyutsuz güç çıktısı elde edilir:

$$W_n^* = Q_1^* - Q_2^* \quad (4.61)$$

Buna göre, ısı verimlilik Denklem (4.62)'de verilmiştir:

$$\eta_{th} = \frac{W_n^*}{Q_1^*} \quad (4.62)$$

$N_I = \alpha IL/Ak$ 'i tanımlarken, boyutsuz akım Denklem (4.63) ile bulunur:

$$N_I = \frac{ZT_{\infty 2}(T_1^* - T_2^*)}{R_r + 1} \quad (4.63)$$

$N_V = V/n\alpha T_{\infty 2}$ 'yi tanımlarken, boyutsuz voltaj Denklem (4.64) ile elde edilir:

$$N_V = \frac{W_n^*}{N_I N_k} \quad (4.64)$$

Girişler ( $T_\infty^*$  ve  $ZT_{\infty 2}$ ) ile boyutsuz parametrelerin ( $N_k, N_h$  ve  $R_r$ ) optimizasyonu, birbirine yaklaşıp kadar tekrar tekrar geliştirmeye başlanır.  $N_h$ , boyutsuz güç çıkışının  $N_h$  arttıkça monoton olarak arttığını gösteren en uygun değeri

göstermezken hem  $N_k$  hem de  $R_r$ 'nin boyutsuz güç çıkışı için optimum değerlerini gösterdikleri öğrenilir. Bu, eğer  $N_h$  verilirse,  $N_k$  ve  $R_r$  'nin optimum kombinasyonunun elde edilebileceğini ima eder (Lee 2017).

#### 4.7.1 Termoelektrik Jeneratörler için En Uygun Tasarımın Bulunması

Seçilen TEJ modülü, TGM199-1.4-2.0'in malzeme özellikleri,  $\alpha = |\alpha_p| + |\alpha_n| = 325,6 \times 10^{-6} \text{ V/K}$  ,  $\rho = \rho_p + \rho_n = 2,048 \times 10^{-5} \Omega\text{m}$  ve  $k = k_p + k_n = 3 \text{ W/mK}$ 'dir.

Düz levha tipi kanat yüzey verimleri, ısı taşınım katsayıları ve kesit alanları sırasıyla,  $\eta_1 = 0.7353$ ,  $h_1 = 78.268 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $A_1 = 0.0561 \text{ m}^2$  ve  $\eta_2 = 0.7880$ ,  $h_2 = 62.2506 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $A_2 = 0.0527 \text{ m}^2$ 'dir.

Denklem (4.47)'nin hesaplanabilmesi için önce taşınım iletkenlikleri hesaplanmıştır:

$$\eta_1 h_1 A_1 = (0.7353)(78.268)(0.0561) = 3.2286 \text{ W/K}$$

$$\eta_2 h_2 A_2 = (0.7880)(62.2506)(0.0527) = 2.5851 \text{ W/K}$$

Değerlik katsayısı (Figure of Merit):

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} = \frac{(325.6 \times 10^{-6})^2}{(2.048 \times 10^{-5})(3)} = 0.0017 \text{ K}^{-1}$$

$$ZT_{\infty 2} = (0.0017)(268) = 0.4624$$

Denklem (4.51)'deki boyutsuz akışkan sıcaklığı bir girdi olduğu için hesaplanmıştır:

$$T_{\infty}^* = \frac{T_{\infty 1}}{T_{\infty 2}} = \frac{408.15}{268} = 1.5229$$

Denklem (4.41)'deki boyutsuz taşınım iletkenliği hesaplanmıştır:

$$N_h = \frac{\eta_1 h_1 A_1}{\eta_2 h_2 A_2} = \frac{3.2285}{2.5851} = 1.2489$$

Denklem (4.55) ve (4.56)'da hesaplanan değerler yerlerine konulduğunda 4 bilinmeyenli 2 denklem oluşmuştur. Bu denklemlerden  $T_1^*$  ve  $T_2^*$  bulunabilmesi için  $R_r$  ve  $N_k$  değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için bu değerler Matlab programında artırımı değerler olarak girilmiştir. Bulunan değerlerde en uygun tasarım için maksimum güç çıktısı baz alınarak en uygun değerlere ulaşılmıştır.

Buna göre,  $T_{\infty 2} = 268 \text{ K} = -5^\circ\text{C}$ ,  $N_h = 1.2489$ ,  $T_{\infty}^* = 1.523$  ve  $ZT_{\infty 2} = 0.462$  için en uygun parametreler elde edilmiştir.

Bu parametreler  $W^* = 0.00344$ ,  $R_r = 1.261$ ,  $N_k = 0.439$ ,  $T_1^* = 1.405$ ,  $T_2^* = 1.143$ ,  $\eta_{th} = 0.0234$ ,  $N_I = 0.143$  ve  $N_V = 0.1462$  olmuştur.

Denklem (4.49) ve (4.50)'deki boyutsuz sıcaklıklar cinsinden, sıcak ve soğuk birleşme yeri sıcaklıkları hesaplanmıştır:

$$T_h = T_1 = (1.405)(268) = 376.65\text{K}$$

$$T_c = T_2 = (1.143)(268) = 306.41\text{K}$$

Denklem (4.63)'deki boyutsuz akımı kullanarak akım hesaplanmıştır:

$$I = 0.0536 \frac{(3)(1.96 * 10^{-6})}{(326 * 10^{-6})(2 * 10^{-3})} = 0.484 \text{ A}$$

Denklem (4.64)'deki boyutsuz voltaj tanımını kullanarak voltaj hesaplanmıştır:

$$V_n = N_V n \alpha T_{\infty 2} = (0.1462)(199)(325.6 * 10^{-6})(268) = 2.5387 \text{ V}$$

Güç çıkışı ise şöyle hesaplanmıştır:

$$W_n = V_n I = (2.5387)(0.484) = 1.23\text{W}$$

Dış çevre sıcaklığının  $-5^\circ\text{C}$  değeri için yapılan ve yukarıda ayrıntılı olarak açıklanan analizler, diğer 6 farklı çevre sıcaklığına göre de, Matlab programında yeniden yapılarak, çıkan boyutsuz sonuçlar Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Daha sonra Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin,  $T_{\infty 2}$ 'ye bağlı olarak çıkan optimum değerleri de yine 6 farklı çevre sıcaklığı için elde edilmiş ve Tablo 4.3'de gösterilmiştir. Matlab program kodlamaları Ek E ve Ek F'de verilmiştir.

**Tablo 4.2:** Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin,  $T_{\infty 2}$ 'ye bağlı olarak çıkan optimum boyutsuz değerleri.

| $T_{\infty 2}(\text{K})$ | $N_h$  | $T_{\infty}^*$ | $R_r$ | $N_k$ | $W^*$   | $T_1^*$ | $T_2^*$ | $\eta_{th}$ | $N_I$  | $N_V$  |
|--------------------------|--------|----------------|-------|-------|---------|---------|---------|-------------|--------|--------|
| 268                      | 1.2489 | 1.523          | 1.261 | 0.439 | 0.00344 | 1.405   | 1.143   | 0.0234      | 0.0536 | 0.1462 |
| 278                      | 1.2828 | 1.468          | 1.264 | 0.443 | 0.00288 | 1.364   | 1.129   | 0.0217      | 0.0498 | 0.1306 |
| 283                      | 1.2992 | 1.442          | 1.266 | 0.445 | 0.00263 | 1.345   | 1.123   | 0.0208      | 0.0478 | 0.1235 |
| 288                      | 1.3156 | 1.417          | 1.268 | 0.447 | 0.00239 | 1.326   | 1.117   | 0.0199      | 0.0458 | 0.1168 |
| 293                      | 1.3337 | 1.393          | 1.269 | 0.449 | 0.00216 | 1.308   | 1.111   | 0.0191      | 0.0439 | 0.1096 |
| 298                      | 1.3490 | 1.369          | 1.271 | 0.451 | 0.00195 | 1.290   | 1.105   | 0.0182      | 0.0419 | 0.1032 |
| 303                      | 1.3640 | 1.347          | 1.273 | 0.452 | 0.00176 | 1.273   | 1.099   | 0.0174      | 0.04   | 0.0973 |

**Tablo 4.3:** TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin,  $T_{\infty 2}$ 'ye bağılı olarak çıkan optimum ticari değerleri.

| $T_{\infty 2}$ (K) | $W_n$ (W) | $T_1$ (K) | $T_2$ (K) | $\eta_{th}$ (%) | $I$ (A) | $V_n$ (V) |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------|-----------|
| 268                | 1.2287    | 376.65    | 306.41    | 2.34            | 0.4840  | 2.5387    |
| 278                | 1.058     | 379.35    | 314.13    | 2.17            | 0.4497  | 2.3525    |
| 283                | 0.977     | 380.67    | 317.95    | 2.08            | 0.4316  | 2.2646    |
| 288                | 0.901     | 381.96    | 321.76    | 1.99            | 0.4136  | 2.1796    |
| 293                | 0.824     | 383.25    | 325.56    | 1.91            | 0.3964  | 2.0807    |
| 298                | 0.754     | 384.49    | 329.33    | 1.82            | 0.3783  | 1.9927    |
| 303                | 0.7       | 385.74    | 333.04    | 1.74            | 0.3612  | 1.9103    |

#### 4.8 Normalleştirilmiş Parametreler

Gerçek değerleri maksimum değerlerle bölersek, bir termoelektrik jeneratörün özelliklerini normalleştirebiliriz (Lee 2017). Denklem (4.66)'daki normalleştirilmiş güç çıkışı Denklem (4.28)'i Denklem (4.33)'e bölerek elde edilebilir:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{W}_{\max}} = \frac{4 \frac{R_L}{R}}{\left(\frac{R_L}{R} + 1\right)^2} \quad (4.66)$$

Denklem (4.26), Denklem (4.31)'e bölünerek Denklem (4.67)'deki normalize elde edilir:

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{1}{\frac{R_L}{R} + 1} \quad (4.67)$$

Denklem (4.27)'i (4.32)'e bölerek, normalize edilmiş voltaj:

$$\frac{V_n}{V_{\max}} = \frac{\frac{R_L}{R}}{\frac{R_L}{R} + 1} \quad (4.68)$$

şeklinde elde edilir.

Denklem (4.30)'u (4.34)'e bölerek ise normalleştirilmiş ısı verim bulunur:

$$\frac{\eta_{th}}{\eta_{\max}} = \frac{\frac{R_L}{R} \left( \sqrt{1+Z\bar{T}} + \frac{T_c}{T_h} \right)}{\left[ \left( \frac{R_L}{R} + 1 \right) - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{T_c}{T_h} \right) + \frac{1}{2Z\bar{T}} \left( \frac{R_L}{R} + 1 \right)^2 \left( 1 + \frac{T_c}{T_h} \right) \right] \left( \sqrt{1+Z\bar{T}} - 1 \right)} \quad (4.69)$$

Denklem (4.69),  $T_c/T_h$ ,  $R_L/R$  ve  $Z\bar{T}$  olmak üzere üç parametrenin bir fonksiyonu iken Denklem (4.66)'dan (4.68)'e kadar olan normalize edilmiş ifadeler ise  $R_L/R$ 'nin bir fonksiyonudur. Burada  $\bar{T} = \frac{T_1+T_2}{2}$  'dir (Lee 2017).

#### 4.8.1 Normalleştirilmiş Parametrelerin Hesaplanması

Denklem (4.66), (4.67), (4.68) ve (4.69) kullanılarak,  $T_{\infty 2} = 268K$  için normalleştirilmiş parametreler hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned}\frac{\dot{W}}{\dot{W}_{\max}} &= \frac{(4)(1.261)}{(1.261 + 1)^2} = 0.9867 \\ \frac{I}{I_{\max}} &= \frac{1}{1.261 + 1} = 0.4423 \\ \frac{V_n}{V_{\max}} &= \frac{1.261}{1.261 + 1} = 0.5577 \\ \frac{\eta_{th}}{\eta_{\max}} &= \frac{1.261 \left( \sqrt{1 + 0.6049} + \frac{306.41}{376.65} \right)}{\left[ (1.261 + 1) - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{306.41}{376.65} \right) + \frac{1}{2(0.6049)} (1.261 + 1)^2 \left( 1 + \frac{306.41}{376.65} \right) \right]} \\ &= \frac{1}{(\sqrt{1 + 0.6049} - 1)} \\ \frac{\eta_{th}}{\eta_{\max}} &= 1\end{aligned}$$

**Tablo 4.4:**  $T_{\infty 2}$ 'ye bağlı olarak elde edilen normalleştirilmiş değerler.

| $T_{\infty 2}(K)$ | $\dot{W}/\dot{W}_{\max}$ | $I/I_{\max}$ | $V_n/V_{\max}$ | $\eta_{th}/\eta_{\max}$ |
|-------------------|--------------------------|--------------|----------------|-------------------------|
| 268               | 0.9867                   | 0.4423       | 0.5577         | 1                       |
| 278               | 0.9864                   | 0.4417       | 0.5583         | 1                       |
| 283               | 0.9862                   | 0.4413       | 0.5587         | 1                       |
| 288               | 0.9860                   | 0.4409       | 0.5591         | 1                       |
| 293               | 0.9859                   | 0.4407       | 0.5593         | 1                       |
| 298               | 0.9858                   | 0.4403       | 0.5597         | 1                       |
| 303               | 0.9856                   | 0.4399       | 0.5601         | 1                       |

## 4.9 Basınç Kayıpları

### 4.9.1 Düz Levha Tipi Kanatlardaki Basınç Kaybı

Düz levha tipi kanatlardaki her kanalın hidrolik çapı, Denklem (4.70)'de ve Reynolds sayısı da Denklem (4.71)'de gösterilmiştir:

$$D_{h,h} = \frac{4(b_{sh}z_s)}{2(b_{sh} + z_s)} \quad (4.70)$$

$$Re_h = \frac{U_h D_{h,h}}{v_h} \quad (4.71)$$

Reynolds sayısının 2300'den büyük olması türbülanslı akış olarak nitelendirilir ve Reynolds sayısının 2300'den küçük olduğu durumda laminar akış olarak nitelendirilir. Bununla birlikte, bu her iki durum içinde farklı Fanning sürtünme faktörleri (Fanlama yani fan hızı tarafından oluşan pürüzlü yüzeylerdeki sürtünme) vardır. Denklem (4.72)'de laminar Fanning sürtünme faktörü verilmiştir (Lee 2017):

$$f_h = \frac{24}{Re_h} \quad (4.72)$$

Fanning sürtünme faktörü (Darcy sürtünme faktörü olduğuna dikkat edilir) türbülanslı akış için pürüzsüz yüzeylere ait durum için Denklem ile verilmiştir:

$$f_h = (1.58 \ln(Re_h) - 3.28)^{-2} \quad (4.73)$$

Düz levha tipi kanatların üzerindeki basınç düşüşünün sadece giriş ve çıkıştaki pozitif daralma ve negatif genişleme basıncının düştüğü varsayılarak, sürtünme nedeniyle olduğu tahmin edilmektedir. Basınç düşüşü Denklem 4.74 ile hesaplanmaktadır (Lee 2017).

$$\Delta P_h = \frac{4f_h L_s}{D_h} \frac{1}{2} d_h V_h^2 \quad (4.74)$$

### 4.9.2 Düz Levha Tipi Kanatların Basınç Kaybı Hesaplanması

Modülün sıcak yüzeyindeki yani sekizgen borunun içindeki düz levha tipi kanatlardaki basınç düşümüne ait kanatların hidrolik çapı Denklem (4.70)'den yararlanılarak hesaplanmıştır:

$$D_{h,h} = \frac{4(0.02 * 8.785 * 10^{-4})}{2(0.02 + 8.785 * 10^{-4})} = 0.0017 \text{ m}$$

Denklem (4.71) ile Reynolds sayısı bulunmuştur:

$$Re_h = \frac{(8.434)(0.0017)}{1.3025 * 10^{-4}} = 1089.8$$

Reynolds sayısı 2300'den küçük olduğu için Denklem (4.72)'deki Fanning sürtünme faktörü hesaplanır:

$$f_h = \frac{24}{1089.8} = 0.022$$

(4.74) eşitliği ile basınç düşümü hesaplanmıştır.

$$\Delta P_h = \frac{4(0.022)(0.04)}{0.0017} \frac{1}{2} (1.96)(8.434)^2 = 145.9364 \text{ Pa}$$

#### 4.9.3 Daralma ve Genişlemedeki Basınç Kayıpları

Genişlemeden dolayı oluşan basınç kaybı Denklem (4.75)'de verilmiştir:

$$\Delta P_{\text{genişleme}} = -d_{\text{hava}} \frac{A_1}{A_2} \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) U_1^2 \quad (4.75)$$

Daralmadan dolayı oluşan basınç kaybı ise Denklem (4.76)'da verilmiştir:

$$\Delta P_{\text{daralma}} = \frac{1}{2} d_{\text{hava}} \left(\frac{1}{\mu} - 1\right)^2 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 U_1^2 \quad (4.76)$$

(4.76) eşitliğindeki sabit  $\mu$ , Denklem (4.77)'den elde edilir:

$$\mu = 0,63 + 0,37 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^3 \quad (4.77)$$

Burada  $U_1$  – borudaki hız,  $d_{\text{hava}}$  – havanın yoğunluğu,  $A_1$  – dairenin kesit alanı,  $A_2$  – sekizgenin kesit alanı ve  $\mu$  – sabittir (Kumar ve diğ. 2013).

#### 4.9.4 Daralma ve Genişlemedeki Basınç Kaybı Hesaplamaları

Denklem (4.75) kullanılarak genişleme ile olan basınç kaybı hesaplanmıştır:

$$\Delta P_{\text{genişleme}} = -1.96 \frac{0.0031}{0.0098} \left(1 - \frac{0.0031}{0.0098}\right) 27.31^2$$

$$\Delta P_{\text{genişleme}} = -317.0836 \text{ Pa}$$

Denklem (4.77) ile viskozite sürtünme etkisi  $\mu$  hesaplanmıştır:

$$\mu = 0.63 + 0.37 \left( \frac{0.0098}{0.0031} \right)^3 = 1.7797$$

Denklem (4.76) kullanılarak da, daralmadaki basınç kaybı hesaplanmıştır:

$$\Delta P_{\text{daralma}} = \frac{1}{2} 1.96 \left( \frac{1}{1.7797} - 1 \right)^2 \left( \frac{0.0031}{0.0098} \right)^2 27.31^2$$

$$\Delta P_{\text{daralma}} = 14.1936 \text{ Pa}$$

#### 4.9.5 Dairesel Borudaki Basınç Kayıpları

L=50 mm uzunluğundaki ve D=63 mm çapındaki girişte ve çıkışta olmak üzere iki dairesel borudaki basınç kaybı hesaplanmak istenmektedir. Reynolds sayısı, basınç kaybını elde etmek için Denklem (4.78) verilmiştir:

$$Re = \frac{dUD}{\mu} = \frac{UD}{\nu} \quad (4.78)$$

Burada,  $\nu$  – kinematik viskozitedir. Basınç kaybı Denklem (4.79)’da verilmiştir:

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{dU^2}{2} \quad (4.79)$$

Burada,  $f$  – sürtünme faktörü,  $L$  – borunun uzunluğu,  $D$  – borunun çapı,  $d$  – havanın yoğunluğu,  $U$  – havanın boru içindeki hızıdır. Sürtünme faktörü  $f$ , Haaland bağıntısı, Denklem (4.80) ile hesaplanmaktadır (Çengel ve Cimbala 2014):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (4.80)$$

#### 4.9.6 Dairesel Borudaki Basınç Kayıplarının Hesaplanması

Denklem (4.78) kullanılarak Reynolds sayısı hesaplanmıştır:

$$Re = \frac{(27.31)(0.063)}{26.05 * 10^{-6}} = 6604.7$$

Alüminyum için eş değer pürüzlülük değeri  $\epsilon = 0.0015$ ’dir (Çengel ve Cimbala 2015). Denklem (4.80) ile sürtünme faktörü hesaplanmıştır:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left[ \frac{6.9}{6604.7} + \left( \frac{0.0015/0.063}{3.7} \right)^{1.11} \right] \rightarrow f = 0.3219$$

Denklem (4.79) ile de dairesel boruda meydana gelen basınç kaybı hesaplanmıştır:

$$\Delta P_L = 0.3219 \frac{0.05}{0.063} \frac{(1.96)(27.31)^2}{2} = 186.7325 \text{ Pa}$$

İki tane dairesel boru olduğu için  $2(186.7325) = 373.465$  Pa basınç kaybı meydana gelmiştir.

#### 4.9.7 Toplam Basınç Kaybı

Toplam basınç kaybı Denklem (4.81)'de verilmiştir:

$$\Delta P_{\text{kayıp}} = \Delta P_{\text{genişleme}} + \Delta P_{\text{daralma}} + \Delta P_L + \Delta P_{\text{kanat}} \quad (4.81)$$

Kompresör çıkışındaki toplam basınç  $P_k = 222915$  Pa'dır. Boru çıkışındaki basınç, Denklem (4.82)'de verilmiştir:

$$P_{\text{çıkış}} = P_k - \Delta P_{\text{kayıp}} \quad (4.82)$$

Denklem (4.81)'den:

$$\Delta P_{\text{kayıp}} = -317.0836 + 14.1936 + 373.465 + 145.9364$$

$$\Delta P_{\text{kayıp}} = 216.5114 \text{ Pa}$$

elde edilmiştir.

Denklem (4.82) ile boru çıkışındaki basınç hesaplanmıştır:

$$P_{\text{çıkış}} = 222915 - 216.5114 = 222698.4886 \text{ Pa}$$

Boru çıkışındaki mutlak basınç  $222698.4886$  Pa olduğuna göre, Atmosfer basıncı  $101325$  Pa olarak alındığında, boru çıkışındaki ölçme basıncı da  $121373.4886$  Pa olmaktadır. Ansys Fluent'te, hesaplanan bu ölçme basıncından daha düşük bir ölçme basıncı verilerek en iyi yakınsamayı veren ölçme basıncı seçilmiştir. Bu durum düşünüldüğünde, en iyi yakınsamayı veren ölçme basıncı  $120350$  Pa olmuştur.

## 5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)

### 5.1 HAD (FLUENT) Teorisi

#### 5.1.1 Navier-Stokes ve Süreklilik Denklemleri

FLUENT çözüm oluştururken, Navier-Stokes ve süreklilik denklemlerini esas kabul eder. Süreklilik ya da diğer adıyla kütle korunum denklemi Denklem (5.1)'de verilmiştir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (5.1)$$

Navier-Stokes denklemi ise momentumun korunumu esasına dayanır ve Denklem (5.2)'deki gibi ifade edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\tau) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5.2)$$

P statik basıncı,  $\tau$  ise gerilme tensörünü göstermektedir.  $\rho \vec{g}$  ve  $\vec{F}$  ise sırasıyla yerçekimi ve dış kuvvetleri temsil etmektedir. Gerilme tensörü Denklem (5.3)'de verilmiştir:

$$\tau = \mu \left[ (\nabla \cdot \vec{U} + \nabla \cdot \vec{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{U} I \right] \quad (5.3)$$

$\mu$  dinamik viskoziteyi, I ise birim tensörü göstermektedir (Çam 2019).

#### 5.1.2 Türbülans Modeli

Reynolds sayısı, akış türünün türbülanslı olup olmadığının belirlenmesinde kullanılan boyutsuz bir sayıdır. Denklem (5.4) ve (5.5)'den faydalanılarak hesaplanır:

$$\vec{U} = \frac{Q}{A} \quad (5.4)$$

$$Re = \frac{\rho \vec{U} D}{\mu} = \frac{\rho \vec{U} L}{\mu} \quad (5.5)$$

Burada  $U$  – akışkanın hızı,  $Q$  – akışkanın hacimsel debisi,  $A$  – akışkanın geçtiği kesit alan,  $Re$  – Reynolds sayısı,  $d$  – akışkanın yoğunluğu,  $D$  – akışkanın içinde yol aldığı hidrolik çap,  $L$  – karakteristik uzunluk,  $\mu$  – dinamik viskozitedir.

Bu çalışmada, çözüm için  $k$ - $\varepsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Bu modele göre türbülans uzunluğu ve zaman boyutu olmak üzere iki adet türbülans modeli kullanılır. Model yarı deneysel olarak oluşturulmuş bir modeldir. Endüstriyel akış problemleri ve ısı transferi problemlerinde kabul görmüştür ve günümüzde çok farklı HAD yazılımlarında da kullanılmaktadır (Çam 2019).

Realisable  $k$ - $\varepsilon$  modeli, taşınım denklemlerindeki türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve buna ait dağılım oranına ( $\varepsilon$ ) dayanmaktadır. Denklem (5.6) ve (5.7)'de taşınım denklemleri verilmiştir (Çam 2019):

$$\frac{\partial}{\partial t}(d.k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(d.ku_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - d.\varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(d.\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(d.\varepsilon u_j) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + d.C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b S \varepsilon \end{aligned} \quad (5.7)$$

Denklem (5.7)'de verilen  $C_1$  sabiti Denklem (5.8)'de ifade edilmiştir:

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5.8)$$

Bu denklemlerde,  $\rho$  – karışımın yoğunluğu;  $\mu$  – moleküler akma viskozitesi,  $G_k$  – ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak türbülans kinetik enerji üretimini temsil eder.  $G_b$ , yüzdürme nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerjisi üretimidir.  $Y_M$ , sıkıştırılabilir türbülanstaki dalgalı dilatasyonun genel dağılım hızına katkısını temsil eder.  $C_2$  ve  $C_{1\varepsilon}$  sabittir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  sırasıyla  $k$  ve  $\varepsilon$  için türbülanslı Prandtl sayılarıdır.  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$ , kullanıcı tanımlı kaynak terimlerdir. Karışım için türbülans akma viskozitesi,  $\mu_t$ , Denklem (5.9)'daki gibi hesaplanır:

$$\mu_t = d.C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.9)$$

Burada  $C_\mu$ , standart  $k$ - $\varepsilon$  ve RNG  $k$ - $\varepsilon$  modellerinden farklı olarak sabit değildir ve Denklem (5.10)'daki gibi hesaplanır:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (5.10)$$

Denklem (5.10)'daki  $U^*$  değeri Denklem (5.11)'de verilmiştir:

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (5.11)$$

Denklem (5.11)'deki  $\tilde{\Omega}_{ij}$  tensörü Denklem (5.12)'deki gibi hesaplanır:

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad \Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (5.12)$$

Denklem (5.12)'deki  $\overline{\Omega}_{ij}$ ,  $\omega$  açısal hızına sahip hareketli bir referans çerçevesinde görüntülenen ortalama dönme hızı tensörüdür.  $A_0$  ve  $A_s$  model sabitleridir ve Denklem (5.13)'de gösterilmiştir:

$$A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6} \cos \varphi \quad (5.13)$$

Buradaki  $\varphi$  açısı, Denklem (5.14)'de verilmiştir:

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (5.14)$$

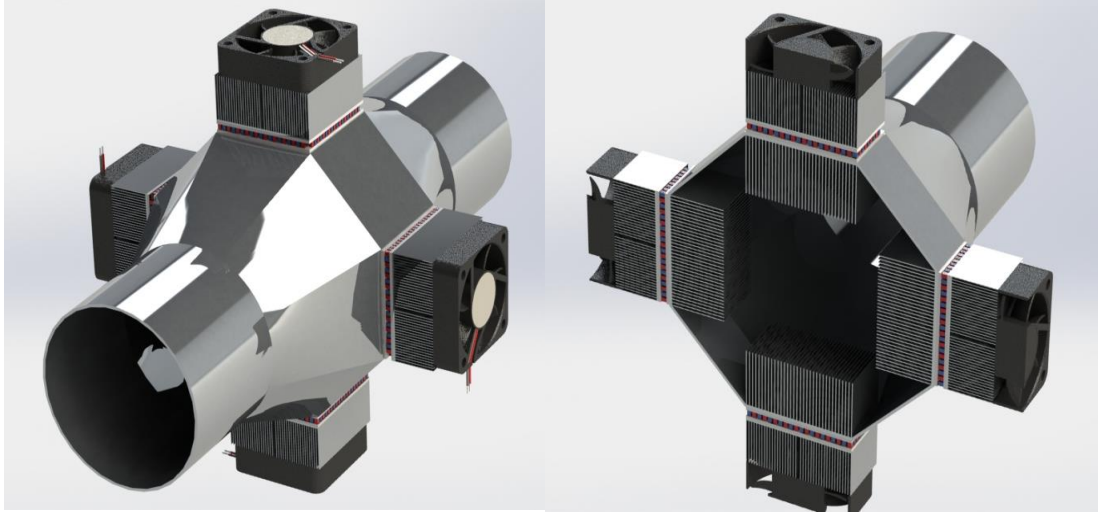
$C_\mu$ 'nin ortalama gerilme ve dönme hızlarının, sistemin dönme açısal hızının ve türbülans alanlarının ( $k$  ve  $\varepsilon$ ) bir işlevi olduğu görülebilir. Denklem (5.10)'daki  $C_\mu$ 'nin, denge sınırındaki bir tabakadaki ataletsel bir alt tabaka için standart 0.09 değerini geri kazandığı gösterilebilir.

Model sabitleri;  $C_2$ ,  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$ , modelin belirli standart akışlarda iyi performans göstermesini sağlamak için kurulmuştur. Model sabitleri  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_2 = 1.9$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$  verilmiştir (Ansys Fluent 2017).

## 5.2 CAD Modelinin Oluşturulması

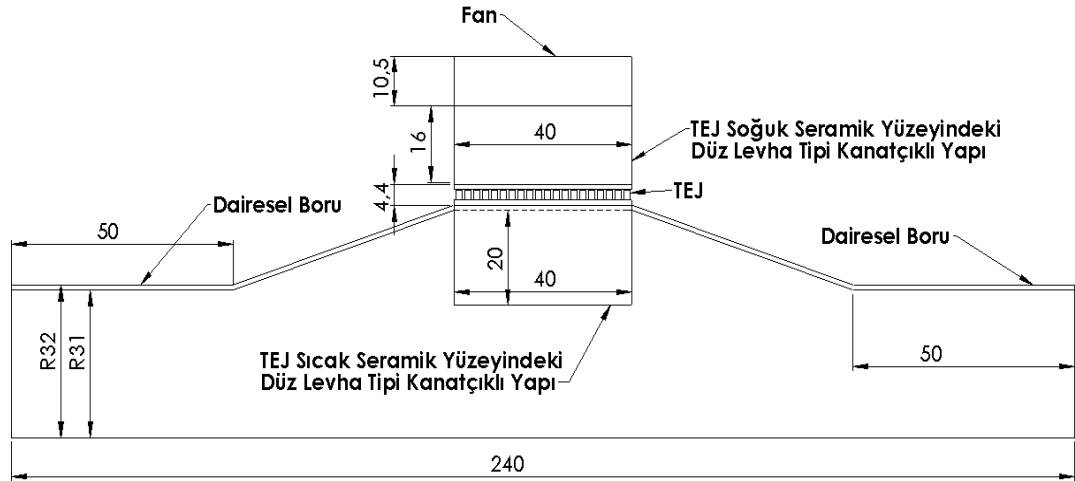
Turbo şarj sistemindeki kompresör ve ara soğutucu arasına konulması düşünülen düzgün sekizgen borunun CAD modeli Şekil 5.1'de gösterilmektedir. CAD modeli oluşturulurken termoelektrik jeneratör tasarımındaki değerler kullanılmıştır. Düzgün sekizgen tasarlanmasının nedeni şekil olarak daireye daha yakın olması ve daha çok termoelektrik modül konulması düşüncesi olmuştur.

TGM-199-1.4-2.0 ticari modülünün katalog değerlerine bakıldığı zaman sadece 2.0 değerinin değiştirildiği görülmektedir (Kryotherm 2018). Bu değer ısı çiftlerinin bacak uzunluğudur. Bu çalışmada, katalog değerindeki 1.4 değeri, bir yarı iletkenin bir kenar uzunluğudur ve bir yarı iletkenin kesit alanı, bir kare olarak tasarlanmıştır. Aksi bir durumda katalogda belirtilmelidir.



