

**TERMoeLEKTRİK JENERATÖRÜ KULLANILAN TAŞITLARDA**

**EGZOZ GAZLARINDAN ELEKTRİK ÜRETİLMESİ**

**İlker TEMİZER**

**Doktora Tezi**

**Makine Eğitimi Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ**

**EKİM-2014**

**T.C**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRÜ KULLANILAN TAŞITLARDA**  
**EGZOZ GAZLARINDAN ELEKTRİK ÜRETİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İlker TEMİZER**

**(102119201)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Eylül 2014**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Ekim 2014**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ (F.Ü)**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Halis ÇELİK (F.Ü)**

**Doç. Dr. Cengiz ÖNER (F.Ü)**

**Doç. Dr. Hüseyin AYDIN (B.Ü)**

**Yrd. Doç. Dr. Halit Lütfü YÜCEL (F.Ü)**

**EKİM-2014**

## **ÖNSÖZ**

Tez çalışmasının yürütülmesinde bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ’a sonsuz şükranlarımı sunarım. Tez çalışmam esnasında desteklerini benden esirgemeyen araştırma görevlileri Burak TANYERİ ve Müjdat FIRAT’a ve Alparslan Üniversitesi öğretim elemanı Bilal COŞKUN’a teşekkür ederim. Bu eğitim seviyesine kadar, bana verdikleri emeklerinin karşılığını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim değerli aileme sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca çalışma süresince desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasını, 1303 no’lu proje kapsamında maddi olarak destekleyen FÜBAP’a ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

**İlker TEMİZER**  
**ELAZIĞ-2014**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                     | <u>Sayfa No</u> |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ.....                                                          | II              |
| İÇİNDEKİLER.....                                                    | III             |
| ÖZET.....                                                           | V               |
| SUMMARY.....                                                        | VI              |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                               | VII             |
| TABLolar LİSTESİ.....                                               | XIV             |
| SEMBOLLER LİSTESİ.....                                              | XV              |
| 1. GİRİŞ .....                                                      | 1               |
| 1.1 Motorlarda Yanma ve Egzoz İşlemi .....                          | 2               |
| 1.2 Elektrik Enerjisi Dönüşüm Sistemleri .....                      | 8               |
| 1.2.1 Elektromanyetik İndüksiyon .....                              | 9               |
| 1.2.1.1 Sarj Dinamoları .....                                       | 9               |
| 1.2.1.2 Alternatör .....                                            | 10              |
| 1.2.1.2.1 Rotor.....                                                | 12              |
| 1.2.1.2.2 Statör .....                                              | 13              |
| 1.2.1.2.3 Diyotlar .....                                            | 14              |
| 1.2.1.2.4 Regülatör .....                                           | 14              |
| 1.2.1.3 Elektrik Enerjisinin Depolanması .....                      | 16              |
| 1.2.1.3.1 Akü Şarj Etme Metotları .....                             | 19              |
| 1.2.2 Basınç Etkisi ile Elektrik Enerjisinin Elde Edilmesi .....    | 19              |
| 1.2.3 Işık Etkisi ile Elektrik Enerjisinin Elde Edilmesi .....      | 20              |
| 1.2.4 Isı Etkisi ile Elektrik Enerjisinin Elde Edilmesi .....       | 21              |
| 1.2.4.1 Seebeck Etkisi .....                                        | 22              |
| 1.2.4.2 Peltier Etkisi .....                                        | 29              |
| 1.2.4.3 Thompson Etkisi .....                                       | 30              |
| 1.2.4.4 Joule Etkisi .....                                          | 30              |
| 1.2.4.5 Termal İletim Etkisi .....                                  | 30              |
| 1.3 Yarıiletken Yapılar.....                                        | 31              |
| 1.3.1 Yarı İletken Alaşımının Üretiminde Kullanılan Yöntemler ..... | 35              |
| 1.3.1.1 Flaş Buharlaştırma Yöntemi .....                            | 36              |