**Şekil 5.1:** (a) CAD Modelin Montajı (b) CAD Modelin Montaj Kesiti

Bu yarı iletkenlerin bir kenar uzunluğu değiştirilerek farklı boyutlarda iki TEJ modülü elde edilmiştir. Bu TEJ modüllerindeki girdi ve çıktı parametre değerleri karşılaştırılmak istenmektedir. Bu modüllere sırasıyla TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0 adlar verilmiştir. Bu 3 modülde, 40mm \* 40mm \* 4.4mm hacim içinde modüllerin, seramik ve element bacak uzunlukları dışında, diğer boyutlarında değişiklik yapılmıştır (TGM-199-1.4-2.0 ticari modülüne göre). Bu değişiklikler; elementlerin (p - n ısıl çiftleri) kesit alanları, bakır iletkenlerin uzunluğu ve elementin bir kesit kenarının uzunluğuna eşit olan bakır iletkenin genişliğidir. CAD modelinin y-z ekseninde kesit alanı alınarak basit bir gösterim olarak Şekil 5.2 verilmiştir. Şekil 5.2'deki tüm değerler milimetredir.



**Şekil 5.2:** CAD modelinin basit gösterimi.

### 5.2.1 Design Modeler

Tüm model tek bir parça haline getirilmiş ve “Share Topology” seçilip “Generate” denilerek parçalardaki düğümler arası geçişlerde kaymalar önlenmiştir.

Model de iki adet akış alanı bulunmaktadır; sıcak hava alanı; turbo şarj kompresöründen gelen 408 K sıcaklığındaki havadır, diğeri ise; soğuk hava olarak adlandırdığımız fanın ortam sıcaklığındaki hava ile fanın soğuttuğu kanatlı yapılardan oluşan akış alanıdır. Bu durumda, bu iki akış alanı “Fluid” olarak seçilmiş ve diğer tüm katı kısımlar “Solid” olarak seçilmiştir.

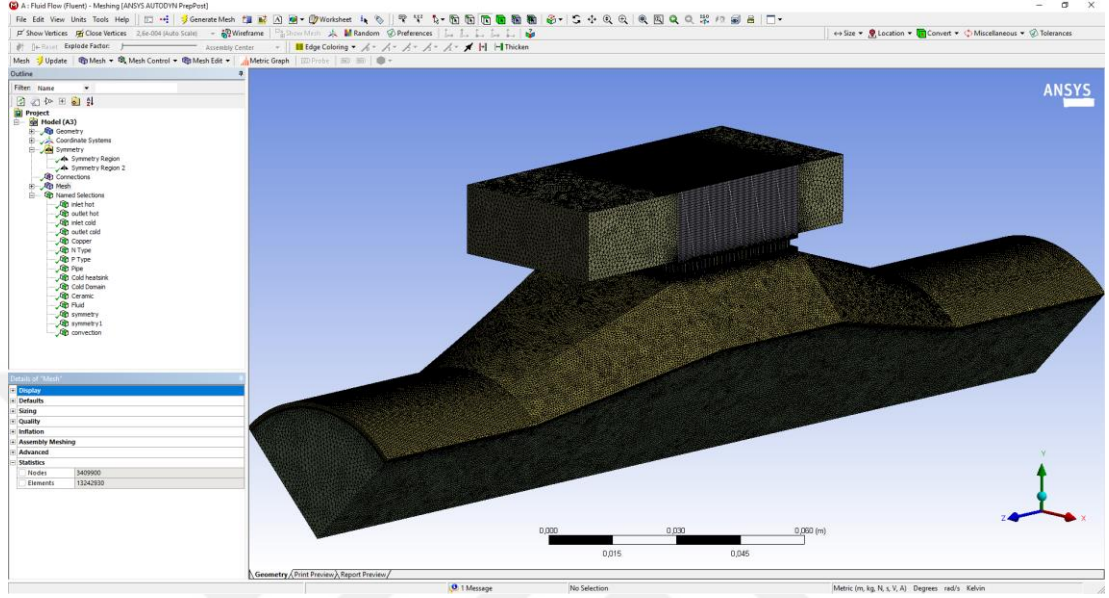
Akış alanı oluşturulan CAD modelin dörtte biri kullanılarak simetri özellikleri tanımlanmış ve hem mesh sayısı azalmış hem de analiz sonucunun zamanı azaltılmıştır. Böylelikle çok büyük mesh sayılarından uzak durulmuştur. Çünkü iş istasyonunun belli bir mesh sayısından sonra sistemsal olarak kilitlendiği görülmüştür. Böylelikle çok büyük mesh sayılarından uzak durulmuştur.

### 5.2.2 Mesh Optimizasyonu

Genel olarak Ansys Fluent gibi paket programlarda mesh sayısı ve mesh kalitesi önemlidir. Farklı sayılarda meshler oluşturularak üç ya da daha fazla durum tespit edilip belirli miktarlarda mesh sayıları oluşturulur. Bu durumlardaki mesh isimleri, “kötü, iyi ve çok iyi” gibi ifade edilmekte ve mesh durumları olarak belirtilmektedir. Üç durumdaki çıkan analiz sonuçlarına göre, birbirine yakın olan analiz sonuçları varsa optimizasyon gerçekleşmiş demektir. Aksi takdirde, farklı mesh sayıları oluşturularak tekrar bakılması gerekmektedir. Bu özellikler göz önüne alınarak, Tablo 5.1’de mesh optimizasyonu ve çıkan analiz sonuçları gösterilmiştir. Çıkan sonuçlara göre, iyi durumdaki mesh sayısı seçilmiştir. Bunun nedeni, mesh sayısı arttıkça, iş istasyonunda daha fazla CPU tüketimine neden olacak ve analiz sonuçları daha fazla zamanda alınacaktır. Analiz sonucu olarak, Termoelektrik Jeneratör modülünün sıcak yüzeyi seçilmiştir. Şekil 5.3’de iyi mesh durumu gösterilmektedir.

**Tablo 5.1:** Mesh optimizasyonu.

| Mesh Durumu | Düğüm Sayısı | Element Sayısı | Analiz Sonucu |
|-------------|--------------|----------------|---------------|
| Kötü        | 2.5 milyon   | 10 milyon      | 392.78K       |
| İyi         | 3.4 milyon   | 13.2 milyon    | 387.64K       |
| Çok İyi     | 4.6 milyon   | 15.4 milyon    | 387.49K       |



**Şekil 5.3:** CAD Modelin oluşturulan meshi.

### 5.2.3 Sınır Koşulları

Akış alanlarındaki giriş sınır koşulları olarak, hız giriş sınır koşulları belirlenmiştir. Çıkış Sınır koşulları olarak ise çıkış basınç koşulları seçilmiştir. Seçilen ve belirlenen bu değerler Tablo 5.2’de gösterilmektedir.

**Tablo 5.2:** Giriş ve çıkış sınır koşulları.

|                  | Giriş Sınır Koşulu |        | Çıkış Sınır Koşulu |
|------------------|--------------------|--------|--------------------|
| Kompresör Havası | 27.31 m/s          | 408 K  | 120350 Pa          |
| Fan Havası       | 5.162 m/s          | 268 K* | 0 Pa               |

\*Dış ortam sıcaklık değerleri (268 K, 278 K, 283 K, 288 K, 293 K, 298 K ve 303 K), giriş parametre değerleri olarak belirlenmiştir.

CAD modelindeki kompresör havası, akış alanından sonra ara soğutucuya gideceğinden, çıkış basıncı belirtilmelidir. Aksi takdirde, model atmosfere açılıyor demektir ve bu fizik olarak ve model olarak yanlış demektir. Bu durumda, yanlış sonuçlar elde edilir. Bunun nedeni de, Fluent’te çalışma basıncı ve ölçme basıncının toplamı mutlak basıncı vermektedir. Ölçme basıncının 0 Pa olarak ayarlanması mutlak basıncın çalışma basıncına eşit olacağı anlamına gelmektedir. Atmosfere

açılmayan hiçbir modelde çıkış ölçme basıncı 0 Pa ayarlanmamalıdır. Çalışma basıncı, Fluent'te varsayılan olarak 101325 Pa yani atmosfer basıncı olmaktadır.

Traktör belirli bir hızla ilerlerken kaput içerisine alınan hava ile oluşturulan CAD modelindeki yüzeyler arasında bir taşınım söz konusu olmaktadır. Bu kaput içine alınan havanın hızı, 8.33 m/s olarak kabul edilmiştir. Çevre sıcaklığına göre de, kinematik viskozite ve Prandtl değerleri alınmıştır. Bu durumda,  $Re_L$  ve  $Nu$  sayısı (ve dolayısıyla meydana gelen zorlanmış taşınım için ısı taşınım katsayısı) sırasıyla, Denklem (5.15) ve (5.16)'da verilmiştir (Çengel ve Ghajar 2015).

$$Re_L = \frac{UL}{\nu} \quad (5.15)$$

$$Nu = (hL)/k = 0.664 \times Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad (5.16)$$

Denklem (5.15) ve (5.16)'da belirtilen  $L$  karakteristik uzunluğu, sistemdeki borunun uzunluğudur.

Dış çevre sıcaklığını giriş parametresi olarak belirlediğimiz için bununla beraber, zorlanmış dış taşınım ile olan ısı taşınım katsayısı da değişecektir. Tablo 5.3'de, ortam sıcaklığına göre hesaplanan zorlanmış dış taşınım ile olan ısı taşınım katsayısı değerleri verilmiştir.

**Tablo 5.3:** Dış ortam sıcaklığına göre hesaplanan, zorlanmış taşınım ile olan ısı taşınım katsayısı değerleri.

| Sıcaklık                                       | 268 K | 278 K | 283 K | 288 K | 293 K | 298 K | 303 K |
|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $h_{\text{dış ortam}}$<br>(W/m <sup>2</sup> K) | 22.85 | 22.8  | 22.78 | 22.77 | 22.75 | 22.73 | 22.71 |

#### 5.2.4 Malzeme Seçimi

Termoelektrik jeneratörü, element çiftleri (p-n ısı çifti) arasındaki iletkenliği sağlayan bakır ve kanatlı yapılar ve borular; alüminyum olarak Ansys Fluent'ten varsayılan veri değerleri olarak alınmıştır. Malzeme değerleri Tablo 5.4'de verilmiştir.

**Tablo 5.4:** Kullanılan malzemelerin özellikleri.

| Malzeme Özelliği  | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $C_p$ (J/kgK) | $k$ (W/mK) |
|-------------------|-----------------------------|---------------|------------|
| Seramik (Alümina) | 3720                        | 880           | 25         |
| Bizmut Telleryum  | 7700                        | 544           | 1.5        |
| Alüminyum         | 2719                        | 871           | 202.4      |
| Bakır             | 8978                        | 381           | 387.6      |

P ve n yarıiletkenler, Ansys Fluent yapısında Seebeck katsayısı bulunmadığı için her ikisi de bizmut telleryum malzemesi olarak belirlenmiştir (Ansys Fluent 2017). Bakır iletkenlerin malzemesi olarak bakır seçilmiştir. Sıcak ve soğuk yüzeylerdeki düz levha tipi kanatlar ve boru, alüminyum malzeme olarak seçilmiştir. Sıcak ve soğuk yüzeylerdeki seramik malzeme olarak alümina(seramik) seçilmiştir (Accuratus 2019). Tablo 5.5’de gösterilen kompresör havasının mükemmel gaz olarak kullanılabileceği Bölüm 4.2.1’deki hesaplamalarla gösterilmiştir. Fan havasının laminar bir bölgede olduğu Bölüm 4.2.4’deki hesaplamalarla elde edilmiştir. Hücre bölge koşulunda Laminer Zone olarak işaretlenmiştir.

**Tablo 5.5:** Kompresör ve fanın hava özellikleri.

| Malzeme Özelliği | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $C_p$ (J/kgK) | $k$ (W/mK) | $\mu$ (kg/ ms)     | Moleküler Ağırlık (kg/kmol) |
|------------------|-----------------------------|---------------|------------|--------------------|-----------------------------|
| Kompresör Havası | İdeal Gaz                   | 1012.5        | 0.0327     | $2.3247 * 10^{-5}$ | 28.996                      |
| Fan Havası       | 1.225                       | 1006.43       | 0.0242     | $1.7894 * 10^{-5}$ | -                           |

### 5.2.5 Çözüm Özellikleri

SIMPLE şeması seçilmiştir. Fluent girilen sınır koşulları ile hız-basınç ilişkisini Rhie-Chow olarak otomatik ayarlamıştır. Spatial Discretization değerlerinin hepsi Second Order Upwind olarak ayarlanmıştır. Bu şemanın seçilmesinin nedeni, ikinci dereceden doğruluk istendiğinde, hücre yüzlerindeki miktarlar çok boyutlu bir doğrusal yeniden yapılanma yaklaşımı kullanılarak hesaplanır. Bu yaklaşımda, hücre yüzeyinde hücre merkezli çözümün Taylor serisi genişlemesi ile hücre yüzlerinde daha yüksek doğruluk elde edilir (Ansys Fluent 2017).

### 5.2.6 Giriş ve Çıkış Parametrelerinin Ayarlanması

Giriş parametreleri olarak; fan hava giriş sıcaklığı, ısı taşınım katsayısı ve çevre sıcaklığı belirlenmiştir. Yaklaşık olarak, fan havası, çevre havası sıcaklığındaki havayı alarak, düz levha tipi kanatçıklı yapıya bir hacimsel debi ile girmektedir. Bu durum göz önüne alındığında hem fan giriş sıcaklığı hem de çevreyle olan taşınım,

çevre sıcaklığı ile ilgili olduğu için tek bir parametre ile ifade edebiliriz. Çevre sıcaklığı sırasıyla; 268 K, 278 K, 283 K, 288 K, 293 K, 298 K ve 303 K olarak (yaz ve kış aylarını kapsayan sıcaklık değerleri) belirlenmiştir.

Çıkış parametreleri olarak, CFD-Post üzerinde, TEJ'in sıcak ve soğuk yüzeylerinde oluşan ortalama sıcaklık değerleri alınmıştır. Bunun nedeni; sıcak ve soğuk yüzeylerde düzgün bir dağılımın olmamasıdır. Ayrıca sıcak ve soğuk yüzeylerdeki giren ve çıkan ortalama ısı miktarları ve kanatçıklı yapılarda akışla olan ortalama ısı taşınım katsayıları da çıkış parametreleri olarak belirlenmiştir.

### 5.2.7 Hibrid Başlatma

Karmaşık bir geometride türbülanslı bir akış durumu varsa ve iyi bir çözüm elde etmek isteniyorsa Hibrid Başlatma kullanılır (Ansys Fluent 2017). Aşağıda görüldüğü gibi teorisi anlatılmaktadır.

Hibrit Başlatma, sınır enterpolasyon yöntemleri topluluğudur. Karmaşık alan geometrilerine uyan bir hız alanı ve hesaplama alanındaki yüksek ve düşük basınç değerlerini sorunsuz bir şekilde bağlayan bir basınç alanı üretmek için Laplace denklemini çözer. Diğer tüm değişkenler (sıcaklık, türbülans, VOF, türler vb.) Alan ortalama değerlerine veya önceden belirlenmiş bir tarife göre eklenir. Bu tarifler aşağıda detaylandırılmıştır.

1. Hız Alanı: Laplace denklemi, alandaki hız alanını üretmek için uygun sınır koşulları (5.17) eşitliği ile çözülür.

$$\nabla \phi^2 = 0 \quad (5.17)$$

Burada,  $\phi$  – hız potansiyelidir. Hız bileşenleri gradyan potansiyeli (5.18) eşitliği ile verilmiştir.

$$\vec{U} = \nabla \phi \quad (5.18)$$

Çeşitli sınır koşulları için hız potansiyeli aşağıdaki gibi ifade edilir:

- Duvar Sınırları: Duvara normal hız sıfırdır. (5.19) eşitliğinde verilmiştir.

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{\text{duvar}} = 0 \quad (5.19)$$

- Giriş Sınırları: Giriş sınırlarına normal hız, kullanıcı tarafından belirlenen (5.20) eşitliğindeki gibi sınır değerlerinden hesaplanır.

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\text{giriş}} = V_{\perp} \quad (5.20)$$

- Çıkış Sınırları: (5.21) eşitliği gibi Sıfır potansiyel olarak belirlenmiştir.

$$\varphi = 0 \quad (5.21)$$

Genel ayar sekmesi altındaki Sabit Hız Büyüklüğünü Korumayı seçeneği seçilerek, hız potansiyel çözümünün çözümünden alınan yöne eşit bir başlangıç hız büyüklüğü belirlenebilir (Ansys Fluent 2017).

2. Basınç Alanı: Alandaki pürüzsüz basınç alanını üretmek için uygun sınır koşulu ile ek bir Laplace denklemi, yalnızca basınç bilgisi alandaki en az bir giriş ve bir çıkışta mevcutsa çözülür. Aksi takdirde, (5.21) eşitliği gibi basınç alanı tüm sınırlardan elde edilen ortalama sabit değerle başlatılacaktır.

$$\nabla^2 P = 0 \quad (5.21)$$

Burada P, çeşitli sınır koşulları için aşağıdaki gibi ifade edilir:

- Basınç giriş sınırları: varsayılan olarak P, belirtilen Toplam Basıncıdan %1 daha az olarak hesaplanır veya Genel Ayarlar sekmesi altındaki Girişte Belirtilen Basıncı Kullan seçeneğini seçtiyseniz, P'yi belirtilen Süpersonik/Başlangıç Gösterge Basıncından alır.
- Basınç çıkışı sınırları: P, bu sınırda belirtilen gösterge basıncından den %1 daha fazla hesaplanır.
- Hız/Kütle akış giriş sınırları: P, belirtilen Süpersonik/Başlangıç Gösterge Basıncının değerini, yalnızca Genel Ayarlar sekmesinin altındaki girişte belirtilen basıncı kullan seçeneğini seçtiyseniz kullanılır.
- Duvar Sınırları: (5.22) eşitliği gibi P normal gradyanı sıfıra ayarlanır.

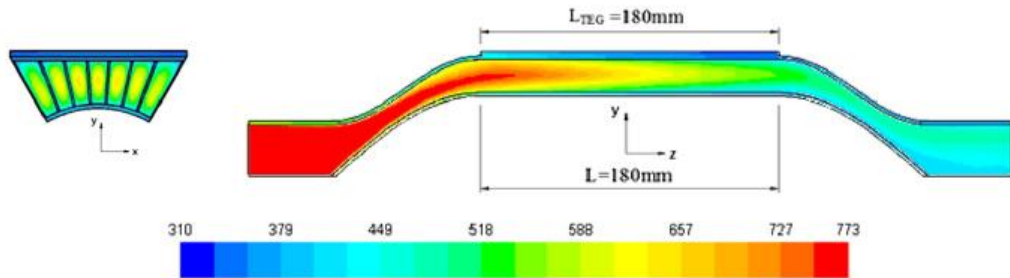
$$\left. \frac{\partial P}{\partial n} \right|_{\text{duvar}} = 0 \quad (5.22)$$

3. Sıcaklık Alanı: Sıcaklık sabit bir değerle başlatılır (etki alanı ortalaması alınır).
4. Türbülans Parametreleri: Varsayılan olarak, türbülanslı parametreler sabit değerlerle başlatılır (etki alanı ortalaması alınır). Ancak, akışı değişken türbülans parametreleriyle başlatmak istiyorsanız, Hibrit Başlatma iletişiminde, Hibrit Başlatma Kullanımında Adımlar bölümünde açıklanan uygun seçeneği seçmeniz gerekir.

5. Tür Fraksiyonları: Varsayılan olarak, sekonder tür kütle / mol fraksiyonları 0,0 değerinde başlatılır. Ancak, başlatma değerlerini belirtmek istiyorsanız, Hibrit Başlatma'yı Kullanma Adımları bölümünde açıklanan Hibrit Başlatma iletişim kutusunda uygun seçeneği seçmeniz gerekir.
6. Hacim Kesirleri: İki fazlı bir durum için, ikincil VOF fazı, tüm girişlerden gelen minimum VOF ile başlatılacaktır. Eğer durum ikiden fazla faza sahipse, ikincil fazlar sıfır VOF ile başlatılacaktır (Ansys Fluent 2017).

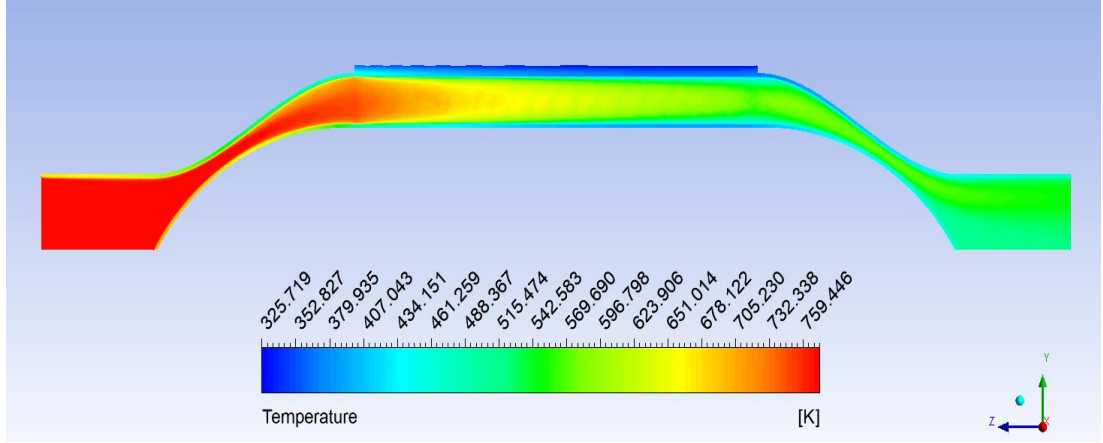
### 5.3 Tez Çalışmasının Nümerik Çözümlemesinin Doğrulanması

Weng ve Huang (2013) bu çalışmadaki tüm durumlar incelenerek sınır koşulları ve kullanılan terimler göz önüne alınarak Fluent programında analiz edilmiştir. Çalışmalarındaki bir durumun analiz sonucu Şekil 5.4'de gösterilmiştir.

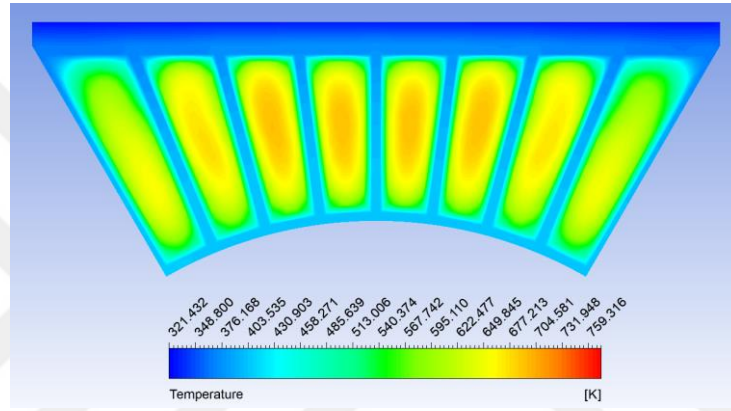


**Şekil 5.4:**  $L=L_{TEJ}=180\text{mm}$  ve  $h_e=1800\text{W/m}^2\text{K}$  olan sistemde x-y ve y-z eksenlerindeki kesit alanlarının sıcaklık dağılımı (Weng ve Huang 2013).

Weng ve Huang (2013) farklı bir program kullanmalarına rağmen, Tez çalışmasında kullanılan Ansys Fluent programı ile, aynı koşullar altında yaklaşık çözümlere ulaşılmıştır. Bu durum, Şekil 5.5 ve 5.6'da gösterilmiştir. Weng ve Huang (2013)'ün çalışmalarında ve bu Tez çalışmasında, aynı koşullar için elde edilen sıcaklık değerleri de Tablo 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5:  $L=L_{TEJ}=180\text{mm}$  ve  $h_e=1800\text{W/m}^2\text{K}$  ve olan sistemde y-z kesit alanındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.6:  $L=L_{TEJ}=180\text{mm}$  ve  $h_e=1800\text{W/m}^2\text{K}$  olan sistemde x-y kesit alanındaki sıcaklık dağılımı.

**Tablo 5.6:** TEJ modülünde oluşan sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

| Çalışma       | $T_{H,ortalama}(\text{K})$ | $T_{C,ortalama}(\text{K})$ | $\Delta T_{ortalama}(\text{K})$ |
|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Weng ve Huang | 375.9                      | 329.5                      | 46.16                           |
| Tez Çalışması | 377.378                    | 332.64                     | 44.64                           |

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, farklı program kullanılmış olsa da çok yakın değerler elde edilmiştir. Bağıl hataların;  $T_{H,ortalama}$  için %0.4,  $T_{C,ortalama}$  için %0.95 ve  $\Delta T_{ortalama}$  için %3.3 olduğu görülmektedir.

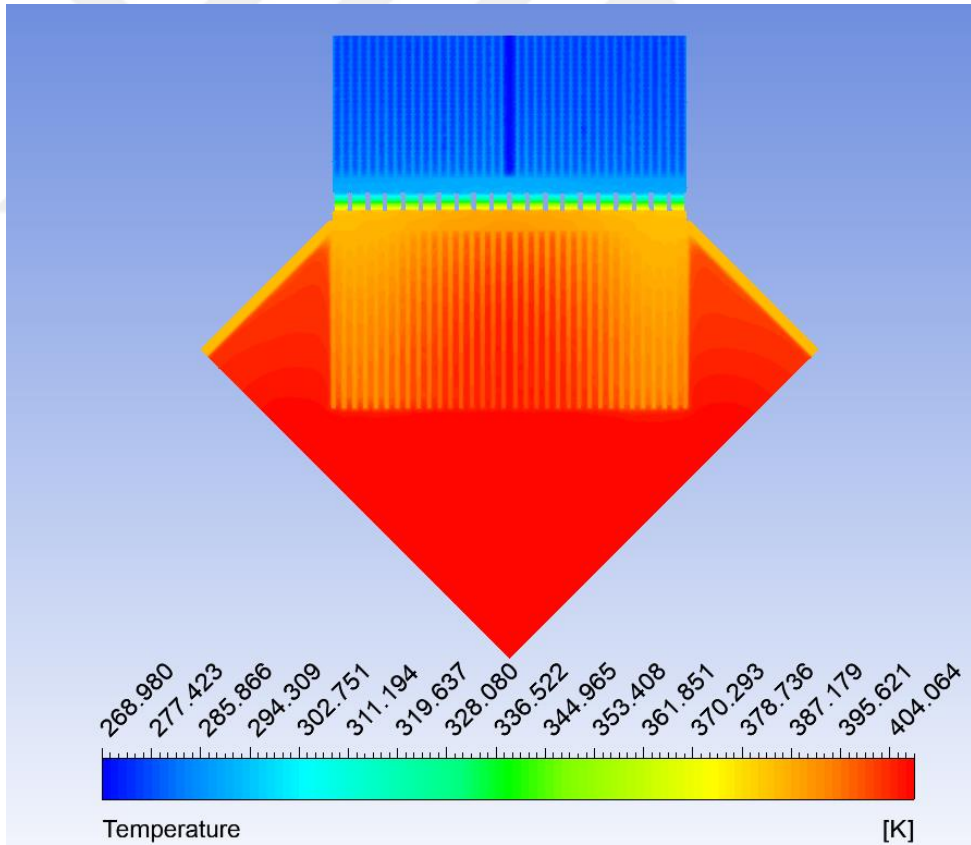
#### 5.4 ANSYS - FLUENT Analiz Sonuçları

Oluşturulan üç TEJ modülü [TGM-199-1.4-2.0 (Ticari Modül), TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0], belirtilen koşullarda, 40 çekirdeğe sahip bir iş istasyonu ile FLUENT programında analiz yapılmıştır. Girdi parametreleri ayarlanarak, çıktı parametrelerinin analizinin yapılması beklenmiştir. Her bir TEJ

modülü için çevre sıcaklığının değişimi göz önünde bulundurulmuş ve çevre sıcaklığına göre değişen çıktı parametreleri arasında oluşan farklar için yorumlamalar yapılmıştır. Bununla beraber, her çıktı için hemen hemen aynı şemaların oluştuğu gözlemlendiği için ilk hesaplama değerinin şemaları ve konturleri verilmiştir. Ayrıca tablolar oluşturulmuş ve grafikleri yorumlanmıştır. Bu bölümde verilen tüm sonuçlar, tek bir TEJ ve borunun dörtte bir kesitidir.

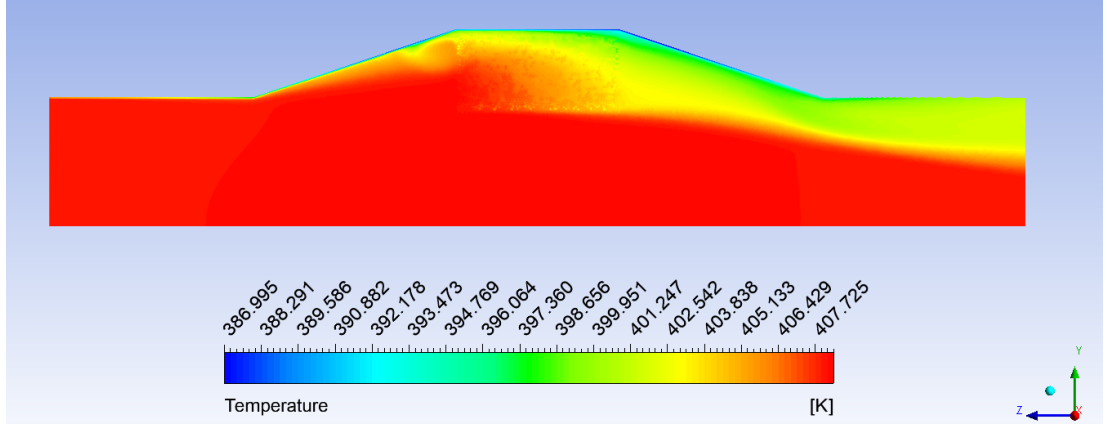
Kompresör ve fan havalarının sistemdeki akışları göz önünde bulundurulursa; fan havasının TEJ'in soğuk yüzeyinde bulunan düz levha tipi kanatçıklı yapının alanlarından geçerken düzgün dağılımlı bir hız, bu analiz sonucunda elde edilmiştir. Kompresör havası borudan geçerken, kanatçıklar arasındaki hava hızının diğer bölgelere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun ise, kanatçık aralarındaki uzaklığın çok küçük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.7'de, tüm gövdelerin x-y eksenin kesit alanının sıcaklık dağılımı verilmiştir.

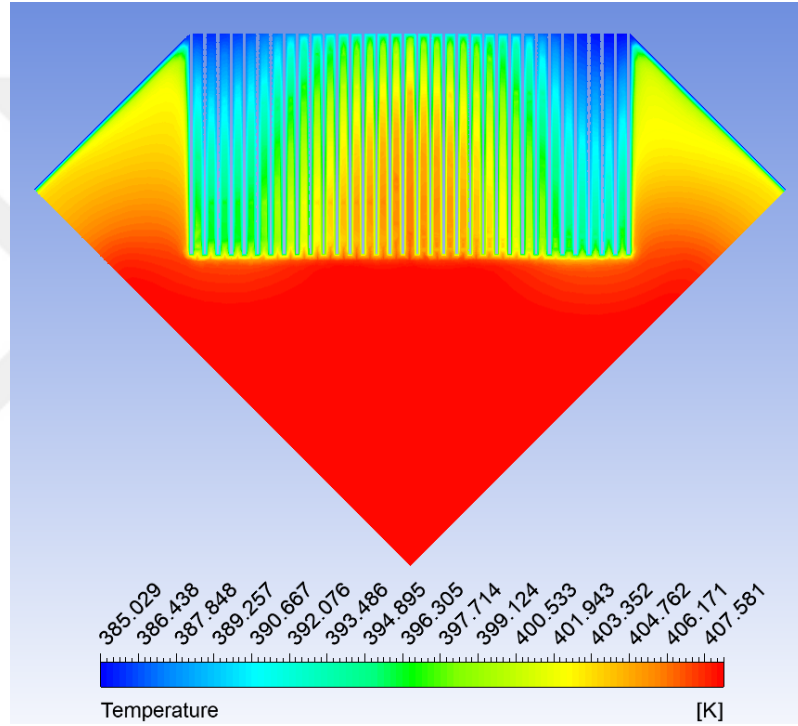


**Şekil 5.7:** Tüm sistemdeki gövdelerin x-y eksenindeki kesit alanına göre oluşan sıcaklık dağılımı.

y-z ve x-y kesit alanına göre kompresör havasının düz levha tipli kanatlardan geçerken oluşan sıcaklık dağılımları da sırasıyla, Şekil 5.8 ve 5.9'da gösterilmiştir.



**Şekil 5.8:** y-z kesit alanına göre kompresör havasının düz levha tipli kanatlardan geçerken oluşan sıcaklık dağılımı.



**Şekil 5.9:** x-y kesit alanına göre kompresör havasının düz levha tipli kanatlardan geçerken oluşan sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.8 ve 5.9’da gösterilen sıcaklık dağılımlarının, kompresör havasının ideal olması nedeniyle yoğunluk ve basınç dağılımına göre incelenmesi gerekmektedir. Girdiğimiz giriş hız sınır koşulu ile toplam sıcaklık sınır koşulu ve çıkış basınç sınır koşulu ile Fluent basınç ve hızları bu koşullara göre hesaplamıştır. Düz levha tipi kanatların akışa engel oluşturmasıyla hız ve basınç dağılımları bu duruma göre hesaplanmaktadır. Genel borudaki akışa göre, kanatlar arasındaki basınç ve sıcaklık değerlerinin daha az olduğu Şekil 5.8’de görülmektedir. Bu

durumun, kanatlar arasındaki mesafenin çok küçük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 5.5 TGM-199-1.4-2.0, TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0 Termoelektrik Jeneratör Modüllerinin Ansys Fluent Analiz Çıkış Parametreleri

Üç farklı boyuta sahip olan TEJ modülü için girilen sınır şartları ve Ansys Fluent çözüm girdileri ile giriş ve çıkış parametreleri girdileri sonucu elde edilen Ansys Fluent programının analiz sonuçları, giriş ve çıkış parametreleri olarak tablolar şeklinde gösterilmiştir. Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 için Giriş parametrelerine için numerik olarak elde edilen çıkış parametreleri Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.7:** Ticari TGM-199-1.4-2.0 için FLUENT programının giriş parametreleri ile oluşan çıkış parametreleri.

| Giriş Parametreleri |                                             | Çıkış Parametreleri |           |                |
|---------------------|---------------------------------------------|---------------------|-----------|----------------|
| $T_{\infty 2}$ (K)  | $h_{\text{dış ortam}}$ (W/m <sup>2</sup> K) | $T_c$ (K)           | $T_h$ (K) | $\Delta T$ (K) |
| 268                 | 22.85                                       | 288.43              | 387.64    | 99.21          |
| 278                 | 22.80                                       | 289.89              | 388.60    | 98.71          |
| 283                 | 22.78                                       | 301.17              | 389.36    | 88.19          |
| 288                 | 22.77                                       | 305.44              | 390.12    | 84.68          |
| 293                 | 22.75                                       | 309.72              | 390.88    | 81.16          |
| 298                 | 22.73                                       | 313.99              | 391.65    | 77.66          |
| 303                 | 22.71                                       | 318.27              | 392.41    | 74.14          |

Tablo 5.8’de ise TGM-199-1.5-2.0 TEJ modülü için giriş parametrelerine karşılık olarak elde edilen çıkış parametreleri gösterilmiştir.

**Tablo 5.8:** TGM-199-1.5-2.0 için Ansys Fluent programının giriş parametreleri ile oluşan çıkış parametreleri.

| Giriş Parametreleri |                                             | Çıkış Parametreleri |           |                |
|---------------------|---------------------------------------------|---------------------|-----------|----------------|
| $T_{\infty 2}$ (K)  | $h_{\text{dış ortam}}$ (W/m <sup>2</sup> K) | $T_c$ (K)           | $T_h$ (K) | $\Delta T$ (K) |
| 268                 | 22.85                                       | 290.22              | 386.01    | 95.79          |
| 278                 | 22.80                                       | 298.56              | 387.19    | 88.63          |
| 283                 | 22.78                                       | 302.77              | 388.00    | 85.23          |
| 288                 | 22.77                                       | 306.98              | 388.82    | 81.84          |
| 293                 | 22.75                                       | 311.19              | 389.63    | 78.44          |
| 298                 | 22.73                                       | 315.41              | 390.45    | 75.04          |
| 303                 | 22.71                                       | 319.27              | 391.27    | 72.00          |

TGM-199-1.5-2.0 modülünün çıkış parametrelerinin, Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 için elde edilenlere yakın fakat farklı çıkmasının, modüldeki element çiftlerinin alanlarının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Fourier yasasına göre, ısının geçtiği dik alan arttıkça ısı transfer miktarı artmaktadır. Bu durum, söz konusu modül için de gerçekleşmektedir. Yani alanı arttırdığımız da daha fazla ısı transferi olmuştur ve bu modülün sıcak yüzeyindeki sıcaklık, ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'e göre daha az olmuştur (Tablo 5.8). Bununla birlikte, TGM-199-1.5-2.0'nin sıcaklık değerlerinin, ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'e göre daha fazla olduğu da yine Tablo 5.8'de gözlenmiştir.

**Tablo 5.9:** TGM-199-1.6-2.0 için Ansys Fluent programının giriş parametreleri ile oluşan çıkış parametreleri.

| Giriş Parametreleri |                                             | Çıkış Parametreleri |           |                |
|---------------------|---------------------------------------------|---------------------|-----------|----------------|
| $T_{\infty 2}$ (K)  | $h_{\text{dış ortam}}$ (W/m <sup>2</sup> K) | $T_c$ (K)           | $T_h$ (K) | $\Delta T$ (K) |
| 268                 | 22.85                                       | 292.32              | 384.71    | 92.39          |
| 278                 | 22.80                                       | 300.14              | 386.48    | 86.34          |
| 283                 | 22.78                                       | 304.12              | 387.39    | 83.27          |
| 288                 | 22.77                                       | 308.34              | 388.29    | 79.95          |
| 293                 | 22.75                                       | 312.51              | 389.17    | 76.63          |
| 298                 | 22.73                                       | 316.74              | 390.06    | 73.32          |
| 303                 | 22.71                                       | 320.82              | 391.00    | 70.18          |

Tablo 5.9’da görüldüğü gibi, TGM-199-1.6-2.0 modülü ise diğer iki modüle göre, soğuk yüzey sıcaklık değerleri olarak artış gösterirken, Sıcak yüzey sıcaklıkları olarak azalış göstermektedir.



## 6. TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZİ

Ansys Fluent program analizi ile elde edilen çıktı parametreleri de kullanılarak, Söz konusu TEJ sisteminin sonlu elemanlar metodu ile Termal-Elektrik analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için, Ansys Workbench bünyesinde bulunan Termal-Elektrik modülü kullanılmıştır. Ticari modül ve farklı boyuttaki iki modülün Termal-Elektrik analizi ile optimizasyonu yapılmış ve çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Ancak bu karşılaştırmadan önce, Ansys-Termal-Elektrik programı ile elde edilen nümerik sonuçların doğrulaması yapılmıştır. Bunun için, ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nün, dış yük direncinin iç dirence eşit olması ( $R_L = R$ ) durumuna göre Firmanın sunduğu katalog değerleri ile tez çalışmasında,  $R_L = R$  için Termal-Elektrik analiz ile elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 için, dış yük direncinin iç dirence eşit olması ( $R_L = R$ ) durumuna göre, Firmanın sunduğu katalog değerleri Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 6.1:** Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin,  $R_L=R$  ve dış ortam sıcaklığı  $22^\circ\text{C}$  için maksimum sınır şartları ve çıktı değerleri (Kryotherm 2018).

| $T_c(^{\circ}\text{C})$ | $T_h(^{\circ}\text{C})$ | U(Volt) | I(A) | P(W) | $\eta(\%)$ |
|-------------------------|-------------------------|---------|------|------|------------|
| 30                      | 200                     | 5.2     | 1.41 | 7.3  | 5.1        |

Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 için Tablo 6.1'de belirtilen  $T_c$  ve  $T_h$  sınır şartları Termal-Elektrik analizinde kullanılmıştır.

### 6.1 Termal-Elektrik Sonlu Elemanlar Metodu Teorisi

Birleştirilmiş termoelektrik yapısal ifadeleri Denklem (6.1) ve (6.2)'de gösterilmiştir.

$$\{q\} = [\Pi]\{J\} - [K]\{\nabla T\} \quad (6.1)$$

$$\{J\} = [\sigma](\{E\} - [\alpha]\{\nabla T\}) \quad (6.2)$$

Denklem (6.1) ve (6.2) arasındaki eşleşmeyi göstermek için  $[\Pi]$  'nin  $T[\alpha]$  ile değiştirilmesi ile Denklem (6.3) ortaya çıkmaktadır.

$$\{q\} = T[\alpha]\{J\} - [K]\{\nabla T\} \quad (6.3)$$

Burada Peltier katsayı matrisi  $[\Pi] = T[\alpha]$ , mutlak sıcaklık  $T$ , Seebeck katsayı

matrisi  $[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{zz} \end{bmatrix}$ , ısı akısı vektörü  $\{q\}$ , elektrik akım yoğunluğu  $\{J\}$ ,

sıfır elektrik akımında değerlendirilen termal iletkenlik matrisi ( $\{J\} = \{0\}$ )  $[K] =$

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}, \text{ termal gradyan } \{\nabla T\}, \text{ sıfır termal gradyanda değerlendirilen}$$

elektiriksel iletkenlik matrisi ( $\{\nabla T\} = \{0\}$ )  $[\sigma] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\rho_{zz}} \end{bmatrix}$ , elektrik alanı

$\{E\}$ 'dir. Ayrıca  $\alpha_{xx}, \alpha_{yy}, \alpha_{zz}$  seebeck katsayıları,  $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  termal iletkenlikler,  $\rho_{xx}, \rho_{yy}, \rho_{zz}$  direnç katsayılarıdır.

Denklem (6.1) ve (6.2) birleştiğinde, ısı akısının ve elektrik yükünün sürekliliği denklemlerine varyasyon ilkesinin uygulanmasından sonra, termoelektriğin sonlu elemanlar ifadesi Denklem (6.4) olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} [C^t] & [0] \\ [0] & [C^v] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{T}\} \\ \{\dot{V}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K^t] & [0] \\ [K^{vt}] & [K^v] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{V\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{Q\} + \{Q^P\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} \quad (6.4)$$

Burada  $[K^t]$  element termal iletkenlik katsayı matrisi,  $[C^t]$  element öz ısı matrisi,  $\{Q\}$  element ısı üretim yükü ve eleman taşınım yüzey ısı akış vektörlerinin toplamı,  $[K^v]$  element elektiriksel iletkenlik katsayı matrisi,  $[C^v]$  element dielektrik geçirgenlik katsayı matrisidir.

Ayrıca burada  $[K^{vt}] = \int_{vol} (\nabla\{N\}^T)^T [\sigma] [\alpha] (\nabla\{N\}^T) d(vol)$  element seebeck katsayısı bağlanma matrisi,  $\{Q^P\} = \int_{vol} (\nabla\{N\}^T)^T [\Pi] \{J\} d(vol)$  element Peltier ısı yük vektörüdür. Burada belirtilen  $\{N\}$  ise element şekil fonksiyonları,  $\{I\}$  düğüm akım yükü vektörüdür (Ansys Mechanical 2017).

## 6.2 Malzeme Tanımlama

Termal-Elektrik proje şemasında ilk önce malzeme tanımlama işlemi yapılmaktadır. Ticari TEJ modülünün etkin malzeme özellikleri, bakır iletkenlerin malzeme özellikleri ve dış elektrik direnci için malzeme özellikleri tanımlanmalıdır.

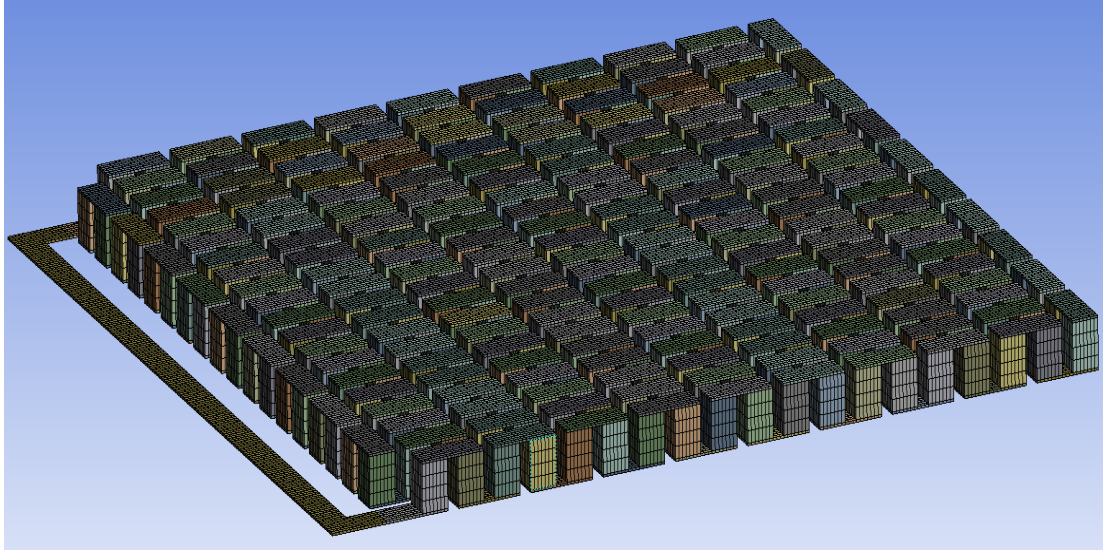
Malzeme tanımlamaları Tablo 6.2’de gösterilmektedir. Termal-Elektrik proje şemasında malzeme tanımlamak için en azından termal ısı iletkenliği tanımlanmalıdır. Sadece elektriksel direnç tanımlanırsa programın hata vermesine neden olmaktadır. Yük direnci, belirli bir malzemeden yapılmış bir kablo olabileceği gibi dış direnci değiştirilebilen direnç kaynakları da olabilmektedir. Düşünüldüğünde bu dirençlere herhangi bir ısı iletimi geçişi olmayabilir. Fakat programın hata vermesini önlemek amacıyla bakır iletkenin ısı iletim katsayısı alınmıştır. Bakır malzemesi program bünyesinden varsayılan olarak alınmıştır. Yük direnci malzemesinin elektriksel direnci,  $R_L = R$  alınarak hesaplanmıştır (Lee 2017).

**Tablo 6.2:** Malzeme tanımlamaları.

| Malzeme             | $k(W/mK)$ | $\alpha(V/K)$      | $\rho(\Omega m)$   |
|---------------------|-----------|--------------------|--------------------|
| Bakır               | 401       | -                  | $1.694 * 10^{-8}$  |
| P Tipi Yarı İletken | 1.5       | $162.8 * 10^{-6}$  | $1.024 * 10^{-5}$  |
| N Tipi Yarı İletken | 1.5       | $-162.8 * 10^{-6}$ | $1.024 * 10^{-5}$  |
| Dış Yük Direnci     | 401       | -                  | $1.3667 * 10^{-5}$ |

## 6.3 Mesh ve Sınır Koşulları

Model üzerinde her bir parçaya malzeme atandıktan sonra meshe geçilmektedir. Bakır ve yük dirence aynı element boyutlarında ( $2 * 10^{-4}m$ ) hacim boyutlandırması (Body Sizing) yapılmıştır. Yarı iletken malzemelerine ise ( $5 * 10^{-4}m$ ) olarak yapılmıştır. Şekil 6.1’de oluşturulan mesh gösterilmiştir.



**Şekil 6.1:** Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 için oluşturulan mesh.

Mesh kalitesi olarak Skewness ve Orthogonal Kaliteye bakılmıştır. Skewness ve Orthogonal Kalitesi sırasıyla, Şekil 6.2(a) ve (b)'de gösterilmektedir.

| Quality                                     |                     | Quality                                     |                     |
|---------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|---------------------|
| Check Mesh Quality                          | Yes, Errors         | Check Mesh Quality                          | Yes, Errors         |
| Error Limits                                | Standard Mechanical | Error Limits                                | Standard Mechanical |
| <input type="checkbox"/> Target Quality     | Default (0.050000)  | <input type="checkbox"/> Target Quality     | Default (0.050000)  |
| Smoothing                                   | High                | Smoothing                                   | High                |
| Mesh Metric                                 | Skewness            | Mesh Metric                                 | Orthogonal Quality  |
| <input type="checkbox"/> Min                | 1,3057e-010         | <input type="checkbox"/> Min                | 1,                  |
| <input type="checkbox"/> Max                | 1,3068e-010         | <input type="checkbox"/> Max                | 1,                  |
| <input type="checkbox"/> Average            | 1,3058e-010         | <input type="checkbox"/> Average            | 1,                  |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 0,                  | <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 0,                  |

**Şekil 6.2:** (a) Skewness

(b) Orthogonal Kalite

Skewness mesh kalite değerleri 0'a yaklaştıkça artarken, Orthogonal Kalite mesh değerleri 1'e yaklaştıkça artmaktadır (Ovalı 2017). Oluşturulan mesh'in element ve düğüm sayısı Şekil 6.3'de gösterilmiştir.

| Statistics                        |        |
|-----------------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> Nodes    | 704940 |
| <input type="checkbox"/> Elements | 126980 |

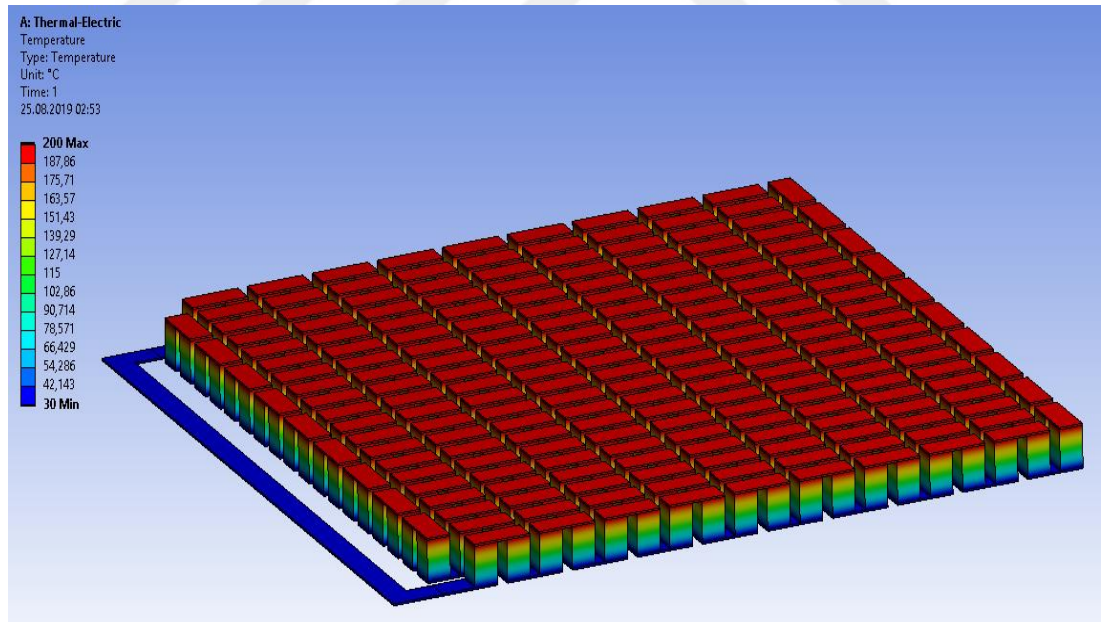
**Şekil 6.3:** Oluşturulan mesh'in düğüm ve element sayıları.

Termal-Elektrik için gerekli olan sınır koşulları; en az bir sıcaklık, taşınım, radyasyon ya da ısı akısı gibi termal bir sınır koşulu ile en az bir gerilim ya da akım gibi elektriksel bir sınır koşuludur. Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin katalog değerlerindeki çalışma sınır koşulları Tablo 6.1 verilmiştir. Bu sınır koşulları ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin sıcak yüzeyi için 200°C ve soğuk yüzeyi için 30°C'dir. Termal sınır koşullar tanımlandığına göre geriye sadece bir elektriksel sınır

koşulu belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için N yarı iletkeninin bulunduğu taraftaki bakır iletkenin ön yüzüne 0V olarak bir elektriksel gerilim verilmiştir. Böylelikle maksimum gerilim P yarı iletkenine bağlı bakırın ön yüzünde bir prob ile bakılabilmektedir. TEJ veriminin bulunabilmesi için sıcak yüzeyden olan ısı transfer miktarının bilinmesi gerekmektedir. Giriş ve çıkış komut dosyaları oluşturularak Ansys Mekanik APDL kodlamaları yapılmıştır. Isı reaksiyon probu yani Watt cinsinden ısı akısı için ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin sıcak yüzeyindeki 200°C sıcaklık değeri de giriş komut dosyasında sınır koşulu olarak oluşturulmuştur. Giriş ve çözüm komut dosyalarındaki Ansys Mekanik APDL kodlamaları, sırasıyla, Ek G ve Ek H'de verilmiştir. Gerilim ve akım yoğunlukları için problemler oluşturulmuştur.

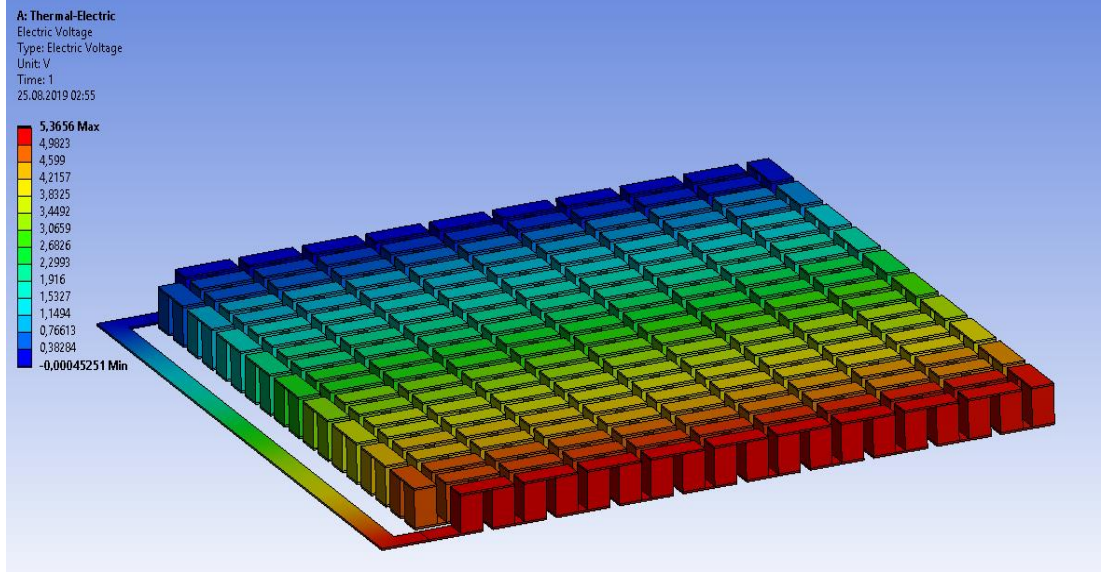
#### 6.4 Termal-Elektrik Simülasyonu

Girilen sınır şartları sonucunda elde edilen çözüm sonuçlarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 6.4'de ve elektrik gerilimi de Şekil 6.5'de gösterilmiştir.



**Şekil 6.4:** Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin sıcaklık dağılımı.

Elektrik gerilim probundaki elektrik gerilimi, P yarıiletkenine bağlı bakır iletkenin ön yüzünde 5.36 V olmuştur. Çözüm komut dosyasındaki kodlamalar ile sıcak yüzeyden çekilen ısı miktarının 136.39 W olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğu prob değeri ise  $9.7164 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  olarak okunulmaktadır.



**Şekil 6.5:** Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin elektrik gerilim dağılımı.

Akım yoğunluğunun ölçüldüğü prob yüzeyinin kesit alanına bölünerek akım değeri 1.36 A olarak hesaplanmıştır. Akım ve gerilimin çarpımı güç olarak nitelendirilmektedir. Böylelikle güç değeri 7.29 W olarak bulunmuştur. TEJ verimi ise çıkan güç miktarının sıcak yüzeyden çekilen ısı miktarına oranıdır ve %5.35 olarak bulunmuştur. Termal-Elektrik analiz ile elde edilen değerler ve Firma katalog değerleri Tablo 6.3'de verilmiştir.

**Tablo 6.3:** Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin katalog ve Termal-Elektrik değerleri.

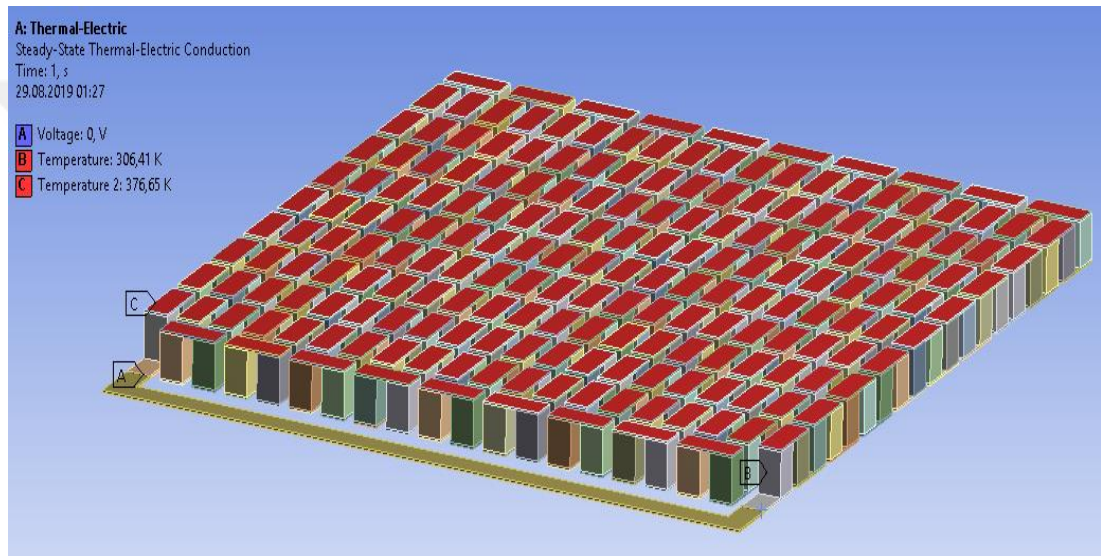
| Değerler        | U(Volt) | I(A)  | P(W)  | $\eta$ (%) |
|-----------------|---------|-------|-------|------------|
| Katalog         | 5.2     | 1.41  | 7.3   | 5.1        |
| Termal-Elektrik | 5.36    | 1.36  | 7.29  | 5.35       |
| Bağıl Hata      | %3.07   | %3.55 | %0.14 | %5         |

Tablo 6.3'de görüldüğü gibi, katalog değerleri ile Termal-Elektrik analiz değerleri birbiri ile yakınlık göstermektedir. Özellikle güç değerlerinin çok yakın olduğu görülmektedir. Bu karşılaştırma, çalışmada kullanılan Ansys-Termal-Elektrik programı ile elde edilen nümerik sonuçların doğruluğunu göstermektedir.

## 6.5 En Uygun Tasarımda Kullanılan Ticari TEJ'in Termal-Elektrik Simülasyonu

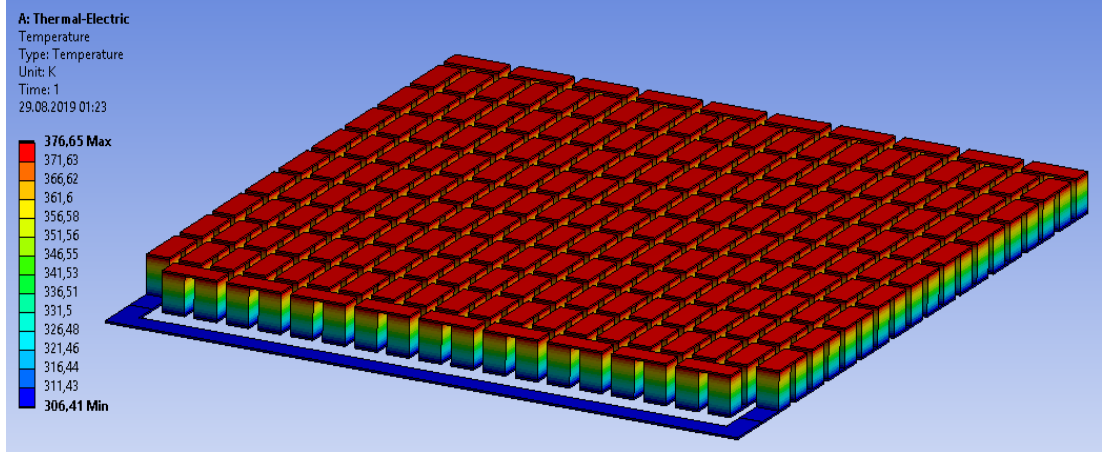
Tablo 4.2'de yer alan farklı dış ortam sıcaklıklarındaki  $R_r$  değerleri ile Tablo 4.3'deki farklı dış ortam sıcaklıklarına göre  $T_c$  ve  $T_h$  değerleri, Termal-Elektrik

programında sınır koşulları olarak uygulanarak simülasyon yapılmıştır. 268 K dış ortam sıcaklığındaki durumlar göz önünde bulundurularak,  $R_r = 1.261$  (Tablo 4.2) boyutsuz elektrik direncine göre elektriksel direnç hesaplanmış ve  $T_c = 306.41$  K ile  $T_h = 376.65$  K (Tablo 4.3) sıcaklıktaki sınır koşulları kullanılmıştır. En uygun tasarımda hesaplanan değerler ile Termal-Elektrik simülasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Termal-Elektrik programında uygulanan sınır koşulları Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Kullanılan malzeme değerleri ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 olduğu için Tablo 6.2’deki bakır, P ve N yarı iletken değerleri kullanılmıştır. Tablo 6.2’deki dış yük direncinin sadece elektriksel direnci değiştirilmiştir.



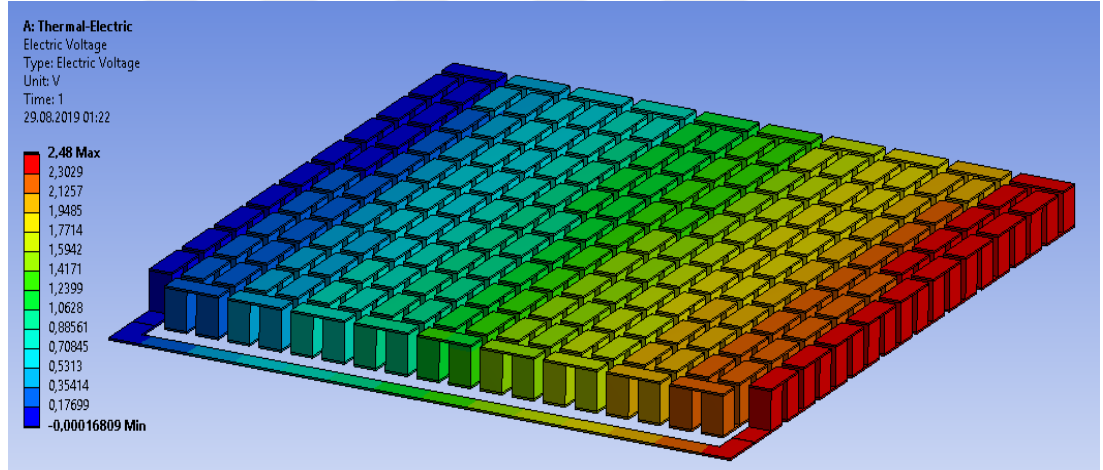
**Şekil 6.6:** 268 K dış ortam sıcaklığında ve  $R_r=1.261$  boyutsuz elektrik direncinde hesaplanan sıcaklık değerlerinin Termal-Elektrik programında uygulanması.

Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 kullanıldığı için Şekil 6.1’de gösterilen mesh ve mesh boyutları kullanılmıştır. Dolayısıyla Şekil 6.2(a) ve (b)’de gösterilen mesh kalite değerleri ile Şekil 6.3’de gösterilen element ve düğüm sayıları kullanılmıştır. Ek E ve Ek F’de belirtilen giriş ve çıkış komut dosyalarına benzer Ansys Mechanical APDL komutları ile sıcak yüzeyden çekilen ısı miktarı bulunmuştur. Simülasyon sonucundaki sıcaklık dağılımı Şekil 6.7’de gösterilmiştir.

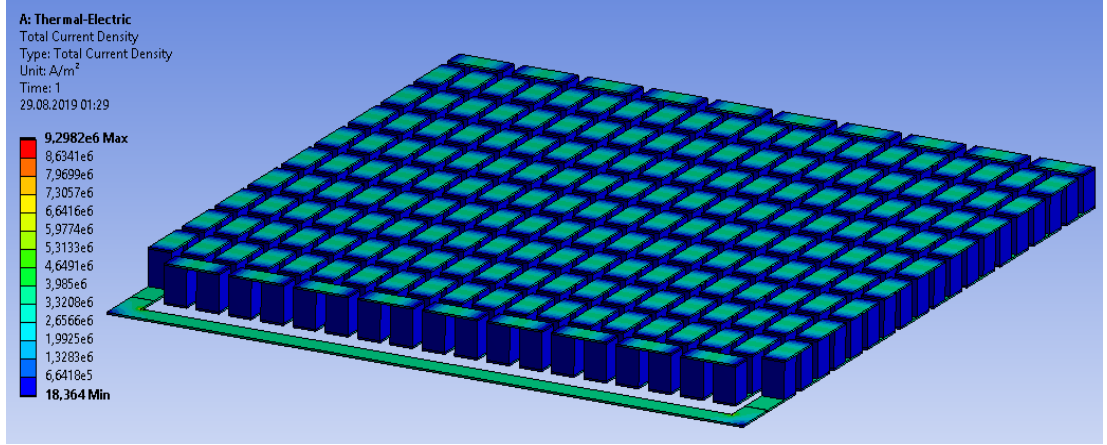


**Şekil 6.7:** 268 K dış ortam sıcaklığında ve  $R_r=1.261$  boyutsuz elektrik direncinde meydana gelen ticari TEJ modülünün sıcaklık dağılımı.

Hesaplanan sıcaklık değerleri sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Sıcaklık dağılımı hesaplanan değerlere göre simülasyon sonucu oluşmuştur. Simülasyon sonucundaki gerilim ve akım yoğunlukları sırasıyla Şekil 6.8 ve 6.9’da gösterilmektedir.



**Şekil 6.8:** 268 K dış ortam sıcaklığı ve  $R_r=1.261$  boyutsuz elektrik direncinde meydana gelen ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0’nin gerilim dağılımı.



**Şekil 6.9:** 268 K dış ortam sıcaklığı ve  $R_r=1.261$  boyutsuz elektrik direncinde meydana gelen ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin akım yoğunluğu dağılımı.

Maksimum gerilim 2.48 V (Şekil 6.8) ve maksimum akım yoğunluğu  $9.3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  (Şekil 6.9) olarak elde edilmiştir.

Gerilim ve akım yoğunluklarının daha düzgün bir şekilde belirlenebilmesi için programda problar yardımıyla gerilim ve akım yoğunlukları bulunmuştur. Problar P tipi yarıiletkenin bulunduğu maksimum gerilimin olduğu bakır iletken ile dış yük direnci arasındaki bağıntı noktasındaki yüzeyden elde edilmiştir. Prob değerleri Şekil 6.10(a) ve (b)'de gösterilmiştir.

| Details of "Voltage Probe"             |                    |
|----------------------------------------|--------------------|
| Definition                             |                    |
| Type                                   | Electric Voltage   |
| Location Method                        | Geometry Selection |
| Geometry                               | 1 Face             |
| Suppressed                             | No                 |
| Options                                |                    |
| <input type="checkbox"/> Display Time  | End Time           |
| Spatial Resolution                     | Use Maximum        |
| Results                                |                    |
| <input type="checkbox"/> Voltage Probe | 2,4798 V           |
| Maximum Value Over Time                |                    |
| <input type="checkbox"/> Voltage Probe | 2,4798 V           |
| Minimum Value Over Time                |                    |
| <input type="checkbox"/> Voltage Probe | 2,4798 V           |

**Şekil 6.10:** (a) Voltaj Probu

| Details of "Current Density Probe"    |                              |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Definition                            |                              |
| Type                                  | Current Density              |
| Location Method                       | Geometry Selection           |
| Geometry                              | 1 Face                       |
| Suppressed                            | No                           |
| Options                               |                              |
| Result Selection                      | Total                        |
| <input type="checkbox"/> Display Time | End Time                     |
| Spatial Resolution                    | Use Maximum                  |
| Results                               |                              |
| <input type="checkbox"/> Total        | 3,5615e+006 A/m <sup>2</sup> |
| Maximum Value Over Time               |                              |
| <input type="checkbox"/> Total        | 3,5615e+006 A/m <sup>2</sup> |
| Minimum Value Over Time               |                              |
| <input type="checkbox"/> Total        | 3,5615e+006 A/m <sup>2</sup> |

**(b) Akım Yoğunluğu Probu**

Akım yoğunluğu probunda okunan değer bakır yüzeyin kesit alanına bölünerek akım değeri hesaplanmıştır. Gerilim ile akım değerleri çarpılarak güç elde edilmiştir. Bulunan güç değerini komut dosyaları ile bulunan sıcak yüzeyden alınan ısı miktarına bölünerek ısı verim elde edilmiştir.

Matlab ile hesaplanan Tablo 4.3'deki değerler ile simülasyon sonucu oluşan değerler Tablo 6.4'de karşılaştırılmıştır. Tablo 6.4'de; A Matlab ile hesaplanan değerleri, B ise Termal-Elektrik simülasyonu sonucunda elde edilen değerleri göstermektedir.

**Tablo 6.4:** Matlab ile hesaplanan değerler ile Termal-Elektrik Simülasyon değerleri.

| Değerler | $T_{\infty 2}$ (K) | $R_r$ | $\rho$ ( $\Omega m$ ) | Akım(A) | Voltaj(V) | Güç(W) | $\eta$ (%) |
|----------|--------------------|-------|-----------------------|---------|-----------|--------|------------|
| A        | 268                | 1.261 | $1.7234 * 10^{-5}$    | 0.4840  | 2.5387    | 1.2287 | 2.34       |
| B        |                    |       |                       | 0.4986  | 2.48      | 1.2364 | 2.35       |
| A        | 278                | 1.264 | $1.7275 * 10^{-5}$    | 0.4497  | 2.3525    | 1.058  | 2.17       |
| B        |                    |       |                       | 0.4623  | 2.3048    | 1.065  | 2.18       |
| A        | 283                | 1.266 | $1.7302 * 10^{-5}$    | 0.4316  | 2.2646    | 0.977  | 2.08       |
| B        |                    |       |                       | 0.4441  | 2.218     | 0.985  | 2.1        |
| A        | 288                | 1.268 | $1.733 * 10^{-5}$     | 0.4136  | 2.1796    | 0.901  | 2          |
| B        |                    |       |                       | 0.426   | 2.1302    | 0.907  | 2.01       |
| A        | 293                | 1.269 | $1.7343 * 10^{-5}$    | 0.3964  | 2.08      | 0.824  | 1.91       |
| B        |                    |       |                       | 0.408   | 2.042     | 0.833  | 1.92       |
| A        | 298                | 1.271 | $1.7371 * 10^{-5}$    | 0.3783  | 1.9927    | 0.754  | 1.82       |
| B        |                    |       |                       | 0.389   | 1.9537    | 0.761  | 1.84       |
| A        | 303                | 1.273 | $1.7398 * 10^{-5}$    | 0.3612  | 1.9103    | 0.7    | 1.74       |
| B        |                    |       |                       | 0.372   | 1.8677    | 0.7    | 1.75       |

Tablo 6.4'de karşılaştırılan değerler arasındaki bağıl hata yüzdelikleri Tablo 6.5'de gösterilmiştir. Bağıl hatadaki gerçek değer Tablo 4.3'de gösterilen değerler olarak alınmıştır. Bakıldığında bağıl hata oranları çok küçüktür. En büyük bağıl hata dış ortam sıcaklığı 268 K dış ortam sıcaklığındaki akımda meydana gelmiştir ve bağıl hata değeri %3.01 olmaktadır.

**Tablo 6.5:** Tablo 6.4'deki değerlerin bağıl hata oranları.

| $T_{\infty 2}$ (K) | Akım(%) | Voltaj(%) | Güç(%) | $\eta$ (%) |
|--------------------|---------|-----------|--------|------------|
| 268                | 3.01    | 2.31      | 0.62   | 0.43       |
| 278                | 2.8     | 2.02      | 0.66   | 0.46       |
| 283                | 2.9     | 2.05      | 0.82   | 0.96       |
| 288                | 3       | 2.26      | 0.66   | 0.5        |
| 293                | 2.92    | 1.82      | 1.1    | 0.52       |
| 298                | 2.75    | 1.95      | 0.93   | 1.1        |
| 303                | 3       | 2.23      | 0      | 0.575      |

## **6.6 Ansys Fluent Çıkış Parametre Sonuçlarına Göre Thermal-Electric Simülasyonu**

### **6.6.1 Ticari Termoelektrik Jeneratör Modülü TGM-199-1.4-2.0'nin Ansys Fluent Çıktı Değerleri ile Thermal-Electric Simülasyonu**

Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 Şekil 6.1'de gösterilen mesh yapısı kullanılmıştır. TEJ modüllerinin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları Ansys Fluent programından ortalama sıcaklık olarak alınmıştır. Daha önceki simülasyonlar gibi N tipi yarı iletkenine bağlı bakır iletkenin ön yüzeyi 0V olarak ayarlanmıştır. Ansys Mechanical APDL kodlamaları ile ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin sıcak yüzeyinden çekilen ısı miktarı belirlenmiştir. İlk olarak, 268 K dış ortam sıcaklığındaki ticari TEJ modülünün Ansys Fluent programından alınan ortalama sıcaklık değerleri sıcaklık sınır koşulları olarak belirlenip, dış yük direncinin farklı elektriksel dirençleri belirlenerek, sistem optimizasyonu yapılmıştır. Dış yük direncinin farklı elektriksel dirençlerinin alınmasının nedeni; farklı boyutsuz elektrik dirençleri göz önünde bulundurularak dış yük direncinin elektriksel direncinin belirlenmesidir.

Dış yük direncinin elektriksel direnci, belirlenirken; dış ortam sıcaklığı, sınır şartlarında belirtilen TEJ modülünün soğuk yüzey sıcaklığı ve Ansys Mechanical APDL kodlamaları ile oluşturulan ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin sıcak yüzey sıcaklığı giriş parametreleri olarak belirlenmiştir. Elektrik gerilim probu, toplam akım yoğunluğu probu ve Ansys Mechanical APDL kodlarıyla oluşturulan çözüm komut dosyası ile ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin sıcak yüzeyinden çekilen ısı miktarı çözüm parametresi olarak belirlenmiştir. Bu oluşturulan parametre değerleri Şekil 6.11'de gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 6.11'deki değerler ile Tablo 6.6 oluşturulmuştur.

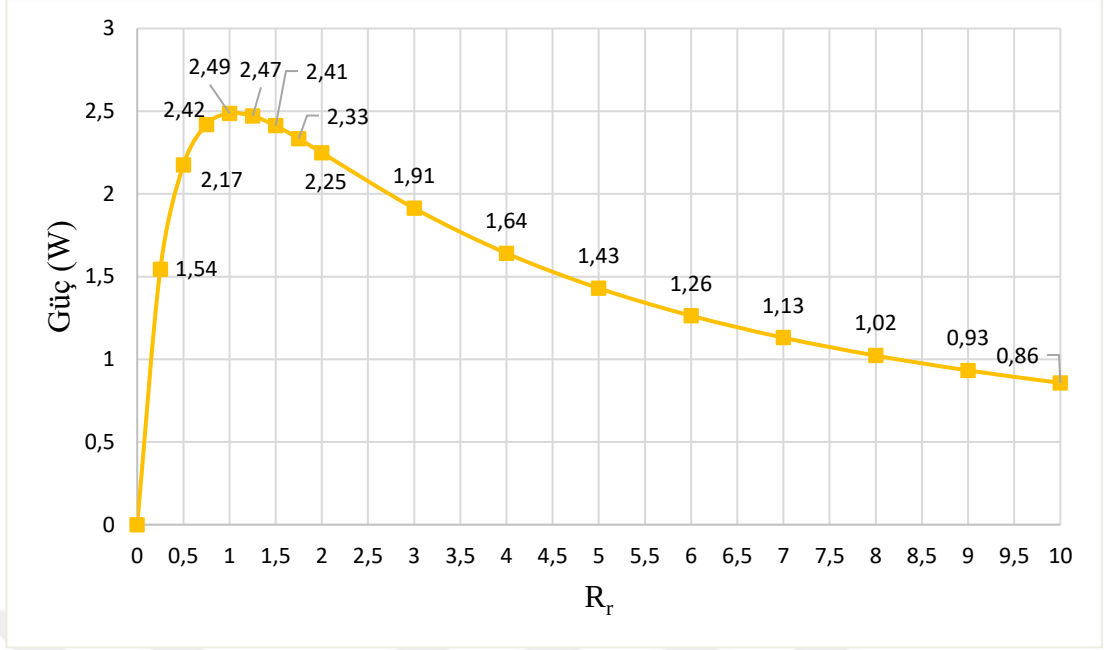
| Table of Design Points |                |                                                                       |                  |                            |                            |                                  |                                     |              |
|------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------|
|                        | A              | B                                                                     | C                | D                          | E                          | F                                | G                                   | H            |
| 1                      | Name           | P6 - Steady-State Thermal-Electric Conduction Environment Temperature | P7 - Resistivity | P9 - Temperature Magnitude | P10 - Commands (APDL) ARG1 | P2 - Current Density Probe Total | P3 - Voltage Probe Electric Voltage | P8 - my_heat |
| 2                      | Units          | K                                                                     | ohm m            | K                          |                            | A m^-2                           | V                                   |              |
| 3                      | DP 0 (Current) | 268                                                                   | 3,4167E-06       | 288,43                     | 387,64                     | 8,9394E+06                       | 1,2341                              | 85,541       |
| 4                      | DP 1           | 268                                                                   | 6,83E-06         | 288,43                     | 387,64                     | 7,5008E+06                       | 2,0699                              | 81,541       |
| 5                      | DP 2           | 268                                                                   | 1,025E-05        | 288,43                     | 387,64                     | 6,4591E+06                       | 2,6749                              | 78,543       |
| 6                      | DP 3           | 268                                                                   | 1,3667E-05       | 288,43                     | 387,64                     | 5,6721E+06                       | 3,132                               | 76,22        |
| 7                      | DP 4           | 268                                                                   | 1,7084E-05       | 288,43                     | 387,64                     | 5,056E+06                        | 3,4898                              | 74,367       |
| 8                      | DP 5           | 268                                                                   | 2,05E-05         | 288,43                     | 387,64                     | 4,5608E+06                       | 3,7774                              | 72,856       |
| 9                      | DP 6           | 268                                                                   | 2,3917E-05       | 288,43                     | 387,64                     | 4,1538E+06                       | 4,0137                              | 71,6         |
| 10                     | DP 7           | 268                                                                   | 2,7334E-05       | 288,43                     | 387,64                     | 3,8135E+06                       | 4,2114                              | 70,539       |
| 11                     | DP 9           | 268                                                                   | 4,1001E-05       | 288,43                     | 387,64                     | 2,8723E+06                       | 4,7579                              | 67,558       |
| 12                     | DP 10          | 268                                                                   | 5,4668E-05       | 288,43                     | 387,64                     | 2,3037E+06                       | 5,0881                              | 65,722       |
| 13                     | DP 11          | 268                                                                   | 6,8335E-05       | 288,43                     | 387,64                     | 1,923E+06                        | 5,3092                              | 64,479       |
| 14                     | DP 12          | 268                                                                   | 8,2E-05          | 288,43                     | 387,64                     | 1,6504E+06                       | 5,4675                              | 63,582       |
| 15                     | DP 13          | 268                                                                   | 9,567E-05        | 288,43                     | 387,64                     | 1,4454E+06                       | 5,5866                              | 62,903       |
| 16                     | DP 14          | 268                                                                   | 0,00010934       | 288,43                     | 387,64                     | 1,2857E+06                       | 5,6793                              | 62,372       |
| 17                     | DP 15          | 268                                                                   | 0,000123         | 288,43                     | 387,64                     | 1,1578E+06                       | 5,7536                              | 61,945       |
| 18                     | DP 16          | 268                                                                   | 0,00013667       | 288,43                     | 387,64                     | 1,053E+06                        | 5,8144                              | 61,595       |

**Şekil 6.11:** Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'nin 268 K dış ortam sıcaklığındaki farklı elektriksel dirençlerdeki tasarım noktaları.

Tablo 6.6'da, hesaplanan güç değerleri verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında: en yüksek güç çıktı  $R_r=1$ 'de meydana gelmiştir. Buna ilave olarak, en iyi güç çıktısı değerleri, boyutsuz elektrik direncinin ( $R_r$ ) 0.75 ve 1.5 arasında olduğu görülmüştür. Şekil 6.12'de de elde edilen güç çıktıların boyutsuz elektrik direnci ( $R_r$ ) ile değişimi verilmiştir.

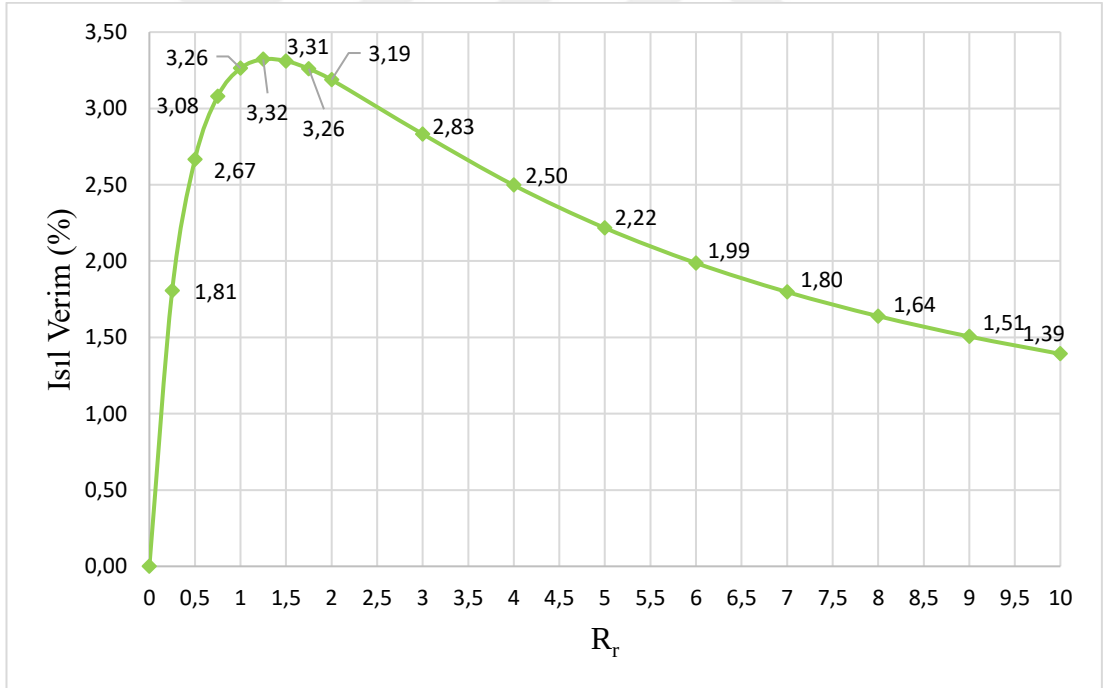
**Tablo 6.6:**  $T_{\infty}=268$  K için farklı  $R_r$  değerlerine göre TGM-199-1.4-2.0'nin Termal-Elektrik simülasyonu sonucu oluşan çıktı parametreleri.

| $R_r$ | $\dot{Q}_h(W)$ | Akım(A) | Voltaj(V) | Güç(W) | $\eta$ (%) |
|-------|----------------|---------|-----------|--------|------------|
| 0.25  | 85.54          | 1.25    | 1.23      | 1.54   | 1.81       |
| 0.5   | 81.54          | 1.05    | 2.07      | 2.17   | 2.67       |
| 0.75  | 78.54          | 0.90    | 2.67      | 2.42   | 3.08       |
| 1     | 76.22          | 0.79    | 3.13      | 2.49   | 3.26       |
| 1.25  | 74.37          | 0.71    | 3.49      | 2.47   | 3.32       |
| 1.5   | 72.86          | 0.64    | 3.78      | 2.41   | 3.31       |
| 1.75  | 71.60          | 0.58    | 4.01      | 2.33   | 3.26       |
| 2     | 70.54          | 0.53    | 4.21      | 2,25   | 3.19       |
| 3     | 67.56          | 0.40    | 4.76      | 1.91   | 2.83       |
| 4     | 65.72          | 0.32    | 5.09      | 1.64   | 2.50       |
| 5     | 64.48          | 0.27    | 5.31      | 1.43   | 2.22       |
| 6     | 63.58          | 0.23    | 5.47      | 1.26   | 1.99       |
| 7     | 62.90          | 0.20    | 5.59      | 1.13   | 1.80       |
| 8     | 62.37          | 0.18    | 5.68      | 1.02   | 1.64       |
| 9     | 61.95          | 0.16    | 5.75      | 0.93   | 1.51       |
| 10    | 61.60          | 0.15    | 5.81      | 0.86   | 1.39       |



**Şekil 6.12:** TGM-199-1.4-2.0'nin güç çıktısının farklı boyutsuz dirençlere göre değişimi (T<sub>∞2</sub> = 268 K için).

Şekil 6.13'de, hesaplanan ısı veriminin R<sub>r</sub> ile değişimi gösterilmiştir.



**Şekil 6.13:** TGM-199-1.4-2.0'nin ısı veriminin farklı boyutsuz dirençlere göre değişimi (T<sub>∞2</sub> = 268 K için) .

Boyutsuz elektrik direncinin (R<sub>r</sub>) 1 ve 2 değerleri için elde edilen ısı verimlerin, diğerlerinden daha yüksek olduğu Şekil 6.13'de görülmektedir. Isıl verimin en yüksek değerine ise R<sub>r</sub>=1.25 olduğunda ulaşılmaktadır (Şekil 6.13).

Şekil 6.12 ve 6.13’de 268 K dış ortam sıcaklığı için yapılan Termal-Elektrik simülasyonu, farklı dış ortam sıcaklıkları ( $T_{\infty 2}$ ) ve 0.75, 1, 1.25 ve 1.5 değerlerindeki boyutsuz elektrik dirençleri için de tekrarlanmıştır. Bu simülasyonlar yapılırken, farklı dış ortam sıcaklıklarına göre, Ansys Fluent analizi ile çıktı parametresi olarak elde edilen ortalama sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları kullanılmıştır. Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0 için bu durum Şekil 6.14’de gösterilmiştir.

| Table of Design Points |                |                  |                                                                   |                            |                           |                                     |                                  |              |
|------------------------|----------------|------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------|
|                        | A              | B                | C                                                                 | D                          | E                         | F                                   | G                                | H            |
| 1                      | Name           | P1 - Resistivity | P2 - Steady-State Thermal-Electric Conduc... Environ... Temper... | P3 - Temperature Magnitude | P4 - Commands (APDL) ARG1 | P5 - Voltage Probe Electric Voltage | P6 - Current Density Probe Total | P7 - my_heat |
| 2                      | Units          | ohm m            | K                                                                 | K                          |                           | V                                   | A m^-2                           |              |
| 3                      | DP 0 (Current) | 1,025E-05        | 268                                                               | 288,43                     | 387,64                    | 2,6749                              | 6,4591E+06                       | 78,543       |
| 4                      | DP 1           | 1,3667E-05       | 268                                                               | 288,43                     | 387,64                    | 3,132                               | 5,6721E+06                       | 76,22        |
| 5                      | DP 2           | 1,7084E-05       | 268                                                               | 288,43                     | 387,64                    | 3,4898                              | 5,056E+06                        | 74,367       |
| 6                      | DP 3           | 2,05E-05         | 268                                                               | 288,43                     | 387,64                    | 3,7774                              | 4,5608E+06                       | 72,856       |
| 7                      | DP 4           | 1,025E-05        | 278                                                               | 296,89                     | 388,6                     | 2,4722                              | 5,9697E+06                       | 72,769       |
| 8                      | DP 5           | 1,3667E-05       | 278                                                               | 296,89                     | 388,6                     | 2,8947                              | 5,2424E+06                       | 70,59        |
| 9                      | DP 6           | 1,7084E-05       | 278                                                               | 296,89                     | 388,6                     | 3,2255                              | 4,6731E+06                       | 68,854       |
| 10                     | DP 7           | 2,05E-05         | 278                                                               | 296,89                     | 388,6                     | 3,4914                              | 4,2154E+06                       | 67,441       |
| 11                     | DP 8           | 1,025E-05        | 283                                                               | 301,17                     | 389,36                    | 2,3771                              | 5,74E+06                         | 70,065       |
| 12                     | DP 9           | 1,3667E-05       | 283                                                               | 301,17                     | 389,36                    | 2,7834                              | 5,0408E+06                       | 67,953       |
| 13                     | DP 10          | 1,7084E-05       | 283                                                               | 301,17                     | 389,36                    | 3,1015                              | 4,4934E+06                       | 66,273       |
| 14                     | DP 11          | 2,05E-05         | 283                                                               | 301,17                     | 389,36                    | 3,3571                              | 4,0533E+06                       | 64,905       |
| 15                     | DP 12          | 1,025E-05        | 288                                                               | 305,44                     | 390,12                    | 2,2823                              | 5,511E+06                        | 67,362       |
| 16                     | DP 13          | 1,3667E-05       | 288                                                               | 305,44                     | 390,12                    | 2,6724                              | 4,8397E+06                       | 65,319       |
| 17                     | DP 14          | 1,7084E-05       | 288                                                               | 305,44                     | 390,12                    | 2,9778                              | 4,3142E+06                       | 63,694       |
| 18                     | DP 15          | 2,05E-05         | 288                                                               | 305,44                     | 390,12                    | 3,2233                              | 3,8918E+06                       | 62,372       |
| 19                     | DP 16          | 1,025E-05        | 293                                                               | 309,72                     | 390,88                    | 2,1872                              | 5,2815E+06                       | 64,644       |
| 20                     | DP 17          | 1,3667E-05       | 293                                                               | 309,72                     | 390,88                    | 2,5611                              | 4,6382E+06                       | 62,671       |
| 21                     | DP 18          | 1,7084E-05       | 293                                                               | 309,72                     | 390,88                    | 2,8538                              | 4,1346E+06                       | 61,103       |
| 22                     | DP 19          | 2,05E-05         | 293                                                               | 309,72                     | 390,88                    | 3,0891                              | 3,7297E+06                       | 59,828       |
| 23                     | DP 20          | 1,025E-05        | 298                                                               | 313,99                     | 391,65                    | 2,0927                              | 5,0532E+06                       | 61,935       |
| 24                     | DP 21          | 1,3667E-05       | 298                                                               | 313,99                     | 391,65                    | 2,4505                              | 4,4378E+06                       | 60,033       |
| 25                     | DP 22          | 1,7084E-05       | 298                                                               | 313,99                     | 391,65                    | 2,7305                              | 3,956E+06                        | 58,522       |
| 26                     | DP 23          | 2,05E-05         | 298                                                               | 313,99                     | 391,65                    | 2,9557                              | 3,5686E+06                       | 57,294       |
| 27                     | DP 24          | 1,025E-05        | 303                                                               | 318,27                     | 392,41                    | 1,9976                              | 4,8237E+06                       | 59,203       |
| 28                     | DP 25          | 1,3667E-05       | 303                                                               | 318,27                     | 392,41                    | 2,3392                              | 4,2363E+06                       | 57,373       |
| 29                     | DP 26          | 1,7084E-05       | 303                                                               | 318,27                     | 392,41                    | 2,6066                              | 3,7764E+06                       | 55,921       |
| 30                     | DP 27          | 2,05E-05         | 303                                                               | 318,27                     | 392,41                    | 2,8215                              | 3,4067E+06                       | 54,741       |

**Şekil 6.14:** TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, ve 1.5 değerlerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre tasarım noktaları.

Farklı dış ortam sıcaklıkları giriş parametresi olarak alınıp, çıktı parametresi olarak da; Ansys Fluent analizi sonucunda elde edilen, ortalama sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları alınarak, Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0’nin Termal-Elektrik simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon sonucunda elde edilen güç, akım ve verim gibi çıkış parametre değerleri Tablo 6.7’de verilmiştir.

**Tablo 6.7:** TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerlerinde, farklı dış ortam sıcaklıklarına göre elde edilen çıkış parametre değerleri.