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.3.1.2 Döküm Yöntemi.....                                    | 36        |
| 1.4 Termoelektrik Soğutucular .....                           | 43        |
| 1.4.1 Termoelektrik Soğutucularda Kullanılan Malzemeler.....  | 46        |
| 1.5 Termoelektrik Güç Ekipmanları .....                       | 47        |
| 1.5.1 Termoelektrik Modül .....                               | 47        |
| 1.5.2 Isı Değiştiriciler.....                                 | 47        |
| 1.5.3 DA/DA Dönüştürücüler .....                              | 47        |
| 1.6 Taşıtlarda Atık Enerji Hesaplamaları.....                 | 49        |
| 1.6.1 Egzoz gazlarının Termofiziksel Özellikleri .....        | 49        |
| 1.7 Isı Transfer Hesaplamaları .....                          | 52        |
| 1.7.1 Egzoz Gazı İdeal Isı Transfer Kapasitesi .....          | 52        |
| 1.7.2 Türbülans Modelleri.....                                | 57        |
| 1.8 Enerjinin Geri Kazanımı Alanında Yapılan Çalışmalar ..... | 58        |
| <b>2. MATERYAL ve METOT.....</b>                              | <b>70</b> |
| 2.1 Sayısal Analizler .....                                   | 71        |
| 2.1.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi .....       | 72        |
| 2.1.1.1 Kütlenin Korunumu Denklemi.....                       | 72        |
| 2.1.1.2 Momentum Korunumu Denklemleri.....                    | 72        |
| 2.1.1.3 Enerji Denklemi .....                                 | 73        |
| 2.1.1.4 Türbülans Denklemi.....                               | 73        |
| 2.1.2 Sonlu Elemanlar Metodu .....                            | 75        |
| 2.2 Deneysel Analizler.....                                   | 79        |
| 2.2.1 Deney Seti .....                                        | 79        |
| 2.2.1.1 Dinamometre ve Deney Motoru .....                     | 79        |
| 2.2.1.2 Motorun Yüklenmesi .....                              | 81        |
| 2.2.2 Sistem Tasarımı.....                                    | 81        |
| 2.2.2.1 Isı Değiştirici,Fan ve Pompa .....                    | 83        |
| 2.2.2.2 Termoelektrik Modüller ve Bağlantı Elemanları .....   | 83        |
| 2.2.3 Test Düzeneği .....                                     | 88        |
| 2.2.3.1 Ölçüm Cihazları ve DA/DA Dönüştürücü .....            | 88        |
| <b>3. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA .....</b>                 | <b>91</b> |
| 3.1 TEM Sıcaklık Dağılımları.....                             | 95        |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2 TEJ Sistemde Üretilen Akım, Gerilim ve Güç İlişkisi.....             | 97         |
| 3.3 Üretilen Elektrik Enerjisi İle Akü Şarjı.....                        | 100        |
| 3.4 Isı ve Akış Analizi.....                                             | 103        |
| 3.4.1 Motorun 1500d/dak Çalışma Şartlarında Oluşan Analiz Sonuçları..... | 105        |
| 3.4.2 Motorun 2000d/dak Çalışma Şartlarında Oluşan Analiz Sonuçları..... | 111        |
| 3.4.3 Motorun 2500d/dak Çalışma Şartlarında Oluşan Analiz Sonuçları..... | 115        |
| 3.4.4 Motorun 3000d/dak Çalışma Şartlarında Oluşan Analiz Sonuçları..... | 120        |
| 3.4.5 Motorun 3500d/dak Çalışma Şartlarında Oluşan Analiz Sonuçları..... | 125        |
| 3.5 Termal-Elektrik Analizler .....                                      | 131        |
| <b>4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>                                     | <b>157</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                   | <b>160</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                     | <b>168</b> |

## ÖZET

Bu çalışmada termoelektrik jeneratörlerin çalışma prensiplerine uygun olarak bir prototip geliştirilmiştir. Isıtılacak yüzey için bir dizel motorun egzoz sistemi kullanılmış ve motorun çalışması sonucu açığa çıkan egzoz gazlarının ısı enerjisinden faydalanılmıştır. TEM’lerde fark sıcaklığının oluşmasında ihtiyaç duyulan soğutma etkisi ise motordan harici bir soğutma sistemi tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu sistemin ihtiyaç duyduğu elektrik gücü miktarı ise 20 W olmuştur. Alüminyum 6061 malzemesinden oluşan sekizgen yapıya montajı gerçekleştirilen termoelektrik modüller kendi aralarında elektriksel olarak seri bağlanmıştır. Elde edilen elektriksel güç DA/DA konvertöre aktararak akü şarjını gerçekleştirmiştir. Daha sonra sistemin, Ansys Workbench 12.0 içinde yer alan ve aynı zamanda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan Fluent programı yardımıyla ısı–akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak Ansys Workbench 12.0 içinde yer alan ve aynı zamanda Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) yazılımı olan Thermal-Electric programı yardımıyla TEM’lerin ısı–elektrik analizleri yapılmıştır.

TEJ sisteminin ürettiği maksimum elektriksel çıkış gücü motorun 3500 dak<sup>-1</sup>devir ve 100 Nm yükte çalışma şartlarında 156.7 W olarak kaydedilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Termoelektrik Jeneratör, Enerji Geri Kazanımını, Termal-Elektrik

## **SUMMARY**

### **Produce Electricity From Exhaust Gases in The Vehicles Used Thermoelectric Generator**

In this study, A prototype has been developed as the working principle of thermoelectric generators. The exhaust system of a diesel engine used for the surface will be heated and as a result of operation of the engine profit by heat energy of the exhaust gases. Required cooling effect in the occur of the different temperature of TEM's is realised by an cooling system without engine. Reguired electric power of this system is 20 W. Electrically are connected as series with each other thermoelectric modules realised assembly octagonal structure consisted from the aluminum 6160 material. The battery charging is performed with electrical power supplied to DC / DC converter. Then in the system, heat-flow analysis was realised with the help Fluent which contained in the Ansys Workbench 12.0 and in the same time meaning Computational Fluid Dynamics (CFD) software. Finally, TEM's was heat-electric analysis carried out with the help Thermal-Electric which contained in the Ansys Workbench 12.0 and in the same time meaning Finite Element Method (FEM) software.

The maximum electrical output power produce of the TEJ system is registered as 156.7 W at the 3500 rpm and 100 Nm as of the engine working condition.

**Keywords:** Thermoelectric Generation, Energy Recovery, Thermal-Electric

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 Motorlarda üretilen enerjinin dağılımı.....                                                                                            | 2  |
| Şekil 1.2. Silindir içi sıcaklık dağılımları.....                                                                                                | 5  |
| Şekil 1.3. Benzinli (üst) ve Dizel (alt) motorları için egzoz gazları bileşenlerinin sıcaklık dağılımları.....                                   | 7  |
| Şekil 1.4. Klasik tip alternatör.....                                                                                                            | 10 |
| Şekil 1.5. Alternatör devir-akım ilişkisi.....                                                                                                   | 11 |
| Şekil 1.6. Alternatör karakteristik eğrisi.....                                                                                                  | 11 |
| Şekil 1.7. Rotorun yapısı ve görünümü.....                                                                                                       | 11 |
| Şekil 1.8.Statorun yapısı ve stator sargıları.....                                                                                               | 13 |
| Şekil 1.9. Üç fazlı alternatif akım.....                                                                                                         | 14 |
| Şekil 1.10. IC regülâtörün prensip şeması.....                                                                                                   | 15 |
| Şekil 1.11 Taşıtlardaki en temel alternatör ve şarj sistemi.....                                                                                 | 16 |
| Şekil 1.12. Akünün iç yapısı.....                                                                                                                | 17 |
| Şekil 1.13. Piezoelektrik algılayıcı.....                                                                                                        | 20 |
| Şekil 1.14. Fotovoltaik düzenek.....                                                                                                             | 20 |
| Şekil 1.15.TEM iç yapısı.....                                                                                                                    | 25 |
| Şekil 1.16. İndüklenen elektrik akımı.....                                                                                                       | 27 |
| Şekil 1.17. Peltier Deneyi ve Termoelektrik Çifti.....                                                                                           | 29 |
| Şekil 1.18. P-n çiftinde elektron-yük taşıyıcı hareketleri.....                                                                                  | 32 |
| Şekil 1.19. Sıcaklık farkıyla oluşan elektron hareketliliği.....                                                                                 | 34 |
| Şekil 1.20. Malzeme içerisindeki taşıyıcı konsantrasyonuna göre iletkenlik, Seebeck katsayısı, güç faktörü, ve termal iletkenliğin değişimi..... | 35 |
| Şekil 1.21. Termoelektrik malzemelerin performansı.....                                                                                          | 39 |
| Şekil 1.22. (a) Metalin (Fe) ve (b) yarı iletkenin (Si) öz direncinin sıcaklıkla                                                                 |    |