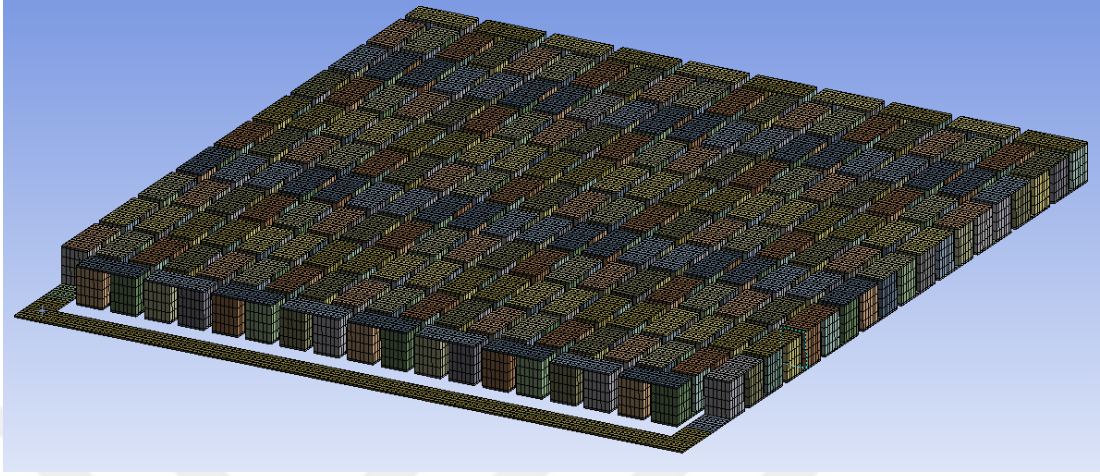
| $T_{\infty 2}(K)$ | $R_r$ | $\dot{Q}_h (W)$ | Akım(A) | Voltaj(V) | Güç(W) | $\eta(\%)$ |
|-------------------|-------|-----------------|---------|-----------|--------|------------|
| 268               | 0.75  | 78.543          | 0.90    | 2.67      | 2.42   | 3.08       |
|                   | 1     | 76.22           | 0.79    | 3.13      | 2.49   | 3.26       |
|                   | 1.25  | 74.367          | 0.71    | 3.49      | 2.47   | 3.32       |
|                   | 1.5   | 72.856          | 0.64    | 3.78      | 2.41   | 3.31       |
| 278               | 0.75  | 72.769          | 0.84    | 2.47      | 2.07   | 2.84       |
|                   | 1     | 70.59           | 0.73    | 2.89      | 2.12   | 3.01       |
|                   | 1.25  | 68.854          | 0.65    | 3.23      | 2.11   | 3.06       |
|                   | 1.5   | 67.441          | 0.59    | 3.49      | 2.06   | 3.06       |
| 283               | 0.75  | 70.065          | 0.80    | 2.38      | 1.91   | 2.73       |
|                   | 1     | 67.953          | 0.71    | 2.78      | 1.96   | 2.89       |
|                   | 1.25  | 66.273          | 0.63    | 3.10      | 1.95   | 2.94       |
|                   | 1.5   | 64.905          | 0.57    | 3.36      | 1.91   | 2.94       |
| 288               | 0.75  | 67.362          | 0.77    | 2.28      | 1.76   | 2.61       |
|                   | 1     | 65.319          | 0.68    | 2.67      | 1.81   | 2.77       |
|                   | 1.25  | 63.694          | 0.60    | 2.98      | 1.80   | 2.82       |
|                   | 1.5   | 62.372          | 0.54    | 3.22      | 1.76   | 2.82       |
| 293               | 0.75  | 64.644          | 0.74    | 2.19      | 1.62   | 2.50       |
|                   | 1     | 62.671          | 0.65    | 2.56      | 1.66   | 2.65       |
|                   | 1.25  | 61.103          | 0.58    | 2.85      | 1.65   | 2.70       |
|                   | 1.5   | 59.828          | 0.52    | 3.09      | 1.61   | 2.70       |
| 298               | 0.75  | 61.935          | 0.71    | 2.09      | 1.48   | 2.39       |
|                   | 1     | 60.033          | 0.62    | 2.45      | 1.52   | 2.54       |
|                   | 1.25  | 58.522          | 0.55    | 2.73      | 1.51   | 2.58       |
|                   | 1.5   | 57.294          | 0.50    | 2.96      | 1.48   | 2.58       |
| 303               | 0.75  | 59.203          | 0.68    | 2.00      | 1.35   | 2.28       |
|                   | 1     | 57.373          | 0.59    | 2.34      | 1.39   | 2.42       |
|                   | 1.25  | 55.921          | 0.53    | 2.61      | 1.38   | 2.46       |
|                   | 1.5   | 54.741          | 0.48    | 2.82      | 1.35   | 2.46       |

Dış ortam sıcaklığı arttıkça güç ve ısı verimlerin azaldığı ve aynı boyutsuz elektrik direncine sahip olan durumlarda da, dış ortam sıcaklığı arttıkça akım ve gerilim değerlerinin azaldığı Tablo 6.7’de görülmektedir.

#### 6.6.2 Farklı Boyutlardaki Termoelektrik Jeneratör Modülleri TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0’nin Ansys Fluent Çıktı Değerleri ile Thermal-Electric Simülasyonu

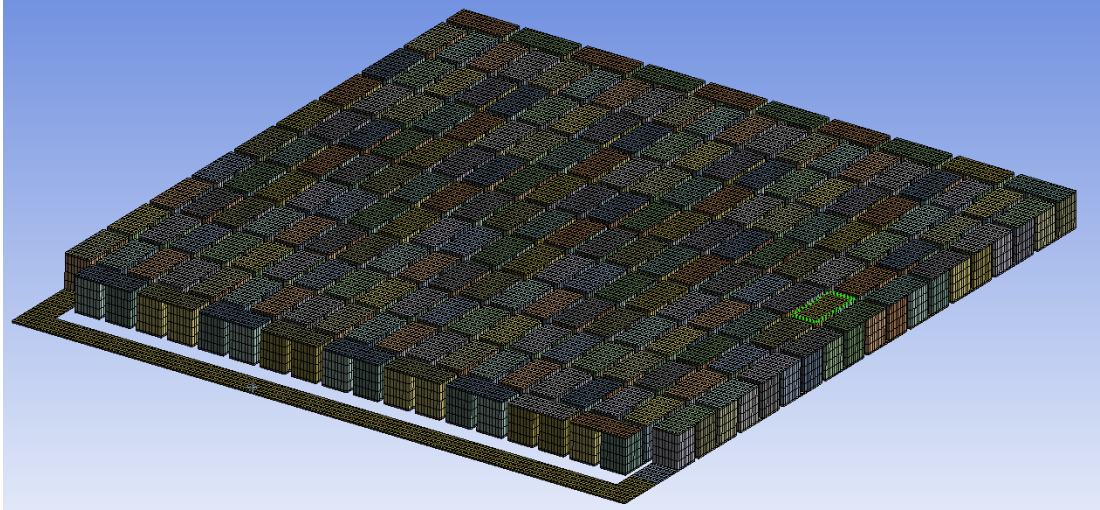
Farklı boyutlarda belirlenen TEJ modülü TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0’nin oluşturulan mesh yapıları Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’da verilmiştir. TGM-199-

1.5-2.0 farklı boyuttaki TEJ modülünün mesh boyutları, bakır iletkenler ve dış yük direnci için  $2.5 * 10^{-4}m$  ve p ile n tipi yarı iletkenler için ise  $5 * 10^{-4}m$  kullanılmıştır.



**Şekil 6.15:** Farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.5-2.0'nin oluşturulan mesh yapısı.

TGM-199-1.5-2.0 farklı boyuttaki TEJ modülünün mesh boyutları bakır iletkenler ve dış yük direnci için  $2 * 10^{-4}m$  ve p ile n tipi yarı iletkenler için ise  $5 * 10^{-4}m$  kullanılmıştır.



**Şekil 6.16:** Farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'nin oluşturulan mesh yapısı.

Farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.5-2.0'nin mesh kaliteleri, Şekil 6.17(a) ile (b)'de gösterilmiştir. Tüm modüllerin mesh kalitesi değerleri birbiriyle aynı gibi görünmektedir. Bunun nedeni, kenar uzunluklarına göre düzgün bir şekilde mesh boyutlarının verilmesidir.

| Quality                                     |                     |
|---------------------------------------------|---------------------|
| Check Mesh Quality                          | Yes, Errors         |
| Error Limits                                | Standard Mechanical |
| <input type="checkbox"/> Target Quality     | Default (0.050000)  |
| Smoothing                                   | High                |
| Mesh Metric                                 | Skewness            |
| <input type="checkbox"/> Min                | 1,3057e-010         |
| <input type="checkbox"/> Max                | 1,3067e-010         |
| <input type="checkbox"/> Average            | 1,3058e-010         |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 0,                  |

| Quality                                     |                     |
|---------------------------------------------|---------------------|
| Check Mesh Quality                          | Yes, Errors         |
| Error Limits                                | Standard Mechanical |
| <input type="checkbox"/> Target Quality     | Default (0.050000)  |
| Smoothing                                   | High                |
| Mesh Metric                                 | Orthogonal Quality  |
| <input type="checkbox"/> Min                | 1,                  |
| <input type="checkbox"/> Max                | 1,                  |
| <input type="checkbox"/> Average            | 1,                  |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 0,                  |

**Şekil 6.17:** TGM-199-1.5-2.0 için (a) Skewness Kalite (b)Orthogonal Kalite

Farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'nin mesh kaliteleri Şekil 6.18(a) ile (b)'de verilmiştir.

| Quality                                     |                     |
|---------------------------------------------|---------------------|
| Check Mesh Quality                          | Yes, Errors         |
| Error Limits                                | Standard Mechanical |
| <input type="checkbox"/> Target Quality     | Default (0.050000)  |
| Smoothing                                   | High                |
| Mesh Metric                                 | Skewness            |
| <input type="checkbox"/> Min                | 1,3057e-010         |
| <input type="checkbox"/> Max                | 1,3069e-010         |
| <input type="checkbox"/> Average            | 1,3058e-010         |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 0,                  |

| Quality                                     |                     |
|---------------------------------------------|---------------------|
| Check Mesh Quality                          | Yes, Errors         |
| Error Limits                                | Standard Mechanical |
| <input type="checkbox"/> Target Quality     | Default (0.050000)  |
| Smoothing                                   | High                |
| Mesh Metric                                 | Orthogonal Quality  |
| <input type="checkbox"/> Min                | 1,                  |
| <input type="checkbox"/> Max                | 1,                  |
| <input type="checkbox"/> Average            | 1,                  |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 0,                  |

**Şekil 6.18:** TGM-199-1.6-2.0 için (a) Skewness Kalite (b)Orthogonal Kalite

TGM-199-1.5-2.0 farklı boyuttaki TEJ modülünün element ve düğüm sayıları Şekil 6.19'da verilmiştir. TGM-199-1.6-2.0 farklı boyuttaki TEJ modülü ile TGM-199-1.4-2.0 ticari TEJ modülüne göre, TGM-199-1.5-2.0 farklı boyuttaki TEJ modülünün element ve düğüm sayısı daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, girilen mesh boyutlarıyla ilgilidir.

| Statistics                        |        |
|-----------------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> Nodes    | 520476 |
| <input type="checkbox"/> Elements | 91848  |

**Şekil 6.19:** Farklı Boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.5-2.0'nin element ve düğüm sayısı.

Farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'nin element ve düğüm sayıları Şekil 6.20'de verilmiştir.

| Statistics                        |        |
|-----------------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> Nodes    | 865750 |
| <input type="checkbox"/> Elements | 161040 |

**Şekil 6.20:** Farklı Boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'nin element ve düğüm sayısı.

Farklı dış ortam sıcaklıkları giriş parametresi olarak, Ansys Fluent analizi sonucunda elde edilen ortalama sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları ise çıktı parametresi olarak alınıp, farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.5-2.0'nin Termal-Elektrik simülasyonu yapılmıştır. Dört adet belirlenen boyutsuz elektrik direnci ile farklı dış ortam sıcaklıklarına göre Termal-Elektrik simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyonda; Akım değeri, akım yoğunluğu probunun olduğu bakır iletkenin kesit alanı  $1.5 \times 10^{-7} \text{m}^2$  ile çarpılarak bulunmuştur.

Yapılan simülasyon sonucunda elde edilen tasarım noktaları Şekil 6.21'de gösterilmiştir.

| Table of Design Points |                |                  |                                                                   |                            |                           |                                     |                                  |              |
|------------------------|----------------|------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------|
|                        | A              | B                | C                                                                 | D                          | E                         | F                                   | G                                | H            |
| 1                      | Name           | P1 - Resistivity | P2 - Steady-State Thermal-Electric Conduc... Environ... Temper... | P3 - Temperature Magnitude | P4 - Commands (APDL) ARG1 | P5 - Voltage Probe Electric Voltage | P6 - Current Density Probe Total | P7 - my_heat |
| 2                      | Units          | ohm m            | K                                                                 | K                          |                           | V                                   | A m^-2                           |              |
| 3                      | DP 0 (Current) | 8,9122E-06       | 268                                                               | 290,22                     | 386,01                    | 2,4681                              | 6,9793E+06                       | 87,652       |
| 4                      | DP 1           | 1,1883E-05       | 268                                                               | 290,22                     | 386,01                    | 2,9055                              | 6,1623E+06                       | 85,115       |
| 5                      | DP 2           | 1,4854E-05       | 268                                                               | 290,22                     | 386,01                    | 3,2513                              | 5,5164E+06                       | 83,073       |
| 6                      | DP 3           | 1,7824E-05       | 268                                                               | 290,22                     | 386,01                    | 3,5313                              | 4,9933E+06                       | 81,395       |
| 7                      | DP 4           | 8,9122E-06       | 278                                                               | 298,56                     | 387,19                    | 2,2831                              | 6,4563E+06                       | 81,298       |
| 8                      | DP 5           | 1,1883E-05       | 278                                                               | 298,56                     | 387,19                    | 2,6879                              | 5,7006E+06                       | 78,914       |
| 9                      | DP 6           | 1,4854E-05       | 278                                                               | 298,56                     | 387,19                    | 3,0078                              | 5,1033E+06                       | 76,999       |
| 10                     | DP 7           | 1,7824E-05       | 278                                                               | 298,56                     | 387,19                    | 3,2669                              | 4,6194E+06                       | 75,427       |
| 11                     | DP 8           | 8,9122E-06       | 283                                                               | 302,77                     | 388                       | 2,1953                              | 6,208E+06                        | 78,284       |
| 12                     | DP 9           | 1,1883E-05       | 283                                                               | 302,77                     | 388                       | 2,5845                              | 5,4815E+06                       | 75,974       |
| 13                     | DP 10          | 1,4854E-05       | 283                                                               | 302,77                     | 388                       | 2,8922                              | 4,9071E+06                       | 74,118       |
| 14                     | DP 11          | 1,7824E-05       | 283                                                               | 302,77                     | 388                       | 3,1414                              | 4,4419E+06                       | 72,596       |
| 15                     | DP 12          | 8,9122E-06       | 288                                                               | 306,98                     | 388,82                    | 2,1078                              | 5,9604E+06                       | 75,272       |
| 16                     | DP 13          | 1,1883E-05       | 288                                                               | 306,98                     | 388,82                    | 2,4815                              | 5,263E+06                        | 73,035       |
| 17                     | DP 14          | 1,4854E-05       | 288                                                               | 306,98                     | 388,82                    | 2,7769                              | 4,7116E+06                       | 71,241       |
| 18                     | DP 15          | 1,7824E-05       | 288                                                               | 306,98                     | 388,82                    | 3,0162                              | 4,2649E+06                       | 69,77        |
| 19                     | DP 16          | 8,9122E-06       | 293                                                               | 311,19                     | 389,63                    | 2,02                                | 5,7122E+06                       | 72,241       |
| 20                     | DP 17          | 1,1883E-05       | 293                                                               | 311,19                     | 389,63                    | 2,3782                              | 5,0439E+06                       | 70,081       |
| 21                     | DP 18          | 1,4854E-05       | 293                                                               | 311,19                     | 389,63                    | 2,6613                              | 4,5155E+06                       | 68,349       |
| 22                     | DP 19          | 1,7824E-05       | 293                                                               | 311,19                     | 389,63                    | 2,8907                              | 4,0874E+06                       | 66,929       |
| 23                     | DP 20          | 8,9122E-06       | 298                                                               | 315,41                     | 390,45                    | 1,9323                              | 5,4641E+06                       | 69,202       |
| 24                     | DP 21          | 1,1883E-05       | 298                                                               | 315,41                     | 390,45                    | 2,2749                              | 4,8248E+06                       | 67,12        |
| 25                     | DP 22          | 1,4854E-05       | 298                                                               | 315,41                     | 390,45                    | 2,5458                              | 4,3194E+06                       | 65,451       |
| 26                     | DP 23          | 1,7824E-05       | 298                                                               | 315,41                     | 390,45                    | 2,7652                              | 3,9099E+06                       | 64,084       |
| 27                     | DP 24          | 8,9122E-06       | 303                                                               | 319,62                     | 391,27                    | 1,8448                              | 5,2167E+06                       | 66,164       |
| 28                     | DP 25          | 1,1883E-05       | 303                                                               | 319,62                     | 391,27                    | 2,1719                              | 4,6064E+06                       | 64,161       |
| 29                     | DP 26          | 1,4854E-05       | 303                                                               | 319,62                     | 391,27                    | 2,4306                              | 4,1239E+06                       | 62,556       |
| 30                     | DP 27          | 1,7824E-05       | 303                                                               | 319,62                     | 391,27                    | 2,6401                              | 3,733E+06                        | 61,243       |

**Şekil 6.21:** TGM-199-1.5-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre tasarım noktaları.

Bu tasarım noktalarındaki değerler ile hesaplanan güç, akım ve verim gibi çıkış parametre değerleri Tablo 6.8'de verilmiştir.

**Tablo 6.8:** TGM-199-1.5-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerlerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre çıkış parametreleri.

| $T_{\infty 2}$ (K) | $R_r$ | $\dot{Q}_h$ (W) | Akım (A) | Voltaj (V) | Güç (W) | $\eta$ (%) |
|--------------------|-------|-----------------|----------|------------|---------|------------|
| 268                | 0.75  | 87.652          | 0.98     | 2.47       | 2.41    | 2.75       |
|                    | 1     | 85.115          | 0.86     | 2.91       | 2.51    | 2.95       |
|                    | 1.25  | 83.073          | 0.77     | 3.25       | 2.51    | 3.02       |
|                    | 1.5   | 81.395          | 0.70     | 3.53       | 2.47    | 3.03       |
| 278                | 0.75  | 81.298          | 0.90     | 2.28       | 2.06    | 2.54       |
|                    | 1     | 78.914          | 0.80     | 2.69       | 2.15    | 2.72       |
|                    | 1.25  | 76.999          | 0.71     | 3.01       | 2.15    | 2.79       |
|                    | 1.5   | 75.427          | 0.65     | 3.27       | 2.11    | 2.80       |
| 283                | 0.75  | 78.284          | 0.87     | 2.20       | 1.91    | 2.44       |
|                    | 1     | 75.974          | 0.77     | 2.58       | 1.98    | 2.61       |
|                    | 1.25  | 74.118          | 0.69     | 2.89       | 1.99    | 2.68       |
|                    | 1.5   | 72.596          | 0.62     | 3.14       | 1.95    | 2.69       |
| 288                | 0.75  | 75.272          | 0.83     | 2.11       | 1.76    | 2.34       |
|                    | 1     | 73.035          | 0.74     | 2.48       | 1.83    | 2.50       |
|                    | 1.25  | 71.241          | 0.66     | 2.78       | 1.83    | 2.57       |
|                    | 1.5   | 69.77           | 0.60     | 3.02       | 1.80    | 2.58       |
| 293                | 0.75  | 72.241          | 0.80     | 2.02       | 1.62    | 2.24       |
|                    | 1     | 70.081          | 0.71     | 2.38       | 1.68    | 2.40       |
|                    | 1.25  | 68.349          | 0.63     | 2.66       | 1.68    | 2.46       |
|                    | 1.5   | 66.929          | 0.57     | 2.89       | 1.65    | 2.47       |
| 298                | 0.75  | 69.202          | 0.76     | 1.93       | 1.48    | 2.14       |
|                    | 1     | 67.12           | 0.68     | 2.27       | 1.54    | 2.29       |
|                    | 1.25  | 65.451          | 0.60     | 2.55       | 1.54    | 2.35       |
|                    | 1.5   | 64.084          | 0.55     | 2.77       | 1.51    | 2.36       |
| 303                | 0.75  | 66.164          | 0.73     | 1.84       | 1.35    | 2.04       |
|                    | 1     | 64.161          | 0.64     | 2.17       | 1.40    | 2.18       |
|                    | 1.25  | 62.556          | 0.58     | 2.43       | 1.40    | 2.24       |
|                    | 1.5   | 61.243          | 0.52     | 2.64       | 1.38    | 2.25       |

Tablo 6.8’de görüldüğü gibi, TGM-199-1.4-2.0’de olduğu gibi TGM-199-1.5-2.0 modülünde de, dış ortam sıcaklığı arttıkça güç ve ısı verim değerleri azalmaktadır. Ayrıca, aynı boyutsuz elektrik direncine sahip olan durumlarda da, dış ortam sıcaklığı arttıkça akım ve voltaj (gerilim) değerlerinin azaldığı Tablo 6.8’de görülmektedir.

TGM-199-1.6-2.0’nin Termal-Elektrik simülasyonu için TGM-199-1.5-2.0 ile aynı yöntem izlenmiştir. Akım değeri, akım yoğunluğu probunun olduğu bakır iletkenin kesit alanı  $1.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2$  ile çarpılarak bulunmuştur.

Yapılan simülasyon sonucunda elde edilen tasarım noktaları Şekil 6.22’de gösterilmiştir.

| Table of Design Points |                |                     |                                                                      |                            |                           |                                     |                                  |              |
|------------------------|----------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------|
|                        | A              | B                   | C                                                                    | D                          | E                         | F                                   | G                                | H            |
| 1                      | Name           | P1 - Resistivity    | P2 - Steady-State Thermal-Electric Conductivity-Environ... Temper... | P3 - Temperature Magnitude | P4 - Commands (APDL) ARG1 | P5 - Voltage Probe Electric Voltage | P6 - Current Density Probe Total | P7 - my_heat |
| 2                      | Units          | ohm m               | K                                                                    | K                          |                           | V                                   | A m^-2                           |              |
| 3                      | DP 0 (Current) | 8,337E-06           | 268                                                                  | 292,32                     | 384,71                    | 2,3695                              | 7,3231E+06                       | 96,215       |
| 4                      | DP 1           | 1,1116E-05          | 268                                                                  | 292,32                     | 384,71                    | 2,7909                              | 6,4694E+06                       | 93,433       |
| 5                      | DP 2           | 1,3895E-05          | 268                                                                  | 292,32                     | 384,71                    | 3,1244                              | 5,794E+06                        | 91,193       |
| 6                      | DP 3           | 1,6674E-05          | 268                                                                  | 292,32                     | 384,71                    | 3,9948                              | 5,2462E+06                       | 89,351       |
| 7                      | DP 4           | 8,337E-06           | 278                                                                  | 300,14                     | 386,48                    | 2,2139                              | 6,8422E+06                       | 90,153       |
| 8                      | DP 5           | 1,1116E-05          | 278                                                                  | 300,14                     | 386,48                    | 2,6077                              | 6,0447E+06                       | 87,512       |
| 9                      | DP 6           | 1,389E-05           | 278                                                                  | 300,14                     | 386,48                    | 2,9188                              | 5,4147E+06                       | 85,393       |
| 10                     | DP 7           | 1,6674E-05          | 278                                                                  | 300,14                     | 386,48                    | 3,172                               | 4,902E+06                        | 83,646       |
| 11                     | DP 8           | 8,337E-06           | 283                                                                  | 304,21                     | 387,39                    | 2,1326                              | 6,5911E+06                       | 86,972       |
| 12                     | DP 9           | 1,1116E-05          | 283                                                                  | 304,21                     | 387,39                    | 2,5121                              | 5,8229E+06                       | 84,408       |
| 13                     | DP 10          | 1,3895E-05          | 283                                                                  | 304,21                     | 387,39                    | 2,8123                              | 5,2151E+06                       | 82,348       |
| 14                     | DP 11          | 1,6674E-05          | 283                                                                  | 304,21                     | 387,39                    | 3,0557                              | 4,7222E+06                       | 80,658       |
| 15                     | DP 12          | 8,337E-06           | 288                                                                  | 308,34                     | 388,29                    | 2,0496                              | 6,3345E+06                       | 83,709       |
| 16                     | DP 13          | 1,1116E-05          | 288                                                                  | 308,34                     | 388,29                    | 2,4143                              | 5,5963E+06                       | 81,226       |
| 17                     | DP 14          | 1,3895E-05          | 288                                                                  | 308,34                     | 388,29                    | 2,7028                              | 5,0122E+06                       | 79,232       |
| 18                     | DP 15          | 1,6674E-05          | 288                                                                  | 308,34                     | 388,29                    | 2,9368                              | 4,5385E+06                       | 77,596       |
| 19                     | DP 16          | 8,337E-06           | 293                                                                  | 312,51                     | 389,17                    | 1,9651                              | 6,0732E+06                       | 80,374       |
| 20                     | DP 17          | 1,1116E-05          | 293                                                                  | 312,51                     | 389,17                    | 2,3147                              | 5,3655E+06                       | 77,974       |
| 21                     | DP 18          | 1,3895E-05          | 293                                                                  | 312,51                     | 389,17                    | 2,5914                              | 4,8056E+06                       | 76,048       |
| 22                     | DP 19          | 1,6674E-05          | 293                                                                  | 312,51                     | 389,17                    | 2,8158                              | 4,3514E+06                       | 74,47        |
| 23                     | DP 20          | 8,337E-06           | 298                                                                  | 316,74                     | 390,06                    | 1,8793                              | 5,8079E+06                       | 76,978       |
| 24                     | DP 21          | 1,1116E-05,6674E-05 | 298                                                                  | 316,74                     | 390,06                    | 2,2137                              | 5,1313E+06                       | 74,665       |
| 25                     | DP 22          | 1,3895E-05          | 298                                                                  | 316,74                     | 390,06                    | 2,4783                              | 4,5958E+06                       | 72,81        |
| 26                     | DP 23          | 1,6674E-05          | 298                                                                  | 316,74                     | 390,06                    | 2,6929                              | 4,1615E+06                       | 71,29        |
| 27                     | DP 24          | 8,337E-06           | 303                                                                  | 320,82                     | 391                       | 1,7986                              | 5,5586E+06                       | 73,783       |
| 28                     | DP 25          | 1,1116E-05          | 303                                                                  | 320,82                     | 391                       | 2,1187                              | 4,9111E+06                       | 71,552       |
| 29                     | DP 26          | 1,3895E-05          | 303                                                                  | 320,82                     | 391                       | 2,372                               | 4,3986E+06                       | 69,764       |
| 30                     | DP 27          | 1,6674E-05          | 303                                                                  | 320,82                     | 391                       | 2,5774                              | 3,983E+06                        | 68,299       |

**Şekil 6.22:** TGM-199-1.6-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerlerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre tasarım noktaları.

Bu tasarım noktalarındaki değerler ile hesaplanan güç, akım ve verim gibi çıkış parametre değerleri Tablo 6.9’da verilmiştir.

**Tablo 6.9:** TGM-199-1.6-2.0 için boyutsuz elektrik direncinin 0.75, 1, 1.25, 1.5 değerlerinde farklı dış ortam sıcaklıklarına göre çıkış parametreleri.

| $T_{\infty 2}(K)$ | $R_r$ | $\dot{Q}_h(W)$ | Akım(A) | Voltaj(V) | Güç(W) | $\eta(\%)$ |
|-------------------|-------|----------------|---------|-----------|--------|------------|
| 268               | 0.75  | 96.215         | 1.03    | 2.37      | 2.43   | 2.52       |
|                   | 1     | 93.433         | 0.91    | 2.79      | 2.53   | 2.71       |
|                   | 1.25  | 91.193         | 0.81    | 3.12      | 2.53   | 2.78       |
|                   | 1.5   | 89.351         | 0.73    | 3.39      | 2.49   | 2.79       |
| 278               | 0.75  | 90.153         | 0.96    | 2.21      | 2.12   | 2.35       |
|                   | 1     | 87.512         | 0.85    | 2.61      | 2.21   | 2.52       |
|                   | 1.25  | 85.393         | 0.76    | 2.92      | 2.21   | 2.59       |
|                   | 1.5   | 83.646         | 0.69    | 3.17      | 2.18   | 2.60       |
| 283               | 0.75  | 84.052         | 0.89    | 2.06      | 1.84   | 2.19       |
|                   | 1     | 81.58          | 0.79    | 2.43      | 1.92   | 2.35       |
|                   | 1.25  | 79.594         | 0.71    | 2.72      | 1.92   | 2.42       |
|                   | 1.5   | 77.965         | 0.64    | 2.96      | 1.89   | 2.43       |
| 288               | 0.75  | 83.709         | 0.89    | 2.05      | 1.82   | 2.17       |
|                   | 1     | 81.226         | 0.78    | 2.41      | 1.89   | 2.33       |
|                   | 1.25  | 79.232         | 0.70    | 2.70      | 1.90   | 2.39       |
|                   | 1.5   | 77.596         | 0.64    | 2.94      | 1.87   | 2.40       |
| 293               | 0.75  | 80.374         | 0.85    | 1.97      | 1.67   | 2.08       |
|                   | 1     | 77.974         | 0.75    | 2.31      | 1.74   | 2.23       |
|                   | 1.25  | 76.048         | 0.67    | 2.59      | 1.74   | 2.29       |
|                   | 1.5   | 74.47          | 0.61    | 2.82      | 1.72   | 2.30       |
| 298               | 0.75  | 76.978         | 0.81    | 1.88      | 1.53   | 1.99       |
|                   | 1     | 74.665         | 0.72    | 2.21      | 1.59   | 2.13       |
|                   | 1.25  | 72.81          | 0.64    | 2.48      | 1.59   | 2.19       |
|                   | 1.5   | 71.29          | 0.58    | 2.69      | 1.57   | 2.20       |
| 303               | 0.75  | 73.783         | 0.78    | 1.80      | 1.40   | 1.90       |
|                   | 1     | 71.552         | 0.69    | 2.12      | 1.46   | 2.04       |
|                   | 1.25  | 69.764         | 0.62    | 2.37      | 1.46   | 2.09       |
|                   | 1.5   | 68.299         | 0.56    | 2.58      | 1.44   | 2.10       |

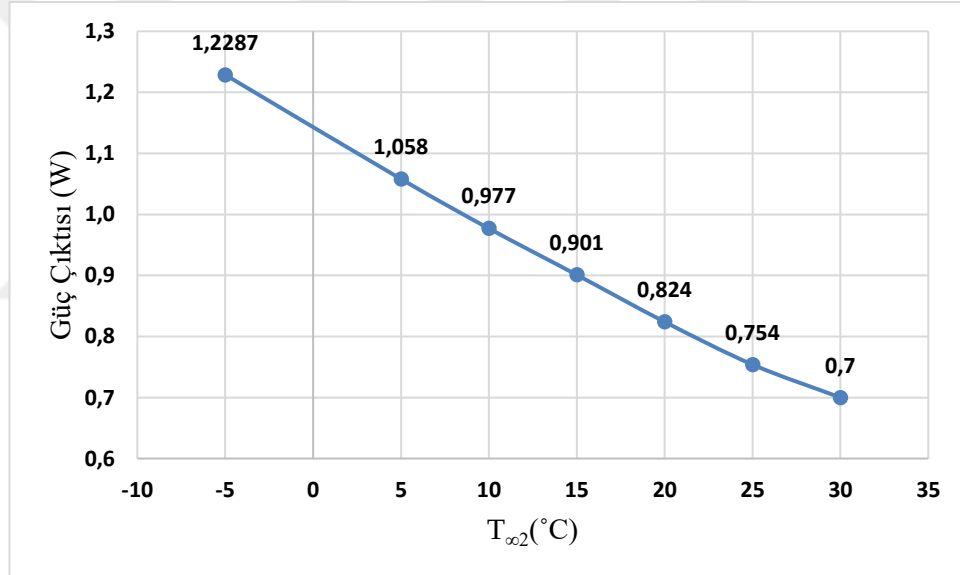
Diğer söz konusu TEJ modülleri için gözlenen durumlar, TGM-199-1.6-2.0 modülü için de gözlenmiştir (Tablo 6.9). Yani, dış ortam sıcaklığı arttıkça; güç ve verim değerleri ile aynı boyutsuz elektrik direncine sahip durumlarındaki akım ve gerilim değerleri azalmıştır.

## 7. BULGULAR

### 7.1 Ticari Termoelektrik Jeneratör Modülü TGM-199-1.4-2.0'nin Performans Eğrileri

Bu bölümde, TGM-199-1.4-2.0 modülü için nümerik olarak elde edilen parametrelerin farklı koşullardaki değişimleri incelenmiştir.