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| değişiminin gösterimi .....                                                                                                                      | 40 |
| Şekil 1.23. Konum grafiği.....                                                                                                                   | 41 |
| Şekil 1.24. Bir yarı iletken de elektrik alanının varlığında elektron ve hollerin hareket<br>Yönleri.....                                        | 42 |
| Şekil1.25. Seri bağı p-n çiftinde akım yönü .....                                                                                                | 43 |
| Şekil 1.26. Bir termoelektrik soğutucu modülü.....                                                                                               | 45 |
| Şekil 1.27. Endüktör üzerindeki Akım-gerilim ilişkisi.....                                                                                       | 49 |
| Şekil 1.28. Deneysel çalışmada kullanılacak sistemin 3 boyutlu görünümü.....                                                                     | 54 |
| Şekil 1.29. Toplam ısı direnç ağı.....                                                                                                           | 54 |
| Şekil 1.30. Isı değıştirici sistemdeki akış yönü ve sıcaklık değışimi.....                                                                       | 55 |
| Şekil 1.31. TEJ fren balatası.....                                                                                                               | 60 |
| Şekil 1.32. Jeotermal kaynaklı termoelektrik üreteç .....                                                                                        | 61 |
| Şekil 1.33. Yakıt enerjisinin dönüşümü.....                                                                                                      | 63 |
| Şekil 1.34. Elektrik yükü olarak sisteme bağılanan ampüller.....                                                                                 | 66 |
| Şekil 1.35. Tasarlanan ısı değıştirici ve TE modül.....                                                                                          | 67 |
| Şekil 1.36. Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> (a) ve PeTe (b) temelli termoelektrik modüllerin oluşturdıkları<br>elektrik enerjisi değıerleri..... | 68 |
| Şekil 2.1. TEJ sisteminin Ansys Fluent programında iki boyutlu görünümü.....                                                                     | 74 |
| Şekil 2.2 TE modelin görünümü.....                                                                                                               | 77 |
| Şekil 2.3 P tipi materyal için tanımlanan Seebeck katsayısı.....                                                                                 | 78 |
| Şekil 2.4. N tipi materyal için tanımlanan Seebeck katsayısı.....                                                                                | 78 |
| Şekil 2.5. Test düzeneğinin basit şematik gösterimi.....                                                                                         | 80 |
| Şekil 2.6. Deney düzeneğinin genel görünümü.....                                                                                                 | 80 |
| Şekil 2.7. Kaynatma işlemi ve kullanılan MIG kaynağı.....                                                                                        | 82 |
| Şekil 2.8. Radyatör-fan (a) ve elektrikli pompa (b). ....                                                                                        | 83 |
| Şekil 2.9. Elektriksel olarak seri bağı modüller.....                                                                                            | 84 |
| Şekil 2.10. Farklı sıcaklardaki TEM için değışen iç direnç değıerleri.....                                                                       | 84 |
| Şekil 2.11. Sekizgen yapı üzerine seri bağılanan modüller.....                                                                                   | 85 |

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 2.12. TEJ sisteminin elektriksel devre yapısı.....                                                                         | 86  |
| Şekil 2.13. Kullanılan cidarın görünümü.....                                                                                     | 87  |
| Şekil 2.14. Al 6061 Silindir ceket.....                                                                                          | 87  |
| Şekil 2.15. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm aletleri.....                                                                    | 88  |
| Şekil 2.16. Deney motoruna bağlantısı gerçekleştirilen TEJ sistemi.....                                                          | 89  |
| Şekil 3.1. TEJ giriş bölümünde ölçülen egzoz gazı sıcaklıkları.....                                                              | 92  |
| Şekil 3.2. TEJ çıkış bölümünde ölçülen egzoz gazı sıcaklıkları.....                                                              | 93  |
| Şekil 3.3. TEJ girişinde ölçülen egzoz gaz hızı.....                                                                             | 93  |
| Şekil 3.4. 50 Nm motor yükü altında modüllerin sıcak ve soğuk kenar sıcaklıkları.....                                            | 96  |
| Şekil 3.5. 75 Nm motor yükü altında modüllerin sıcak ve soğuk kenar sıcaklıkları.....                                            | 96  |
| Şekil 3.6. 100 Nm motor yükü altında modüllerin sıcak ve soğuk kenar sıcaklıkları....                                            | 97  |
| Şekil 3.7. 50 Nm motor yükü için farklı motor devirlerinde oluşan Voltaj (a),<br>Akım (b) ve Elektriksel Güç (c) değerleri.....  | 98  |
| Şekil 3.8. 75 Nm motor yükü için farklı motor devirlerinde oluşan Voltaj (a),<br>Akım (b) ve Elektriksel Güç (c) değerleri.....  | 98  |
| Şekil 3.9. 100 Nm motor yükü için farklı motor devirlerinde oluşan Voltaj (a),<br>Akım (b) ve Elektriksel Güç (c) değerleri..... | 99  |
| Şekil 3.10. DA/DA Konvertörün basit işlem şeması.....                                                                            | 100 |
| Şekil 3.11. Motorun 50 Nm yükte çalışması durumunda oluşan şarj voltajı (a)<br>ve akımı (b).....                                 | 101 |
| Şekil 3.12. Motorun 75 Nm yükte çalışması durumunda oluşan şarj voltajı (a)<br>ve akımı (b).....                                 | 102 |
| Şekil 3.13. Motorun 100 Nm yükte çalışması durumunda oluşan şarj voltajı (a)<br>ve akımı (b).....                                | 102 |
| Şekil 3.14. Alt cidar görünümü.....                                                                                              | 105 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3.15. Egzoz gaz tarafına bakan alt cidarda oluşan sıcaklık eğrisi.....                                                           | 105 |
| Şekil 3.16. Motorun 1500 dak <sup>-1</sup> devir ve 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....  | 106 |
| Şekil 3.17. Motorun 1500 dak <sup>-1</sup> devrinde 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu<br>TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....  | 107 |
| Şekil 3.18. Motorun 1500 dak <sup>-1</sup> devirde 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu<br>TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....  | 107 |
| Şekil 3.19. Motorun 1500 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı.....                                            | 108 |
| Şekil. 3.20. x eksenı boyunca değışen hız değeri.....                                                                                  | 109 |
| Şekil 3.21. Motorun 1500 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı..                                     | 109 |
| Şekil 3.22. Motorun 1500 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan toplam<br>basınç dağılımı.....                               | 109 |
| Şekil 3.23. x eksenı boyunca değışen toplam basınç değeri.....                                                                         | 110 |
| Şekil 3.24. Motorun 2000 dak <sup>-1</sup> devrinde 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu<br>TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....  | 111 |
| Şekil 3.25. Motorun 2000 dak <sup>-1</sup> devrinde 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu<br>TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....  | 112 |
| Şekil 3.26. Motorun 2000 dak <sup>-1</sup> devrinde 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu<br>TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı..... | 113 |
| Şekil 3.27. Motorun 2000 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı.....                                            | 114 |
| Şekil 3.28. x eksenı boyunca TEJ sisteminde oluşan hız değeri.....                                                                     | 114 |
| Şekil 3.29. Motorun 2000 dak <sup>-1</sup> devirde çalışmasıyla TEJ sistemde oluşan statik<br>basınç dağılımı.....                     | 114 |
| Şekil 3.30. Motorun 2000 dak <sup>-1</sup> devirde çalışmasıyla TEJ sistemde oluşan toplam<br>basınç dağılımı.....                     | 115 |
| Şekil 3.31. x eksenı boyunca değışen toplam basınç değeri.....                                                                         | 115 |
| Şekil 3.32. Motorun 2500 dak <sup>-1</sup> devir 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....     | 116 |
| Şekil 3.33. Motorun 2500 dak <sup>-1</sup> devir 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....     | 116 |
| Şekil 3.34. Motorun 2500 dak <sup>-1</sup> devir 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....    | 117 |