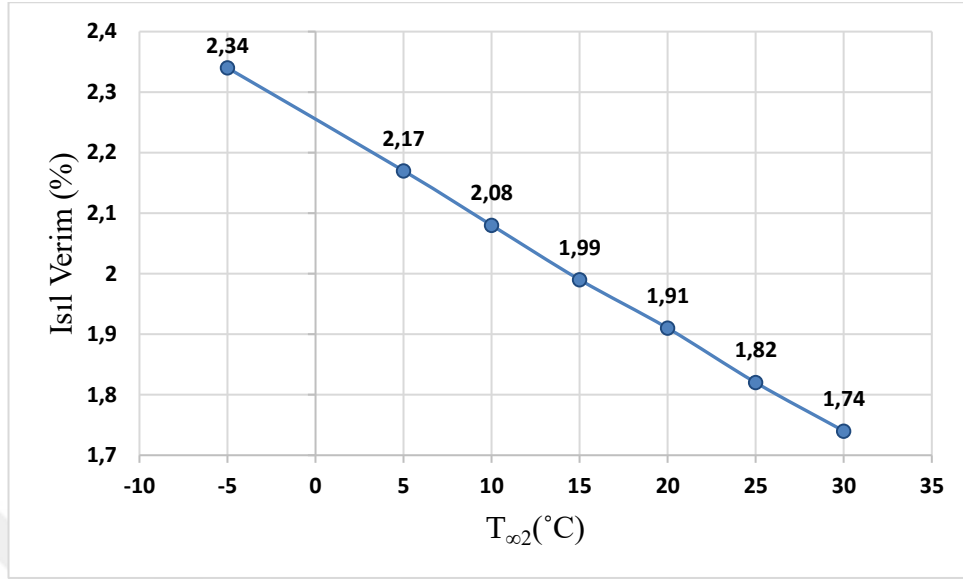
TGM-199-1.4-2.0 TEJ modülünün, nümerik olarak elde edilen elektriksel güç çıktıların farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 7.1:** Farklı dış ortam sıcaklıklara göre TGM-199-1.4-2.0'nin nümerik olarak elde edilen güç çıktıları.

Şekil 7.1'de de görüldüğü gibi, dış ortam sıcaklığı ile elde edilen güç çıktıları lineer olarak değişmektedir. Bu değişim; artan dış ortam sıcaklıkları ile elde edilen güç girdilerinin azaldığı yönde gözlenmektedir. Bu ise, TGM-199-1.4-2.0 modülü ile oluşturulan TEJ sisteminin, kış aylarında daha fazla elektriksel güç çıktısı sağlayacağı anlamına gelmektedir. Başka bir ifadeyle,  $-5^{\circ}\text{C}$  dış ortam sıcaklığında elde edilebilecek en yüksek güç çıktısı (1.2287 W) sağlanırken,  $30^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ise en düşük değer (0.7 W) elde edilmiştir (Şekil 7.1).

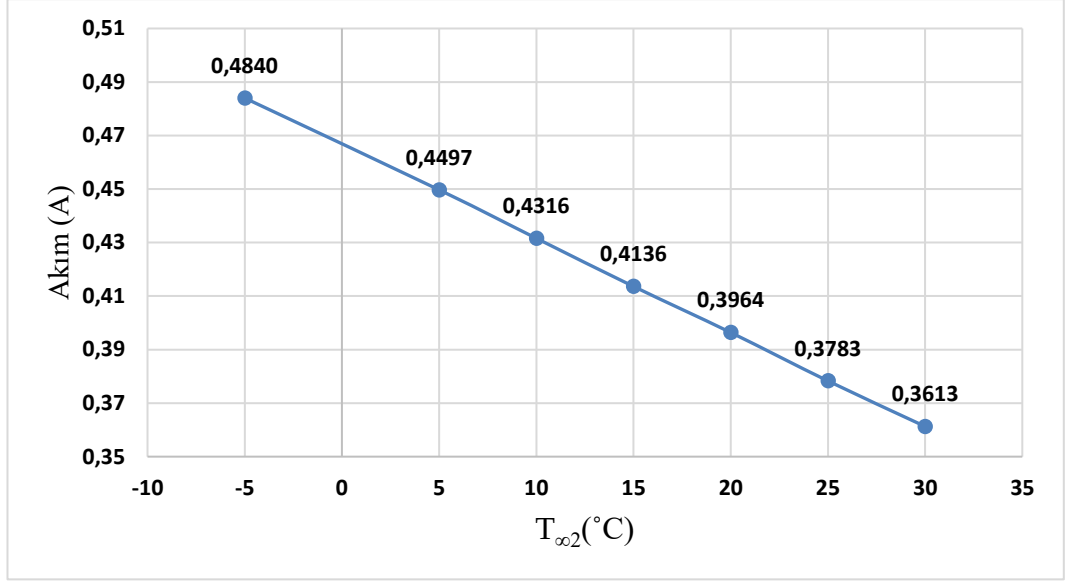
Şekil 7.2’de, TGM-199-1.4-2.0 modülünün elde edilen ısı verim değerlerinin dış ortam sıcaklıkları ile değişimi gösterilmiştir.



**Şekil 7.2:** Farklı dış ortam sıcaklıkları ile TGM-199-1.4-2.0 modülünün ısı verimlerinin değişimi.

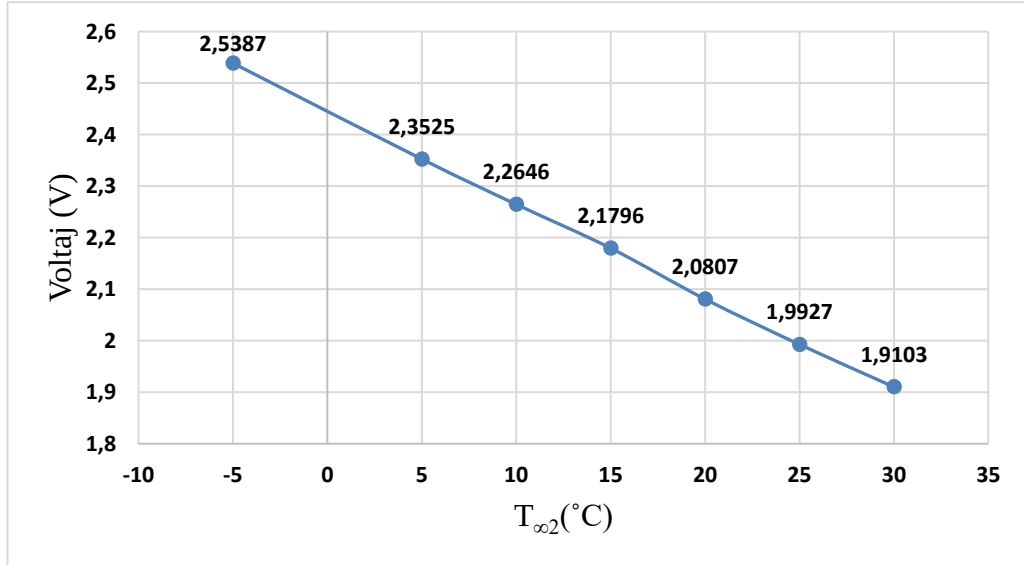
Şekil 7.2’de görüldüğü gibi, artan dış ortam sıcaklıkları ile ısı verim değerleri azalmaktadır. Bu durum, ısı makinelerinin davranışlarına bakıldığında beklenen bir sonuçtur. Ayrıca, Carnot Isı makinelerinin ısı verim ifadelerinde de bu davranış açık bir şekilde görülmektedir. Yani, ısı makinelerinde, ısı atılan ortam sıcaklığı azaldıkça ısı verim artmaktadır. Bu durum, Şekil 7.2’de de; -5 °C dış ortam sıcaklığında en yüksek ısı verim, 30 °C’de ise en düşük ısı verim elde edilmesi şeklinde gözlenmiştir.

Nümerik olarak elde edilen akım değerlerinin, farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimleri de Şekil 7.3’de gösterilmiştir.



**Şekil 7.3:** TGM-199-1.4-2.0'nin akım değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi.

Şekil 7.3'de de görüldüğü gibi, TGM-199-1.4-2.0 modülünün nümerik olarak elde edilen akım değerleri de dış ortam sıcaklıkları ile lineer olarak değişmektedir. Bu değişim, artan dış ortam sıcaklıklarına göre akımın azalması yönünde olmaktadır. Başka bir ifadeyle, Dış ortam sıcaklığının  $-5^{\circ}\text{C}$ 'de, 0.4840 A ile en yüksek akım değerine ulaşılırken,  $30^{\circ}\text{C}$ 'de ise 0.3613 A değeri ile en düşük akım elde edilmiştir (Şekil 7.3). Şekil 7.4'de, nümerik olarak elde edilen voltaj (gerilim) değerlerinin dış ortam sıcaklıkları ile değişimi gösterilmiştir.

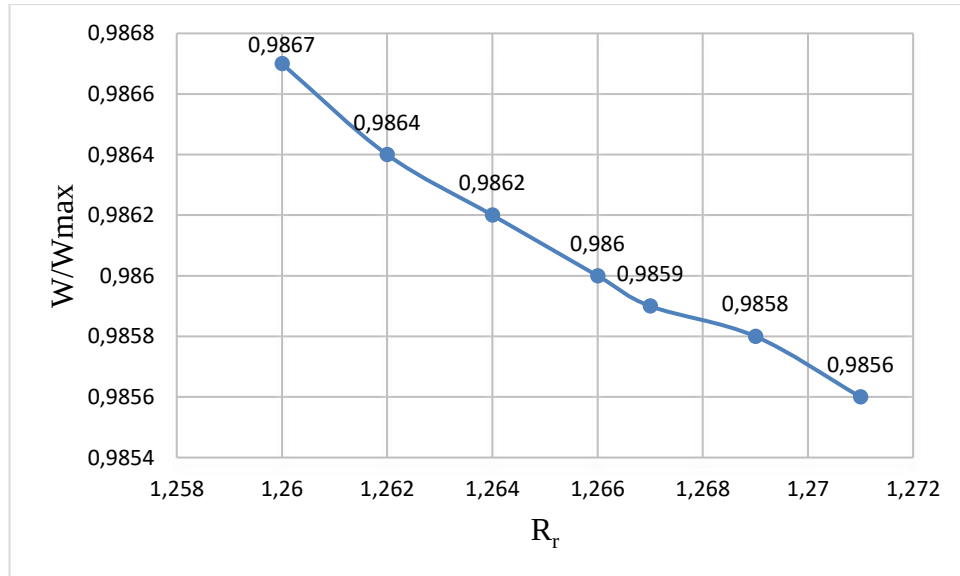


**Şekil 7.4:** Farklı dış ortam sıcaklıklara göre TGM-199-1.4-2.0'nin voltaj değerlerinin değişimi.

TGM-199-1.4-2.0'nin gerilim (voltaj) değerleri, dış ortam sıcaklığı ile lineer değişim göstermekte ve sıcaklık arttıkça gerilim değerleri de azalan şekilde davranmaktadır. Bu durum, termoelektrik jeneratörler için beklenen bir davranıştır. Jeneratörden elde edilen elektriksel güç değerlerinin artması demek, bu şartlardaki gerilimin yani elektromotor kuvvetlerin artması demektir. Bu nedenle seçilen en düşük sıcaklıkta (- 5 °C) 2.5387 V olarak en yüksek voltaj elde edilirken, seçilen en yüksek sıcaklıkta (30 °C) ise 1.9103 V ile en düşük voltaj elde edilmiştir.

## 7.2 Ticari Termoelektrik Jeneratör Modülü TGM-199-1.4-2.0'nin Normalleştirilmiş Parametre Eğrileri

Normalize edilmiş güç çıktısı, boyutsuz elektrik direncinin bir fonksiyonudur ve boyutsuz elektrik direnci ile ters orantılı olduğu için boyutsuz elektrik direnci arttıkça, normalize edilmiş güç çıktısı azalır (Lee 2017). TGM-199-1.4-2.0 modülü için boyutsuz elektrik direnci ( $R_r$ ) ile normalize edilmiş güç çıktısının değişimi Şekil 7.5'de görülmektedir. Tablo 4.2'de farklı dış ortam sıcaklıklarına göre oluşan boyutsuz elektrik direnç değerleri baz alınarak Şekil 7.5, Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8 oluşturulmuştur. Yani Matlab programıyla elde edilen farklı dış ortam sıcaklıklarına göre optimum durumlar için normalleştirilmiş parametre eğrileridir.

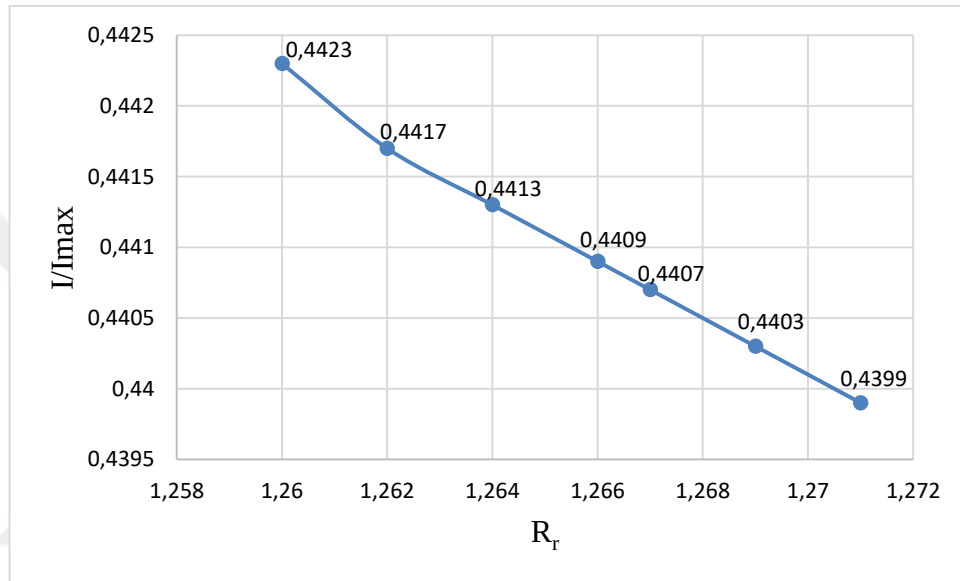


**Şekil 7.5:** TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncine göre normalize edilmiş güç çıkışının değişimi.

Şekil 7.5'de görüldüğü gibi, boyutsuz elektrik direnci arttıkça normalize edilmiş güç çıkışı azalmaktadır. Bu durum ise, boyutsuz elektrik direnci arttıkça, elde

edilen güç çıktıların azaldığını göstermektedir. Ancak normalize edilmiş güç çıktısındaki bu azalış,  $R_r$ 'nin yaklaşık olarak 1.266 değerine kadar hızlı bir şekilde gerçekleşirken, bu değerden sonra daha yavaş bir azalış gözlenmektedir (Şekil 7.5).

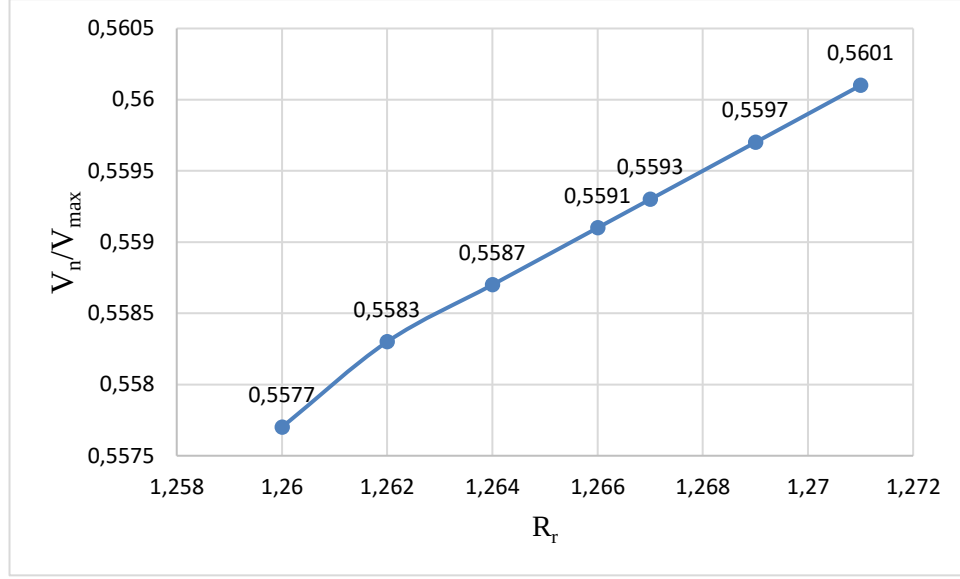
Normalize edilmiş akım, boyutsuz elektrik direncinin bir fonksiyonudur ve boyutsuz elektrik direnci ile ters orantılı olduğu için boyutsuz elektrik direnci arttıkça normalize edilmiş akım azalmaktadır (Lee 2017). TGM-199-1.4-2.0 modülü için boyutsuz elektrik direnci ( $R_r$ ) ile normalize edilmiş akımın değişimi Şekil 7.6'da görülmektedir.



**Şekil 7.6:** TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncine göre normalize edilmiş akımın değişimi.

Boyutsuz elektrik direnci arttıkça normalize edilmiş akımın azaldığı Şekil 7.6'da görülmektedir. Bu durum, boyutsuz elektrik direnci arttıkça akımın da azaldığını göstermektedir. Yani, boyutsuz elektrik direnci ile akımında ters orantılı olarak değiştiğini söyleyebiliriz.

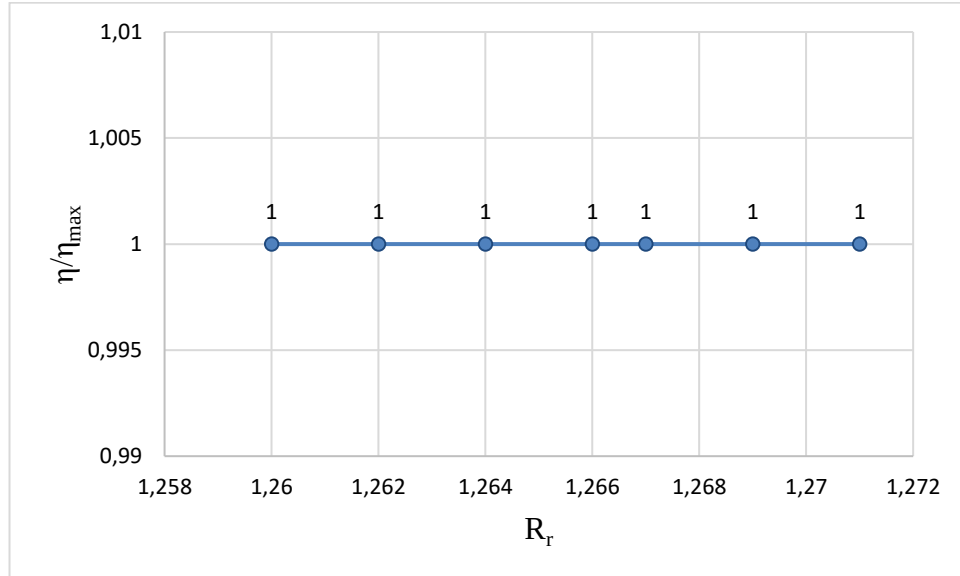
Normalize edilmiş voltaj, boyutsuz elektrik direncinin bir fonksiyonudur ve boyutsuz elektrik direnci ile doğru orantılı olduğu için boyutsuz elektrik direnci arttıkça normalize edilmiş akım artmaktadır (Lee 2017). TGM-199-1.4-2.0 modülü için boyutsuz elektrik direnci ( $R_r$ ) ile normalize edilmiş voltajın değişimi Şekil 7.7'de gösterilmektedir.



**Şekil 7.7:** TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncine göre normalize edilmiş voltajın değişimi.

Şekil 7.7’de de görüldüğü gibi, boyutsuz elektrik direncinin artması ile normalize edilmiş voltaj değeri de artmaktadır. Bu artış ise lineer bir şekilde gerçekleşmektedir. Ancak  $R_r$ ’nin 1.26 ve 1.262 değerleri arasındaki artış eğimi ile diğer  $R_r$  değerlerindeki artış eğimi farklılık göstermektedir.

TGM-199-1.4-2.0 modülü için boyutsuz elektrik direnci ( $R_r$ ) ile normalize edilmiş ısı veriminin değişimi Şekil 7.8’de gösterilmektedir.



**Şekil 7.8:** TGM-199-1.4-2.0 için boyutsuz elektrik direncine göre normalize edilmiş ısı veriminin değişimi.

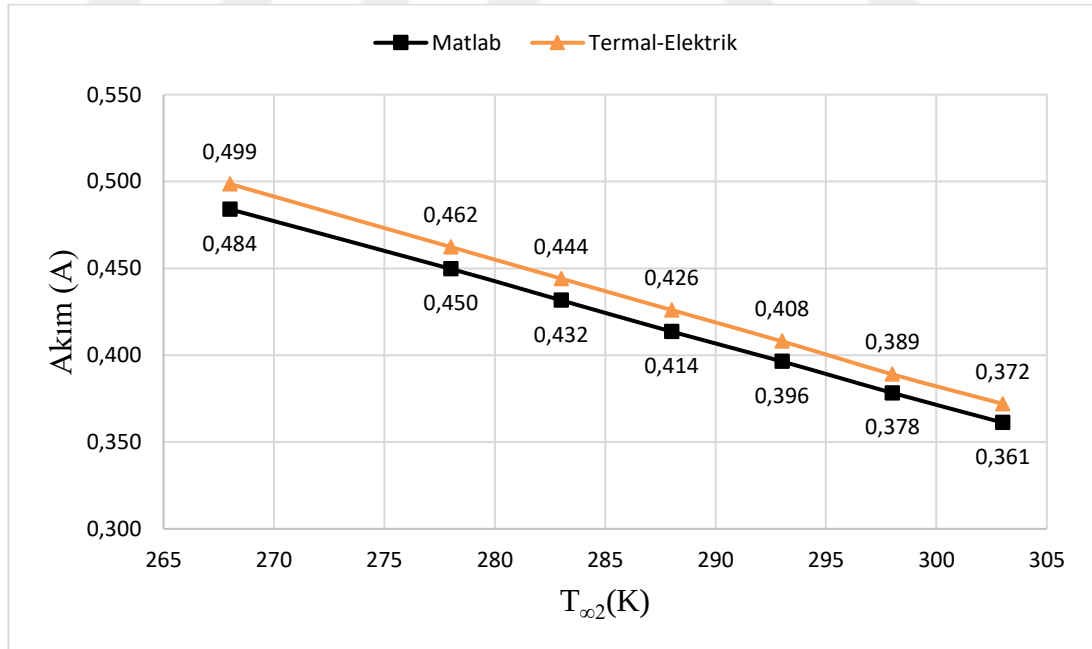
Tablo 4.2’de gösterilen boyutsuz elektrik direnci ve Tablo 4.3’de gösterilen TGM-199-1.4-2.0 modülünün sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları birlikte incelendiğinde; boyutsuz elektrik direnci artarken, sıcak ve soğuk yüzey

sıcaklıklarının ise çok yavaş şekilde arttığı gözlenmektedir. Bu elde edilen sonuca göre; normalize edilmiş ısı verim de, boyutsuz elektrik direncinin ve modülün sıcak ve soğuk yüzeyindeki sıcaklıkların bir fonksiyonu olduğundan, normalize edilmiş ısı verimin boyutsuz elektrik direnci ile değişiminin yaklaşık olarak sabit kalması beklenen bir durumdur. Bu durum, Şekil 7.8’de gösterilmektedir.

### 7.3 TGM-199-1.4-2.0 Ticari TEJ Modülünün En Uygun Tasarım ve Termal-Elektrik Simülasyon Değerleri

Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0, Tablo 6.4’de gösterilen farklı dış ortam sıcaklıklarına göre; Matlab programı kullanılarak elde edilen en uygun tasarım (optimum) ile en uygun tasarımın sınır şartları kullanılarak yapılan Termal-Elektrik simülasyonu arasındaki durum bu bölümde incelenmiştir. Akım, gerilim, güç ve ısı verim değerleri bu iki durum için karşılaştırılmıştır.

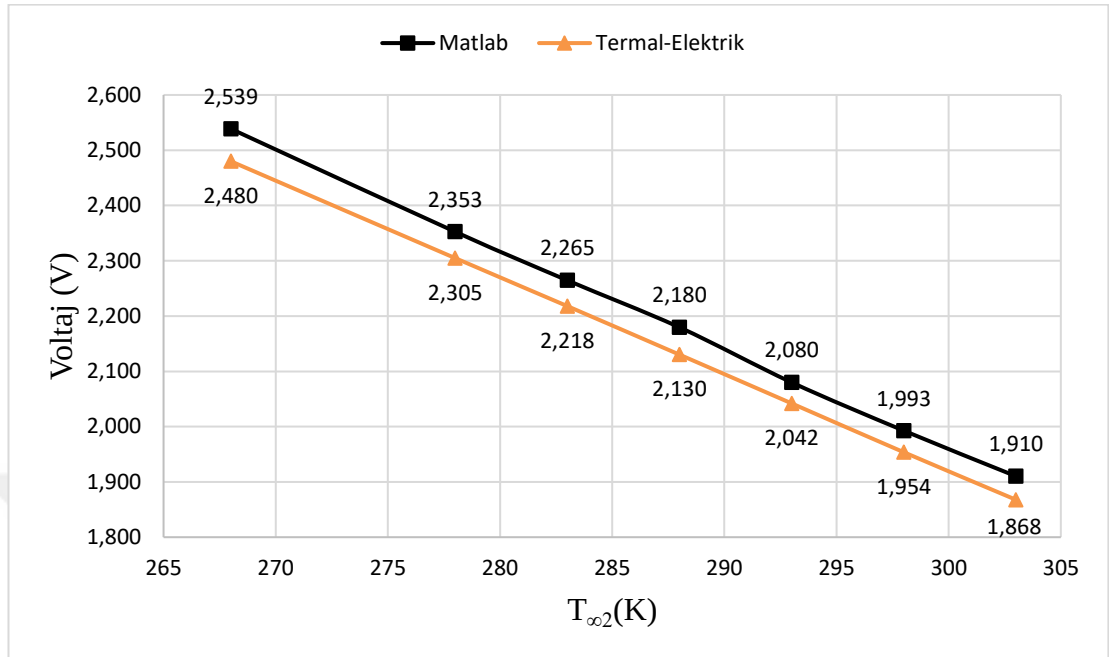
TGM-199-1.4-2.0 için farklı dış ortam sıcaklıkları ile akımın değişimi, optimum ve Termal-Elektrik duruma göre, Şekil 7.9’da gösterilmiştir.



**Şekil 7.9:** Matlab ve Termal-Elektrik simülasyon ile elde edilen akım değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi (TGM-199-1.4-2.0 için).

Şekil 7.9’da da görüldüğü gibi, her iki durum için de elde edilen akım değerleri birbirine çok yakın olmaktadır. Bu durum, Tablo 6.5’de de verilmiştir.

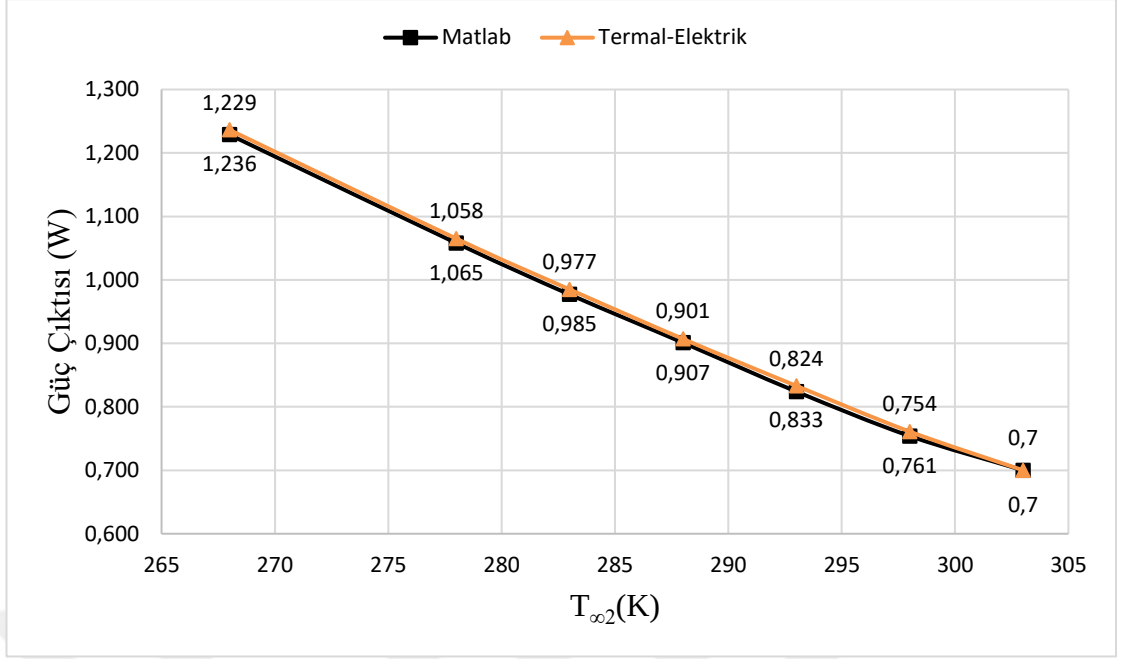
TGM-199-1.4-2.0 için farklı dış ortam sıcaklıkları ile voltajın (gerilim) değişimi, optimum ve Termal-Elektrik duruma göre, Şekil 7.10’da gösterilmiştir.



**Şekil 7.10:** Matlab ve Termal-Elektrik simülasyon ile elde edilen voltaj değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi (TGM-199-1.4-2.0 için).

Şekil 7.10’da da görüldüğü gibi, her iki durum için de elde edilen voltaj değerleri birbirine çok yakın olmaktadır. Bu durum, Tablo 6.5’de de verilmiştir.

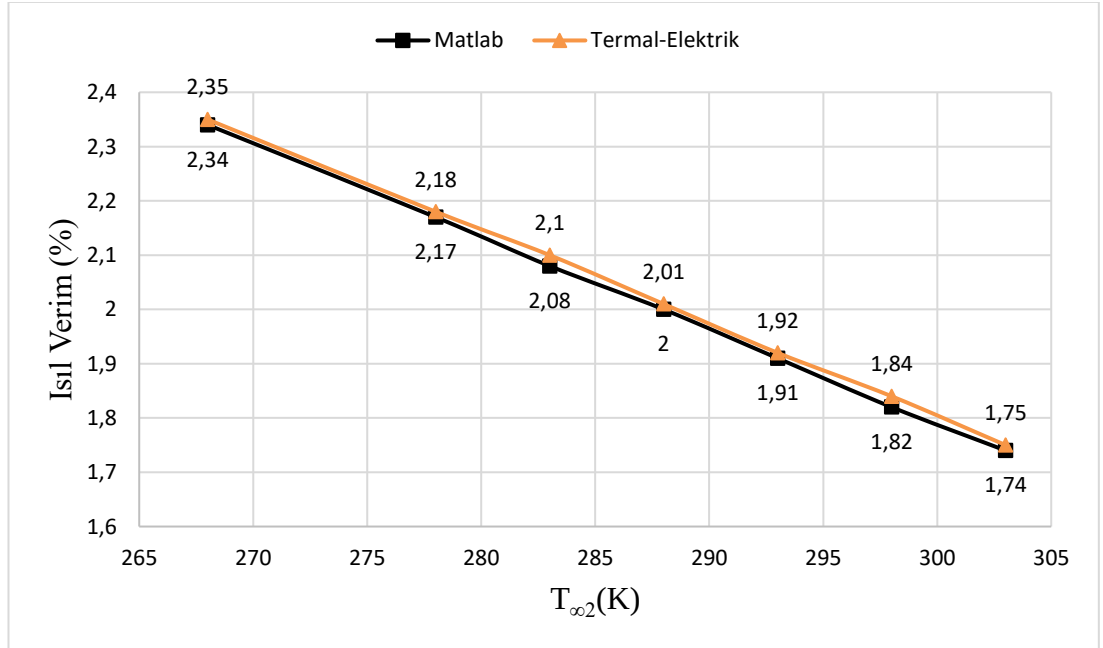
TGM-199-1.4-2.0 için farklı dış ortam sıcaklıkları ile elektriksel güç çıktısının değişimi, optimum ve Termal-Elektrik duruma göre, Şekil 7.11’de gösterilmiştir.



**Şekil 7.11:** Matlab ve Termal-Elektrik simülasyon ile elde edilen güç çıkışı değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi (TGM-199-1.4-2.0 için).

Şekil 7.11’de de görüldüğü gibi, her iki durum için de elde edilen elektriksel güç çıktıları, hemen hemen aynı değerleri göstermektedir. Bu durum, Tablo 6.5’de de verilmiştir.

TGM-199-1.4-2.0 için farklı dış ortam sıcaklıkları ile ısı veriminin değişimi, optimum ve Termal-Elektrik duruma göre, Şekil 7.12’de gösterilmiştir.



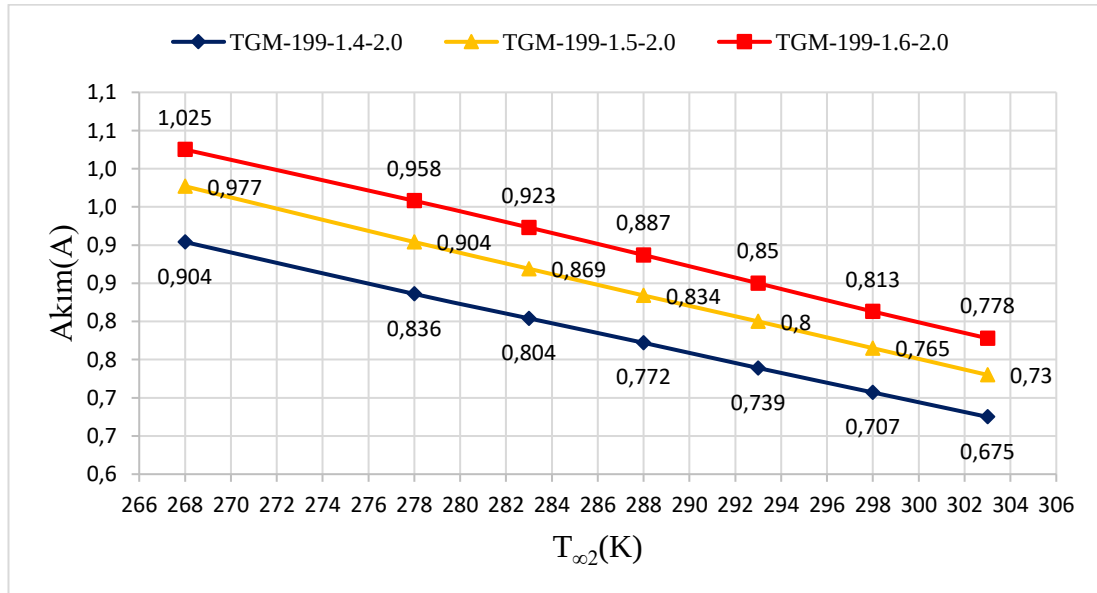
**Şekil 7.12:** Matlab ve Termal-Elektrik simülasyon ile elde edilen ısı verim değerlerinin farklı dış ortam sıcaklıkları ile değişimi (TGM-199-1.4-2.0 için).

Şekil 7.12’de de görüldüğü gibi, her iki durum için de elde edilen ısı verimleri, hemen hemen aynı değerleri göstermektedir. Bu durum, Tablo 6.5’de de verilmiştir.

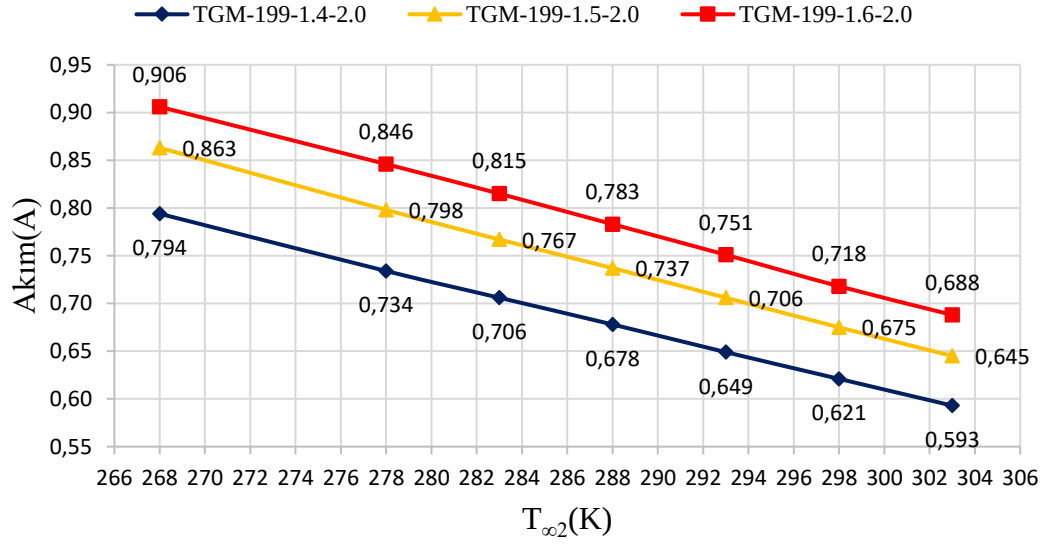
#### 7.4 Ansys Fluent Çıktı Parametrelerine Göre Termoelektrik Jeneratör Modüllerinin Termal-Elektrik Simülasyon Sonuçları

Tablo 6.7, 6.8 ve 6.9’da (Bölüm 6), TGM-199-1.4-2.0, TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0 TEJ modüllerinin, 7 farklı dış ortam sıcaklığına ve 4 farklı boyutsuz elektrik direncine göre akım, gerilim, güç ve ısı verimlerinin Termal-Elektrik simülasyon değerleri verilmiştir. Bölüm 7’de ise bu modüller; farklı dış ortam sıcaklıklar ve farklı boyutsuz elektrik dirençler için, Termal-Elektrik simülasyon sonucu elde edilen akım ve elektriksel güç çıktı değerleri açısından birbirleri ile karşılaştırılmaktadırlar.

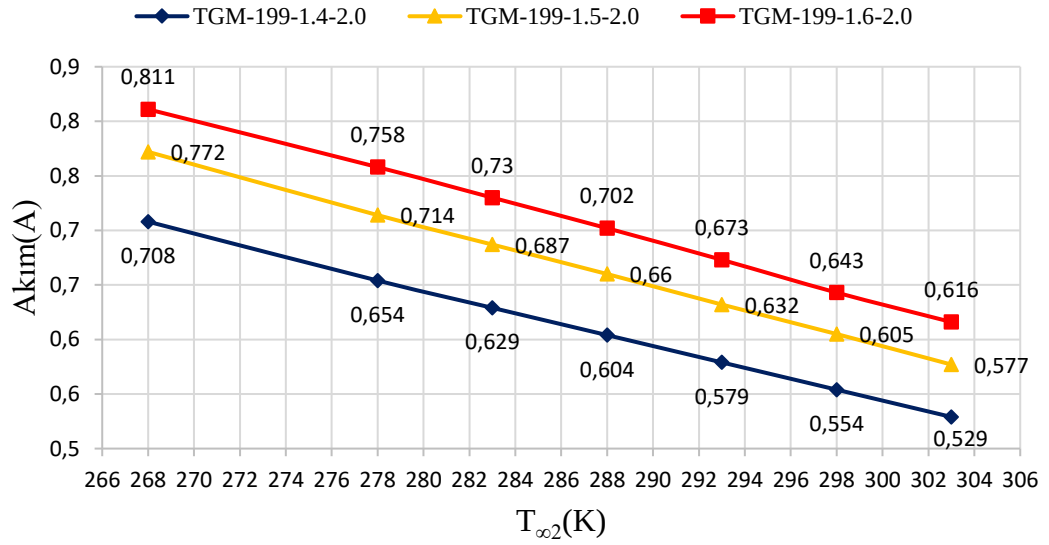
Şekil 7.13’de, TGM-199-1.4-2.0, TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0 modülleri; farklı dış ortam sıcaklıklar ve farklı boyutsuz elektrik dirençler için, Termal-Elektrik simülasyon sonucu elde edilen akım değerleri açısından birbirleri ile karşılaştırılmaktadırlar.



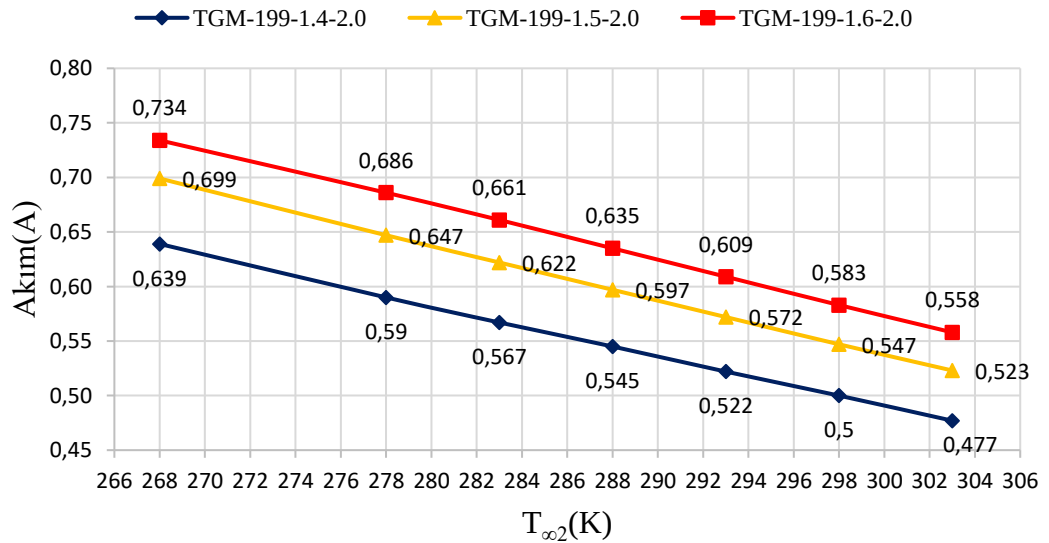
(a)  $R_r = 0.75$  için



(b)  $R_r = 1$  için



(c)  $R_r = 1.25$  için

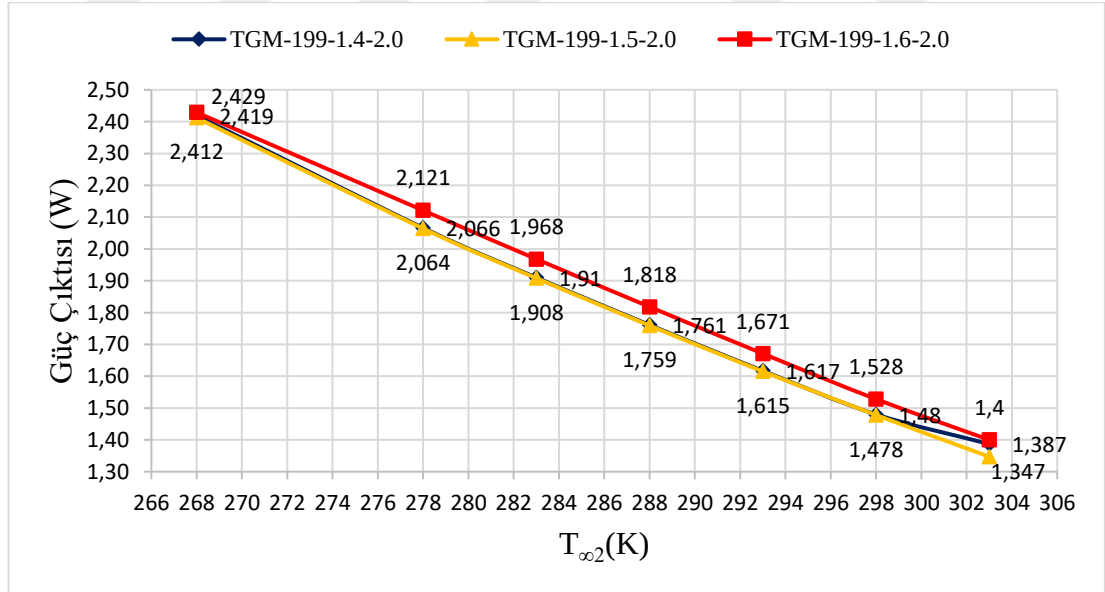


(d)  $R_r = 1.5$  için

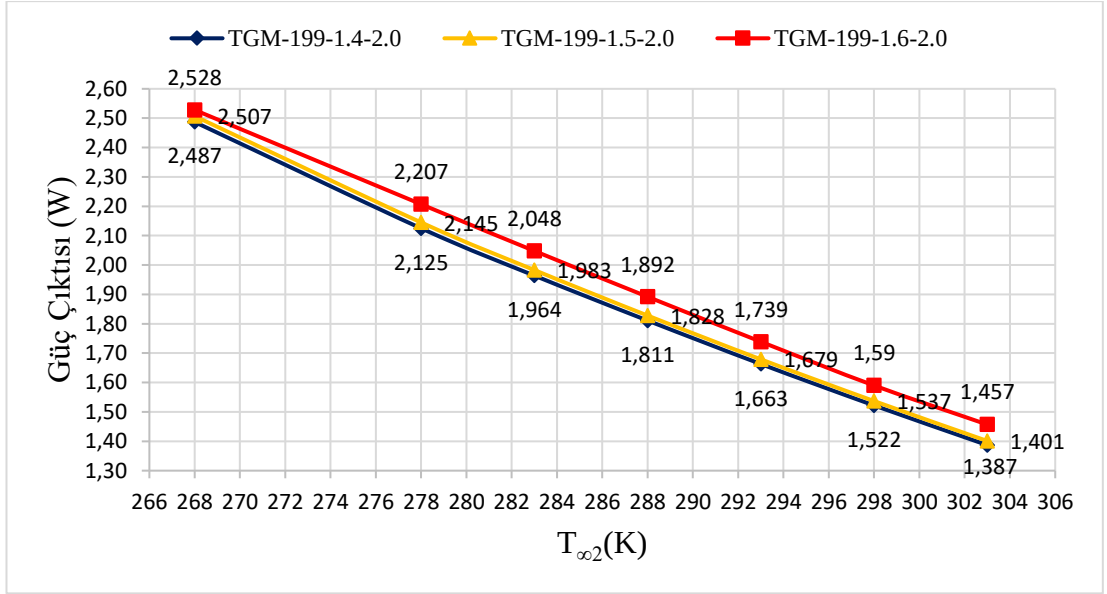
**Şekil 7.13:** Farklı dış ortam sıcaklıkları ve farklı boyutsuz elektrik dirençleri için, üç farklı boyuttaki modülün, akım yönünden karşılaştırılmaları.

Şekil 7.13’de görüldüğü gibi, dış ortam sıcaklığı ile akımın değişimi ters orantılıdır ve aralarında lineer bir değişim söz konusudur. Şekil 7.13 (a), (b), (c) ve (d)’lerin hepsinde de; en yüksek akım değeri, TGM-199-1.6-2.0 modülü için elde edilmiştir. Bu modülün, p-n ısı çiftleri diğerlerine göre en büyük genişliğe sahiptirler. Bu durumun akım üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü genişlik arttıkça kesit alan artacak ve bu da elektriksel direncin azalmasına neden olacaktır. Bu durumda da, akım artışı sağlanmış olacaktır. Ancak, boyutsuz elektrik direnci açısından bakıldığında; bu boyutsuz elektrik direnci arttıkça akımın azaldığı görülmektedir. Yani, akım, boyutsuz elektrik direnci ile de ters orantılıdır (Şekil 7.13a, b, c ve d).

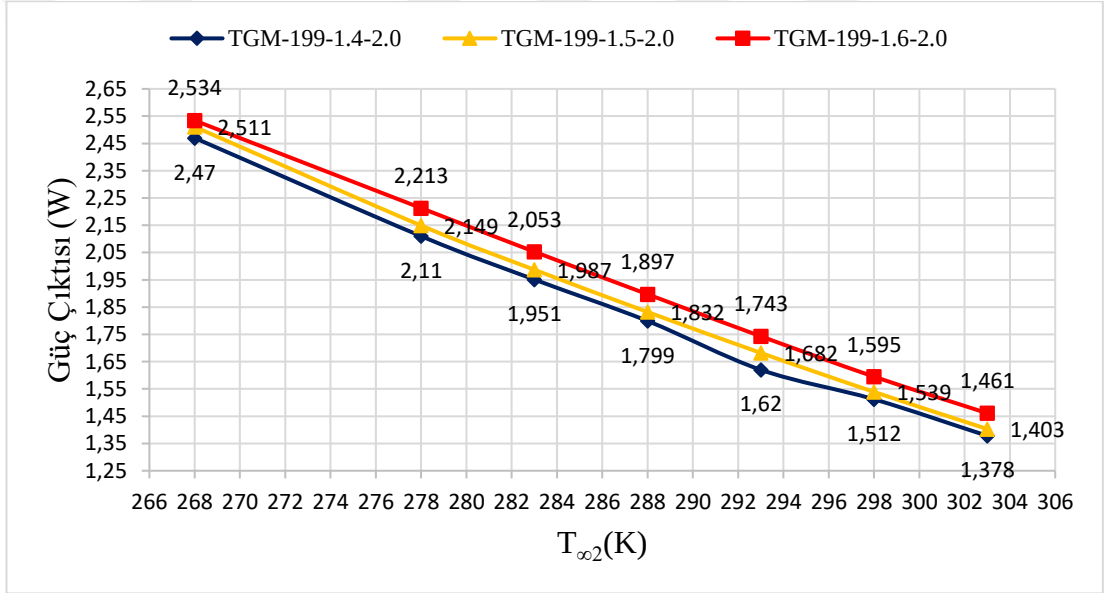
Şekil 7.14’de, TGM-199-1.4-2.0, TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0 modülleri; farklı dış ortam sıcaklıkları ve farklı boyutsuz elektrik dirençleri için, Termal-Elektrik simülasyon sonucu elde edilen elektriksel güç çıktı değerleri açısından birbirleri ile karşılaştırılmaktadırlar.



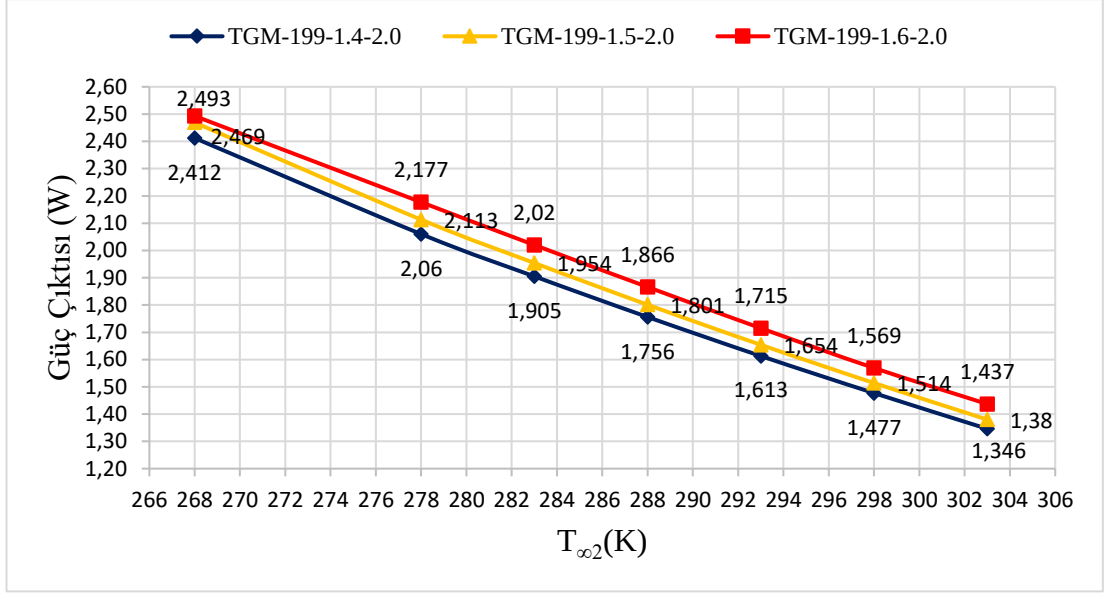
(a)  $R_r = 0.75$  için



(b)  $R_r = 1$  için



(c)  $R_r = 1.25$  için



(d)  $R_r = 1.5$  için

**Şekil 7.14:** Farklı dış ortam sıcaklıklar ve farklı boyutsuz elektrik dirençler için, üç farklı boyuttaki modülün, elektriksel güç çıkışı yönünden karşılaştırmaları.

Şekil 7.14’de görüldüğü gibi, TGM-199-1.4-2.0, TGM-199-1.5-2.0 ve TGM-199-1.6-2.0 modüllerinin hepsinde de; dış ortam sıcaklığı ile elde edilen güç çıktıları lineer olarak değişmektedir. Bu değişim; artan dış ortam sıcaklıkları ile elde edilen güç girdilerinin azaldığı yönde gözlenmektedir. Bu ise, bu her üç modül ile oluşturulan TEJ sisteminin, kış aylarında daha fazla elektriksel güç çıkışı sağlayacağı anlamına gelmektedir. Ayrıca, Şekil 7.14 (a), (b), (c) ve (d)’lerin hepsinde de; en yüksek elektriksel güç çıkışı değeri, TGM-199-1.6-2.0 modülü için elde edilmiştir. Söz konusu durumun, bu modülün p-n ısı çiftlerinin genişliğinin diğerlerine göre en yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü genişliğin artması ile bu ısı çiftlerinden geçen ısı miktarı artmaktadır. Bu durumda, TGM-199-1.6-2.0 modülü için (diğer modüllerin ortamları ile aynı sıcaklık koşullarındaki, sıcak ve soğuk ortam için), diğerlerine göre, sıcak ortamdan daha fazla ısı çekilmektedir ( $\dot{Q}_h$ ). Bu durumda da, bu modülden daha yüksek elektriksel güç çıktı değerleri elde edilmektedir. Bununla birlikte, boyutsuz elektrik direncinin 0.75 olduğu durumda, 268 K dış ortam sıcaklığı için, her üç modülün güç değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir (Şekil 7.14a). 268 K’de, boyutsuz elektrik direnci artışı ile ise TGM-199-1.6-2.0 modülünün güç değerinin diğerlerinden daha yüksek olduğu daha açık şekilde görülmektedir (Şekil 7.14b, c, d). Ayrıca, boyutsuz elektrik direncinin 0.75 ve 1 değerlerinde; tüm dış ortam

sıcaklıklarında, TGM-199-1.4-2.0 ve TGM-199-1.5-2.0 modüllerinin güç değerleri hemen hemen birbirine eşit olmaktadır (Şekil 7.14a ve b). Boyutsuz elektrik direncinin 1.25 ve 1.5 değerlerinde ise TGM-199-1.5-2.0 modülünün güç değeri, Ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'den daha yüksek olmaktadır (Şekil 7.14c ve d). Bu durumun da yine p-n ısı çiftlerinin sahip olduğu genişlik değerlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



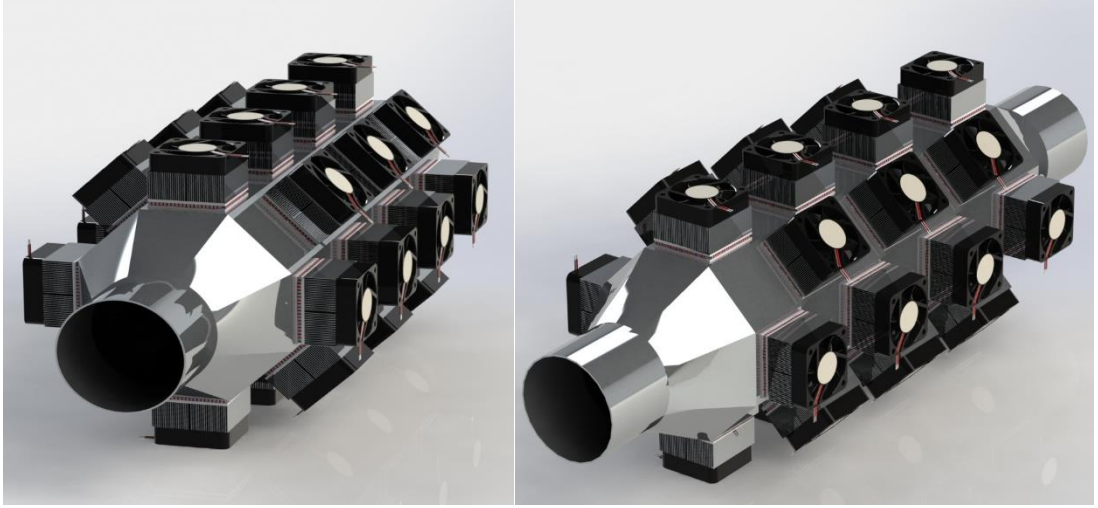
## 8. SONUÇ

Oluşturulan sistemle, ticari TEJ modülü ile farklı boyutlardaki TEJ modüllerinin karşılaştırılması sonucunda en iyi güç değeri, farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'nın optimum aralıkta seçilen, boyutsuz elektrik direnci 1.25 olduğu durumda gerçekleşmiştir. En yüksek güç değeri, dış ortam sıcaklığının 268 K olduğu durumda 2.534 W olarak ortaya çıkmıştır. Farklı dış ortam sıcaklığı koşullarında, dış ortam sıcaklığı arttıkça akım, voltaj, güç ve ısı verim değerlerinin düştüğü görülmüştür. Maksimum güç değerinin boyutsuz elektrik direnci 1 olduğu zaman ortaya çıktığı bilinmektedir. Fakat kanatlı yapıdaki TEJ modülleri ile tasarlanan bir sistemde, maksimum güç için boyutsuz elektrik direnç değeri değişebilmektedir. Belirtildiği üzere en büyük güç değeri boyutsuz elektrik direncinin 1.25 olduğu durumda gerçekleşmiştir.

Isıl verim değerlerine bakıldığı zaman en yüksek ısı verim değerleri ticari TEJ modülü TGM-199-1.4-2.0'da boyutsuz elektrik direnci 1.25 iken gerçekleşmiştir. Bu durumda en yüksek ısı verim değeri dış ortam sıcaklığı 268 K iken %3.322 olarak gerçekleşmiştir.

Sistemde kullanılan TEJ modül sayıları düşünüldüğünde, üretilen güç değeri bizim için daha ön plandadır. Bu nedenle farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0 seçilmesi daha uygun olmalıdır. Sistemde yerleştirilen modüllerden üretilen güç değeri; traktörün güç gerektiren çeşitli aksesuarlarında ya da traktörün, herhangi bir soğutma durumu için kullanılacak, Termoelektrik soğutucunun kullanacağı elektriksel güç için kullanılabilir. Sistemde 4 adet TEJ modülü düşünüldüğünde  $4 * 2.534 = 10.136$  W gibi bir güç elde edilmektedir.

Şekil 8.1'de gösterilen sistemde oluşacak güç değerleri ise  $28 * 2.534 = 70.952$  W ve elde edilecek akım değeri ise  $28 * 0.811 = 22.71$  A olmuştur. Tabi bu çıktı değerleri dış ortam sıcaklığı 268 K olduğu zaman geçerlidir. Dış ortam sıcaklığı 303 K ve boyutsuz elektriksel direnci 1.25 olduğu zaman, farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0 için Şekil 8.1'de gösterilen sistemde güç ve akım değeri sırasıyla, 40.9 W ve 17.25 A olarak elde edilmiştir.



**Şekil 8.1:** 28 adet farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'den oluşan TEJ sistemi.

Eğer akım değeri çıktı değeri olarak isteniyorsa, en büyük akım değeri elektrik direnci 0.75 ve dış ortam sıcaklığı 268 K olduğu durumda, farklı boyuttaki TEJ modülü TGM-199-1.6-2.0'da gerçekleşmektedir. Şekil 8.1'de gösterilen sistemde, bu durum koşulları altında oluşan akım ve güç değeri sırasıyla, 28.7 A ve 67.536 W olmaktadır. Aynı durum 303 K sıcaklığında gerçekleştiğinde ise akım ve güç değerleri sırasıyla, 21.781 A ve 37.72 W olmaktadır.

## 9. KAYNAKLAR

Accuratus Ceramic Cor., <https://www accuratus.com/alumox.html> (03.02.2019).

ANSYS Fluent Theory Guide, (2017).

ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, (2017).

Chi, R., Park, J., Thi, S. and Lee, K., “Study on heat pipe assisted thermoelectric power generation system from exhaust gas”, Heat Mass Transfer, 53, 3295–3304, (2017).

Chen, J., Li, K., Liu, C., Li, M., Lv, Y., Jia, L. and Jiang S., “Enhanced Efficiency of Thermoelectric Generator by Optimizing Mechanical and Electrical Structures”, Energies, 10, 1329, (2017). DOI:10.3390/en10091329.

Çam, S., “Tek Emişli İki Çıkışlı Santrifüj Pompanın Tasarımı, HAD Yöntemi ile Optimizasyonu Ve Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 36-37, (2019).

Çengel, Y.A ve Ghajar A.J., “Isı ve Kütle Transferi”, ISBN-13: 978-6053552871, Ankara: Palme Yayıncılık, 421-430;884, (2015).

Çengel, Y.A ve Boles, M.A., “Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla”, ISBN-13: 978-6053551621 ,Ankara: Palme Yayıncılık, 137-141;926, (2015).

Çengel, Y.A ve Cimbala, J.M., “Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları”, ISBN-13: 978-6053552741 ,Ankara: Palme Yayıncılık, 367-374, (2015).

Dikmen, E., “Fixing of Factors What Affects Thermoelectric Coolers’ working criteria and fields of use in industry”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1-19, (2002).

Gülyaşar, F., Erdaş İ. Ö. ve Özkaya K. A., “TÜMOSAN dizel motorunun turbo şarj uygulanması ile modernizasyonu”, Lisans Tezi, İ.T.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, (2008).

He, W., Wang, S. and Yang, Y., “Peak power evaluation and optimal dimension design of exhaust heat exchanger for different gas parameters in automobile Thermoelectric generator”, Energy Conversion and Management, 151, 661-669, (2017).

He, W., Wang, S., Li, Y. and Zhao, Y., “Structural size optimization on an exhaust exchanger based on thenfluid heat transfer and flow resistance characteristics applied

to an automotive thermoelectric generator”, *Energy Conversion and Management* 129, 240–249, (2016).

Hervas-blasco, E. , Navarro-Peris, E. , De Rosa, M. ve Corberán, J. M., “Potential fuel saving in a powertrain derived from the recovery of the main energy losses for a long haul European mission”, *Energy Conversion and Management* 150, 485-499, (2017).

Huang, K., Li, B., Yan, Y., Li, Y., Twaha, S. and Zhu, J., “A comprehensive study on a novel concentric cylindrical Thermoelectric power generation system”, *Applied Thermal Engineering*, 117, 501–510, (2017).

Ioffe, A. F., “Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling”, Infosearch, London, 5-10, (1957)

Kryotherm, (02.11.2018), Web adresi: <http://kryothermtec.com/catalogs.html>, (2018).

Kumar, S., Heister, S.D., Fu, X., Salvador, J.R. ve Meisner, G.P., “Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis”, *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 42, 665-674, (2013). DOI: 10.1007/s11664-013-2471-9.

Lee, H.S., “,ANSYS Air-duct-TEG-heat-sink Tutorial”, Western Michigan University,USA,<http://homepages.wmich.edu/~leehs/ME695/ME695%20SUM%20II.html>, 13, (2018).

Lee, H.S., “*Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*”, ISBN 978-0-470-49662-6, Western Michigan University, USA: John Wiley & Sons, Inc. (2010).

Lee, H.S., “*Thermoelectrics: Design and Materials*”, ISBN-13: 978-1118848951, Western Michigan University, USA: John Wiley & Sons, Inc. (2017).

Li, B., Huang, K., Yan, Y., Li, Y., Twaha, S. ve Zhu, J., “Heat transfer enhancement of a modularised thermoelectric power generator for passenger vehicles”, *Applied Energy*, 205, 868-879, (2017).

Li, Z., Li, W. ve Chen, Z., “Performance Analysis of Thermoelectric Base AutomotiveWaste Heat Recovery System with Nanofluid Coolant”, *Energies*, 10, 1489, (2017).

Massaguer, A., Massaguer, E., Comamala, M., Pujol, T., Montoro, L., Cardenas, M.D., Carbonell, D. ve Bueno, A. J., “Transient behavior under a normalized driving cycle of an automotive thermoelectric generator”, *Applied Energy*, 206, 1282-1296, (2017).

Nettleton, H.R., “*The Thomson effect*”, Proceedings of the Physical Society of London, (1922).

Osıpkov, A., Poshekhonov, R., Arutyunyan, G., Basov A. ve Safonov, R., “Modeling of Thermoelectric Generator Power Characteristics for Motorcycle-Type Engines”, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, 6195-6203, (2017).

Ovalı, İ ve Esen, C, “Ansys Workbench”, ISBN-13: 978-6059118897, Denizli: Kodlab Yayın Dağıtım, 34-36, (2017).

Özcan, E., “Faz IIIB emisyon standardına cevap veren turbo dizel traktör motorunun 4 supaplı silindir kafasının tasarımı ile ilgili teorik incelemeler ve uygulamalar” Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 21-27, (2009). <http://hdl.handle.net/11527/3909>

Potur, R. A., “Faz IIIB emisyon standardına cevap veren dizel traktör motorunun tasarımı için gerçek çevrimin matematik modellenmesi ve optimum yanma kanununun belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 106-109, (2009). <http://hdl.handle.net/11527/3914>

Seebeck, T. J., “*Magnetic polarization of metals and minerals*”, Abhandlugan der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 265, (1823).

Stobart, R., Wijewardane, M.A. and Yang, Z., “Comprehensive analysis of thermoelectric generation systems for automotive applications”, Applied Thermal Engineering, 112, 1433–1444, (2017).

Thomson, W., “*On a mechanical theory of thermoelectric current*”, Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, 91, (1851).

Thomson, W., “*Account of researches in thermo-electricity*”, Proceedings of the Royal Society of London, 7, 49–58, (1854).

Ünsaç, A., “Kriyojenik Isı Değiştiricisinde Termoelektrik Jeneratör Uygulaması ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 21-23, (2010). <http://hdl.handle.net/11527/12791>

Zhang, H., Kong, W., Dong, F., Xu, H., Chen B. and Ni, B., “Application of cascading thermoelectric generator and cooler for waste heat recovery from solid oxide fuel cells”, Energy Conversion and Management, 148, 1382-1390, (2017).

Zhang, H., Xu, H., Chen, B., Dong, F. ve Ni, M., “Two-stage thermoelectric generators for waste heat recovery from solid oxide fuel cells”, Energy, 132, 280-288, (2017).

Weng, C.C. ve Huang, M.J., “A simulation study of automotive waste heat recovery using a thermoelectric power generator”, International Journal of Thermal Sciences, 71, 302-309, (2013).



# **EKLER**

## 10. EKLER

### EK A Modülün Sıcak Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Optimum Kalınlığının Matlab Program Kodu

```
clc  
clear
```

#### Sabit Sayılar

```
w1=0.04;  
L1=0.04;  
b1=0.020;  
U1=0.162/(1.96*0.0098);  
tetal=15;  
kair1=0.0329;  
vair1=13.025*10^-6;  
Prair1=0.7061;  
ka1=177;  
Re1=(U1*L1)/vair1;  
zopt1=L1*3.24*(Re1^(-1/2))*(Prair1^(-1/4));  
h1=(kair1/L1)*0.664*(Re1^(1/2))*(Prair1^(1/3));
```

#### For Döngüsü Öncesi

```
n=1;  
tv1=0.00001:0.0000001:0.002;  
T1matris=[];
```

#### Optimum Kanat Kalınlığı Değerleri

```
for k1=2:numel(tv1)  
    t1=tv1(k1);  
    nf1=w1/(zopt1+t1);  
    beta1=b1*sqrt((2*h1)/(ka1*t1));  
    verimf1=(tanh(beta1))/beta1;  
    Af1=2*(L1+t1)*b1;  
    At1=nf1*(Af1+(L1*zopt1));  
    over1=1-((nf1*Af1)/At1)*(1-verimf1);  
    qtot1=over1*At1*h1*tetal;  
  
    T1matris(1,n)=t1;  
  
    T(n,1)=t1;  
    T(n,2)=nf1;  
    T(n,3)=qtot1;  
    T(n,4)=At1;  
    T(n,5)=over1;
```

```

n=n+1;
filename='heatsink1.xlsx';
end

```

### Maksimum Değerler

```

maxQtot1 = max(T(:,3));
Qtots=T(:,3);
T1ler = T(:,1);
nf1ler=T(:,2);
At1ler=T(:,4);
over1ler=T(:,5);

```

### Maksimum Değerlere Göre Optimum Kanat Kalınlığını Bulmak

```

for l=1:length(Qtots)
    if Qtots(l)== maxQtot1
        Qtot1MaxIset1Degeri= T1ler(l);
        t_1=T1ler(l);
    end
    if Qtots(l)== maxQtot1
        Qtot1MaxIset1Degeri= nf1ler(l);
        n_f1=nf1ler(l);
    end
    if Qtots(l)== maxQtot1
        Qtot1MaxIset1Degeri= At1ler(l);
        A_t1=At1ler(l);
    end
    if Qtots(l)== maxQtot1
        Qtot1MaxIset1Degeri= over1ler(l);
        over_1=over1ler(l);
    end
end
end

```

### Grafik Çizdirmek ve EXCEL Dosyası olarak Kaydetme

```

hold on
grid on
plot(T(:,1),T(:,3),'Linewidth',2);
% title('Toplam Isı Transfer Oranı vs Kanat Kalınlığı')
xlabel('t_1(m)')
ylabel('q_m_a_x_t_o_p_1(watt)')
xlswrite(filename,T,1,'A2');

```

## EK B Modülün Soğuk Yüzeyindeki Düz Levha Tipi Kanatların Optimum Kalınlığının Matlab Program Kodu

```
clc
clear
```

Sabit Sayılar

```
w2=0.04;
L2=0.04;
b2=0.016;
vfr2=14/2118.88199311;
Ac2=w2*b2;
U1=(1/2)*(vfr2/Ac2);
Tint=-5+273;
Tc=5+273;
teta2=Tc-Tint;
kair2=0.02364;
vair2=13.38*10^-6;
Prair2=0.7362;
rhoa2=2702;
ka2=177;
Lc2=L2/2;
Re2=(U1*Lc2)/vair2;
zopt2=Lc2*3.24*(Re2^(-1/2))*(Prair2^(-1/4));
h2=(kair2/Lc2)*0.664*(Re2^(1/2))*(Prair2^(1/3));
```

For Döngüsü Öncesi

```
n=1;
T2matris = [];
tv2=0.00001:0.0000001:0.002;
```

Optimum Kanat Kalınlığı Değerleri

```
for k2=1: numel(tv2)
    t2=tv2(k2);
    nf2=w2/(zopt2+t2);
    beta2=b2*sqrt((2*h2)/(ka2*t2));
    verimf2=(tanh(beta2))/beta2;
    Af2=2*(L2+t2)*b2;
    At2=nf2*(Af2+(L2*zopt2));
    over2=1-((nf2*Af2)/At2)*(1-verimf2);
    qtot2=over2*At2*h2*teta2;

    T2matris(1,n)=t2;

    T(n,1)=t2;
    T(n,2)=nf2;
```

```

        T(n,3)=qtot2;
        T(n,4)=At2;
        T(n,5)=over2;

        n=n+1;
        filename='heatsink.xlsx';
    end

```

### Maksimum Değerler

```

maxQtot2 = max(T(:,3));
Qtots=T(:,3);
T2ler = T(:,1);
nf2ler=T(:,2);
At2ler=T(:,4);
over2ler=T(:,5);

```

### Maksimum Değerlere Göre Optimum Kanat Kalınlığını Bulmak

```

for l=1:length(Qtots)
    if Qtots(l)== maxQtot2
        Qtot1MaxIset1Degeri= T2ler(l);
        t_2=T2ler(l);
    end
    if Qtots(l)== maxQtot2
        Qtot1MaxIset1Degeri= nf2ler(l);
        n_f2=nf2ler(l);
    end
    if Qtots(l)== maxQtot2
        Qtot1MaxIset1Degeri= At2ler(l);
        A_t2=At2ler(l);
    end
    if Qtots(l)== maxQtot2
        Qtot1MaxIset1Degeri= over2ler(l);
        over_2=over2ler(l);
    end
end
end

```

### Grafik Çizdirmek ve EXCEL Dosyası olarak Kaydetme

```

hold on
grid on
plot(T(:,1),T(:,3),'Linewidth',2);
title('Toplam Isı Transfer Oranı vs Kanat Kalınlığı')
xlabel('t_2(m)')
ylabel('q_m_a_x_t_o_p_2(watt)')
xlswrite(filename,T,1,'A2');

```

**EK C Tablo A-1**

904

**ÖZELLİK TABLOLARI VE DİYAGRAMLAR**

**TABLO A -1**

Mol kütlesi, gaz sabiti ve kritik nokta özellikleri

| Madde                          | Kimyasal formül                   | Mol kütlesi, $M$ kg/kmol | Gaz sabiti, $R$ kJ/kg·K* | Kritik nokta özellikleri |             |                             |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|
|                                |                                   |                          |                          | Sıcaklık, K              | Basınç, MPa | Hacim, m <sup>3</sup> /kmol |
| Hava                           | —                                 | 28.97                    | 0.2870                   | 132.5                    | 3.77        | 0.0883                      |
| Amonyak                        | NH <sub>3</sub>                   | 17.03                    | 0.4882                   | 405.5                    | 11.28       | 0.0724                      |
| Argon                          | Ar                                | 39.948                   | 0.2081                   | 151                      | 4.86        | 0.0749                      |
| Benzen                         | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>     | 78.115                   | 0.1064                   | 562                      | 4.92        | 0.2603                      |
| Bromin                         | Br <sub>2</sub>                   | 159.808                  | 0.0520                   | 584                      | 10.34       | 0.1355                      |
| <i>n</i> -Büten                | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>    | 58.124                   | 0.1430                   | 425.2                    | 3.80        | 0.2547                      |
| Karbon dioksit                 | CO <sub>2</sub>                   | 44.01                    | 0.1889                   | 304.2                    | 7.39        | 0.0943                      |
| Karbon monoksit                | CO                                | 28.011                   | 0.2968                   | 133                      | 3.50        | 0.0930                      |
| Karbon tetraklorür             | CCl <sub>4</sub>                  | 153.82                   | 0.05405                  | 556.4                    | 4.56        | 0.2759                      |
| Klorin                         | Cl <sub>2</sub>                   | 70.906                   | 0.1173                   | 417                      | 7.71        | 0.1242                      |
| Kloroform                      | CHCl <sub>3</sub>                 | 119.38                   | 0.06964                  | 536.6                    | 5.47        | 0.2403                      |
| Dichlorodifluoromethane (R-12) | CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>   | 120.91                   | 0.06876                  | 384.7                    | 4.01        | 0.2179                      |
| Dichlorofluoromethane (R-21)   | CHCl <sub>2</sub> F               | 102.92                   | 0.08078                  | 451.7                    | 5.17        | 0.1973                      |
| Ethan                          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>     | 30.070                   | 0.2765                   | 305.5                    | 4.48        | 0.1480                      |
| Etil alkol                     | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH  | 46.07                    | 0.1805                   | 516                      | 6.38        | 0.1673                      |
| Etilen                         | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>     | 28.054                   | 0.2964                   | 282.4                    | 5.12        | 0.1242                      |
| Helyum                         | He                                | 4.003                    | 2.0769                   | 5.3                      | 0.23        | 0.0578                      |
| <i>n</i> -Heksan               | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>    | 86.179                   | 0.09647                  | 507.9                    | 3.03        | 0.3677                      |
| Hidrojen (normal)              | H <sub>2</sub>                    | 2.016                    | 4.1240                   | 33.3                     | 1.30        | 0.0649                      |
| Kripton                        | Kr                                | 83.80                    | 0.09921                  | 209.4                    | 5.50        | 0.0924                      |
| Metan                          | CH <sub>4</sub>                   | 16.043                   | 0.5182                   | 191.1                    | 4.64        | 0.0993                      |
| Metil alkol                    | CH <sub>3</sub> OH                | 32.042                   | 0.2595                   | 513.2                    | 7.95        | 0.1180                      |
| Metil klor                     | CH <sub>3</sub> Cl                | 50.488                   | 0.1647                   | 416.3                    | 6.68        | 0.1430                      |
| Neon                           | Ne                                | 20.183                   | 0.4119                   | 44.5                     | 2.73        | 0.0417                      |
| Nitrojen                       | N <sub>2</sub>                    | 28.013                   | 0.2968                   | 126.2                    | 3.39        | 0.0899                      |
| Azot oksit                     | N <sub>2</sub> O                  | 44.013                   | 0.1889                   | 309.7                    | 7.27        | 0.0961                      |
| Oksijen                        | O <sub>2</sub>                    | 31.999                   | 0.2598                   | 154.8                    | 5.08        | 0.0780                      |
| Propan                         | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>     | 44.097                   | 0.1885                   | 370                      | 4.26        | 0.1998                      |
| Propilan                       | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>     | 42.081                   | 0.1976                   | 365                      | 4.62        | 0.1810                      |
| Kükürt dioksit                 | SO <sub>2</sub>                   | 64.063                   | 0.1298                   | 430.7                    | 7.88        | 0.1217                      |
| Tetrafluoroethan (R-134a)      | CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F | 102.03                   | 0.08149                  | 374.2                    | 4.059       | 0.1993                      |
| Trichlorofluoromethan (R-11)   | CCl <sub>3</sub> F                | 137.37                   | 0.06052                  | 471.2                    | 4.38        | 0.2478                      |
| Su                             | H <sub>2</sub> O                  | 18.015                   | 0.4615                   | 647.1                    | 22.06       | 0.0560                      |
| Xenon                          | Xe                                | 131.30                   | 0.06332                  | 289.8                    | 5.88        | 0.1186                      |

\*kJ/(kg·K) birimi kPa·m<sup>3</sup>/kg·K birimiyle eşdeğerdir. Gaz sabiti  $R = R_u/M$  bağıntısından hesaplanmıştır.  $R_u = 8.31447$  kJ/kmol·K,  $M$ : mol kütlesi.

Kaynak: K. A. Kobe and R. E. Lynn, Jr., Chemical Review 52 (1953), pp. 117-236; ve ASHARE, Handbook of Fundamentals (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), pp. 16.4 and 36.1.

# EK D Tablo A-15

884  
EK

**TABLO A-15**

Havanın 1 atm basınçta özellikleri

| Sıcaklık<br>$T, ^\circ\text{C}$ | Özgül kütle<br>$\rho, \text{kg/m}^3$ | Özgül ısı<br>$c_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$ | Isıl iletkenlik<br>$k, \text{W/m}\cdot\text{K}$ | Isıl yayılım katsayısı<br>$\alpha, \text{m}^2/\text{s}$ | Dinamik Viskozite<br>$\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$ | Kinematik Viskozite<br>$\nu, \text{m}^2/\text{s}$ | Prandtl Sayısı<br>Pr |
|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------|
| -150                            | 2.866                                | 983                                          | 0.01171                                         | $4.158 \times 10^{-6}$                                  | $8.636 \times 10^{-6}$                               | $3.013 \times 10^{-6}$                            | 0.7246               |
| -100                            | 2.038                                | 966                                          | 0.01582                                         | $8.036 \times 10^{-6}$                                  | $1.189 \times 10^{-5}$                               | $5.837 \times 10^{-6}$                            | 0.7263               |
| -50                             | 1.582                                | 999                                          | 0.01979                                         | $1.252 \times 10^{-5}$                                  | $1.474 \times 10^{-5}$                               | $9.319 \times 10^{-6}$                            | 0.7440               |
| -40                             | 1.514                                | 1002                                         | 0.02057                                         | $1.356 \times 10^{-5}$                                  | $1.527 \times 10^{-5}$                               | $1.008 \times 10^{-5}$                            | 0.7436               |
| -30                             | 1.451                                | 1004                                         | 0.02134                                         | $1.465 \times 10^{-5}$                                  | $1.579 \times 10^{-5}$                               | $1.087 \times 10^{-5}$                            | 0.7425               |
| -20                             | 1.394                                | 1005                                         | 0.02211                                         | $1.578 \times 10^{-5}$                                  | $1.630 \times 10^{-5}$                               | $1.169 \times 10^{-5}$                            | 0.7408               |
| -10                             | 1.341                                | 1006                                         | 0.02288                                         | $1.696 \times 10^{-5}$                                  | $1.680 \times 10^{-5}$                               | $1.252 \times 10^{-5}$                            | 0.7387               |
| 0                               | 1.292                                | 1006                                         | 0.02364                                         | $1.818 \times 10^{-5}$                                  | $1.729 \times 10^{-5}$                               | $1.338 \times 10^{-5}$                            | 0.7362               |
| 5                               | 1.269                                | 1006                                         | 0.02401                                         | $1.880 \times 10^{-5}$                                  | $1.754 \times 10^{-5}$                               | $1.382 \times 10^{-5}$                            | 0.7350               |
| 10                              | 1.246                                | 1006                                         | 0.02439                                         | $1.944 \times 10^{-5}$                                  | $1.778 \times 10^{-5}$                               | $1.426 \times 10^{-5}$                            | 0.7336               |
| 15                              | 1.225                                | 1007                                         | 0.02476                                         | $2.009 \times 10^{-5}$                                  | $1.802 \times 10^{-5}$                               | $1.470 \times 10^{-5}$                            | 0.7323               |
| 20                              | 1.204                                | 1007                                         | 0.02514                                         | $2.074 \times 10^{-5}$                                  | $1.825 \times 10^{-5}$                               | $1.516 \times 10^{-5}$                            | 0.7309               |
| 25                              | 1.184                                | 1007                                         | 0.02551                                         | $2.141 \times 10^{-5}$                                  | $1.849 \times 10^{-5}$                               | $1.562 \times 10^{-5}$                            | 0.7296               |
| 30                              | 1.164                                | 1007                                         | 0.02588                                         | $2.208 \times 10^{-5}$                                  | $1.872 \times 10^{-5}$                               | $1.608 \times 10^{-5}$                            | 0.7282               |
| 35                              | 1.145                                | 1007                                         | 0.02625                                         | $2.277 \times 10^{-5}$                                  | $1.895 \times 10^{-5}$                               | $1.655 \times 10^{-5}$                            | 0.7268               |
| 40                              | 1.127                                | 1007                                         | 0.02662                                         | $2.346 \times 10^{-5}$                                  | $1.918 \times 10^{-5}$                               | $1.702 \times 10^{-5}$                            | 0.7255               |
| 45                              | 1.109                                | 1007                                         | 0.02699                                         | $2.416 \times 10^{-5}$                                  | $1.941 \times 10^{-5}$                               | $1.750 \times 10^{-5}$                            | 0.7241               |
| 50                              | 1.092                                | 1007                                         | 0.02735                                         | $2.487 \times 10^{-5}$                                  | $1.963 \times 10^{-5}$                               | $1.798 \times 10^{-5}$                            | 0.7228               |
| 60                              | 1.059                                | 1007                                         | 0.02808                                         | $2.632 \times 10^{-5}$                                  | $2.008 \times 10^{-5}$                               | $1.896 \times 10^{-5}$                            | 0.7202               |
| 70                              | 1.028                                | 1007                                         | 0.02881                                         | $2.780 \times 10^{-5}$                                  | $2.052 \times 10^{-5}$                               | $1.995 \times 10^{-5}$                            | 0.7177               |
| 80                              | 0.9994                               | 1008                                         | 0.02953                                         | $2.931 \times 10^{-5}$                                  | $2.096 \times 10^{-5}$                               | $2.097 \times 10^{-5}$                            | 0.7154               |
| 90                              | 0.9718                               | 1008                                         | 0.03024                                         | $3.086 \times 10^{-5}$                                  | $2.139 \times 10^{-5}$                               | $2.201 \times 10^{-5}$                            | 0.7132               |
| 100                             | 0.9458                               | 1009                                         | 0.03095                                         | $3.243 \times 10^{-5}$                                  | $2.181 \times 10^{-5}$                               | $2.306 \times 10^{-5}$                            | 0.7111               |
| 120                             | 0.8977                               | 1011                                         | 0.03235                                         | $3.565 \times 10^{-5}$                                  | $2.264 \times 10^{-5}$                               | $2.522 \times 10^{-5}$                            | 0.7073               |
| 140                             | 0.8542                               | 1013                                         | 0.03374                                         | $3.898 \times 10^{-5}$                                  | $2.345 \times 10^{-5}$                               | $2.745 \times 10^{-5}$                            | 0.7041               |
| 160                             | 0.8148                               | 1016                                         | 0.03511                                         | $4.241 \times 10^{-5}$                                  | $2.420 \times 10^{-5}$                               | $2.975 \times 10^{-5}$                            | 0.7014               |
| 180                             | 0.7788                               | 1019                                         | 0.03646                                         | $4.593 \times 10^{-5}$                                  | $2.504 \times 10^{-5}$                               | $3.212 \times 10^{-5}$                            | 0.6992               |
| 200                             | 0.7459                               | 1023                                         | 0.03779                                         | $4.954 \times 10^{-5}$                                  | $2.577 \times 10^{-5}$                               | $3.455 \times 10^{-5}$                            | 0.6974               |
| 250                             | 0.6746                               | 1033                                         | 0.04104                                         | $5.890 \times 10^{-5}$                                  | $2.760 \times 10^{-5}$                               | $4.091 \times 10^{-5}$                            | 0.6946               |
| 300                             | 0.6158                               | 1044                                         | 0.04418                                         | $6.871 \times 10^{-5}$                                  | $2.934 \times 10^{-5}$                               | $4.765 \times 10^{-5}$                            | 0.6935               |
| 350                             | 0.5664                               | 1056                                         | 0.04721                                         | $7.892 \times 10^{-5}$                                  | $3.101 \times 10^{-5}$                               | $5.475 \times 10^{-5}$                            | 0.6937               |
| 400                             | 0.5243                               | 1069                                         | 0.05015                                         | $8.951 \times 10^{-5}$                                  | $3.261 \times 10^{-5}$                               | $6.219 \times 10^{-5}$                            | 0.6948               |
| 450                             | 0.4880                               | 1081                                         | 0.05298                                         | $1.004 \times 10^{-4}$                                  | $3.415 \times 10^{-5}$                               | $6.997 \times 10^{-5}$                            | 0.6965               |
| 500                             | 0.4565                               | 1093                                         | 0.05572                                         | $1.117 \times 10^{-4}$                                  | $3.563 \times 10^{-5}$                               | $7.806 \times 10^{-5}$                            | 0.6986               |
| 600                             | 0.4042                               | 1115                                         | 0.06093                                         | $1.352 \times 10^{-4}$                                  | $3.846 \times 10^{-5}$                               | $9.515 \times 10^{-5}$                            | 0.7037               |
| 700                             | 0.3627                               | 1135                                         | 0.06581                                         | $1.598 \times 10^{-4}$                                  | $4.111 \times 10^{-5}$                               | $1.133 \times 10^{-4}$                            | 0.7092               |
| 800                             | 0.3289                               | 1153                                         | 0.07037                                         | $1.855 \times 10^{-4}$                                  | $4.362 \times 10^{-5}$                               | $1.326 \times 10^{-4}$                            | 0.7149               |
| 900                             | 0.3008                               | 1169                                         | 0.07465                                         | $2.122 \times 10^{-4}$                                  | $4.600 \times 10^{-5}$                               | $1.529 \times 10^{-4}$                            | 0.7206               |
| 1000                            | 0.2772                               | 1184                                         | 0.07868                                         | $2.398 \times 10^{-4}$                                  | $4.826 \times 10^{-5}$                               | $1.741 \times 10^{-4}$                            | 0.7260               |
| 1500                            | 0.1990                               | 1234                                         | 0.09599                                         | $3.908 \times 10^{-4}$                                  | $5.817 \times 10^{-5}$                               | $2.922 \times 10^{-4}$                            | 0.7478               |
| 2000                            | 0.1553                               | 1264                                         | 0.11113                                         | $5.664 \times 10^{-4}$                                  | $6.630 \times 10^{-5}$                               | $4.270 \times 10^{-4}$                            | 0.7539               |

Not: İdeal gazlar için  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  ve Pr özellikleri basınçtan bağımsızdır. 1 atm'den farklı bir  $P$  (atm) basıncındaki  $\rho$ ,  $\nu$  ve  $\alpha$  özellikleri, verilen sıcaklıktaki  $\rho$  değerleri  $P$  ile çarpılarak  $\nu$  ve  $\alpha$  değerleri  $P$  ile bölünerek bulunur.

Kaynak: Veriler S. A. Klein ve F. L. Alvarado tarafından geliştirilen EES yazılımıyla oluşturulmuştur. Orijinal kaynaklar: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter. Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 030606702018.

## EK E Termoelektrik Jeneratör Modülünün En Uygun Tasarımının Matlab Program Kodu

```
clc  
clear
```

### Sabit Sayılar

```
a=325.6*10^-6;  
rho=2.048*10^-5;  
k=3;  
Z=a^2/(rho*k);  
Tcevre=303;  
ZTcevre=Z*Tcevre;  
Ts=408.15;  
Tsy=Ts/Tcevre;  
Toplam_Kanat_Verimi_1=0.7353;  
h1=78.2679;  
A1=0.0561;  
Toplam_Kanat_Verimi_2=0.7980;  
h2=61.8862;  
A2=0.0479;  
Nh=(Toplam_Kanat_Verimi_1*h1*A1)/(Toplam_Kanat_Verimi_2*h2*A2);
```

### For Döngüsü Öncesi

```
syms x y  
Nkv =0.452; %0.445:0.001:0.460; %Bu aralıktan elde edilmiştir.  
Rrv =1.273; %1.265:0.001:1.280; %Bu aralıktan elde edilmiştir.  
  
n=1;  
T1matris = [];  
T2matris = [];
```

### T<sub>1</sub>\* ve T<sub>2</sub>\* Çözmek

```
for k1 = 1:numel(Nkv)  
    Nk = Nkv(k1);  
    for k2 = 1:numel(Rrv)  
        Rr = Rrv(k2);  
        Eq1= (Nh*(Tsy-x))/Nk==(((ZTcevre*(x-y)*x)/(Rr+1))-((ZTcevre*(x-y)^2)/(2*(Rr+1)^2))+(x-y));  
        Eq2=(y-1)/Nk ==(((ZTcevre*(x-y)*y)/(Rr+1))+((ZTcevre*(x-y)^2)/(2*(Rr+1)^2))+(x-y));  
  
        sol=solve([Eq1,Eq2]);  
        T1star=double(sol.x);  
        T2star=double(sol.y);  
  
        a=0;
```

```

if T1star(1)>0 && T2star(1)>0
    a=1;
elseif T1star(2)>0 && T2star(2)>0
    a=2;
else
    a=3;
end

T1=T1star(a)*Tcevre;
T2=T2star(a)*Tcevre;
Qy1=Nh*(Tsy-T1star(a));
Qy2=T2star(a)-1;
Wy=Qy1-Qy2;
verim=Wy/Qy1;
Ni=(ZTcevre*((T1star(a))-(T2star(a))))/(Rr+1);
Nv=Wy/(Ni*Nk);

T1matris(1,n)=double(sol.x(a));
T2matris(1,n)=double(sol.y(a));

T(n,1)=Nk;
T(n,2)=Rr;
T(n,3)=double(sol.x(a));
T(n,4)=double(sol.y(a));
T(n,5)=Wy;
T(n,6)=verim;
T(n,7)=Ni;
T(n,8)=Nv;
T(n,9)=T1;
T(n,10)=T2;
n=n+1;
filename='tablo1.xlsx';

end

end

```

T matrisini Excel'e yazdırmak

```

xlswrite(filename,T,1,'A2');

```

## EK F Termoelektrik Jeneratör Modülünün En Uygun Tasarımının Tablo Okuma Matlab Program Kodu

```
clc;  
clear;
```

### EXCEL Dosyasındaki Değerleri Matlab'a Aktarma

```
filename=xlsread('tablo1.xlsx');  
N_k=filename(:,1);  
R_r=filename(:,2);  
T_y1=filename(:,3);  
T_y2=filename(:,4);  
W_y=filename(:,5);  
verim=filename(:,6);  
N_i=filename(:,7);  
N_v=filename(:,8);
```

### Sabit Sayılar

```
Toplam_Kanat_Verimi_2=0.7980;  
h_2=61.8862;  
A_2=0.0479;  
T_cevre=303;
```

### Grafik Çizdirme

```
figure  
hold on  
plot(R_r,W_y,'Linewidth',2)  
xlabel('R_r');  
ylabel('W_y');  
hold off
```

### For Döngüsü Öncesi

```
format long  
maxwy = max(W_y)  
wyn=W_y;  
wn=maxwy*h_2*A_2*T_cevre*Toplam_Kanat_Verimi_2  
Rrler = R_r;  
Nkler=N_k;  
T1ler=T_y1;  
T2ler=T_y2;  
verimler=verim;  
Niler=N_i;  
Nvler=N_v;
```

## R<sub>r</sub> Değerine Göre Çıkan Maksimum Gücün Bulunması

```
for l=1:length(wyn)
    if wyn(l)== maxwy
        wyMaxIset1Degeri= Rr1er(l);
        Rr=Rr1er(l)
    end

    if wyn(l)== maxwy
        wyMaxIset1Degeri= Nk1er(l);
        Nk=Nk1er(l)
    end

    if wyn(l)== maxwy
        wyMaxIset1Degeri= T11er(l);
        Ty1=T11er(l)
        T1=Ty1*T_cevre
    end

    if wyn(l)== maxwy
        wyMaxIset1Degeri= T21er(l);
        Ty2=T21er(l)
        T2=Ty2*T_cevre
    end

    if wyn(l)== maxwy
        wyMaxIset1Degeri= verim1er(l);
        verim=verim1er(l)
    end

    if wyn(l)== maxwy
        wyMaxIset1Degeri= N1er(l);
        N1=N1er(l)
    end

    if wyn(l)== maxwy
        wyMaxIset1Degeri= Nv1er(l);
        Nv=Nv1er(l)
    end
end
end
```

## **EK G Thermal-Electric Giriş Komut Dosyasındaki Mekanik APDL Kodlamaları**

|                       |                                          |
|-----------------------|------------------------------------------|
| nse1,all              |                                          |
| nse1,r,loc,y,2.2e-3   | !y koordinatındaki tüm düğümleri al      |
| cp,1,temp,all         | !seçilen tüm düğümlere eşit sıcaklık ata |
| nh=ndnext(0)          | !master düğüm                            |
| d,nh,temp,ARG1-273.15 | !seçilen düğümlere sıcaklık değeri ata   |
| nse1,all              |                                          |

## **EK H Thermal-Electric Çözüm Komut Dosyasındaki Mekanik APDL Kodlamaları**

|                            |                                           |
|----------------------------|-------------------------------------------|
| /POST26                    |                                           |
| RFORCE,2,nh,HEAT[1]        | !seçilen düğümlerdeki ısı miktarını almak |
| *GET,my_heat,VARI,,NSETS   | !değer olarak çözümden alma               |
| *dim,HeatArr,array,my_heat | !array oluşturmak                         |
| VGET,HeatArr(1),2          | ! arraylere tanımlamak                    |
| my_heat=HeatArr(1)         | !parametre olarak arrayi atamak           |

## 11. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali GÜRCAN

Doğum Yeri ve Tarihi : UŞAK-08/06/1994

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : agurcan12@posta.pau.edu.tr

İletişim Adresi : Kınıklı Mah. 6064 Sk. No:8 Kınıklı/DENİZLİ