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3.35. Motorun 2500 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı.....                                           | 118 |
| Şekil 3.36. x eksenini boyunca değişen hız değerleri.....                                                                             | 118 |
| Şekil 3.37. Motorun 2500 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı...                                   | 119 |
| Şekil 3.38. Motorun 2500 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan toplam<br>basınç dağılımı.....                              | 119 |
| Şekil 3.39. x eksenini boyunca değişen toplam basınç değerleri.....                                                                   | 119 |
| Şekil 3.40. Motorun 3000 dak <sup>-1</sup> devirde 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....  | 120 |
| Şekil 3.41. Motorun 3000 dak <sup>-1</sup> devir 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....    | 121 |
| Şekil 3.42. Motorun 3000 dak <sup>-1</sup> devir 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....   | 122 |
| Şekil 3.43. Motorun 3000 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı.....                                           | 123 |
| Şekil 3.44. x eksenini boyunca değişen hız değerleri.....                                                                             | 123 |
| Şekil 3.45. Motorun 3000 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı...                                   | 124 |
| Şekil 3.46. Motorun 3000 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı...                                   | 124 |
| Şekil 3.47. x eksenini boyunca değişen toplam basınç değerleri.....                                                                   | 124 |
| Şekil 3.48. Motorun 3500 dak <sup>-1</sup> devirde 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....  | 125 |
| Şekil 3.49. Motorun 3500 dak <sup>-1</sup> devirde 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı.....  | 126 |
| Şekil 3.50. Motorun 3500 dak <sup>-1</sup> devirde 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ<br>sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı..... | 127 |
| Şekil 3.51. Motorun 3500 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı.....                                           | 127 |
| Şekil 3.52. x eksenini boyunca değişen hız değerleri.....                                                                             | 128 |
| Şekil 3.53. Motorun 3500 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik<br>basınç dağılımı.....                              | 128 |
| Şekil 3.54. Motorun 3500 dak <sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan toplam<br>basınç dağılımı.....                              | 129 |
| Şekil 3.55. x eksenini boyunca değişen toplam basınç değerleri.....                                                                   | 129 |
| Şekil 3.56. TEM giriş sınır şartları.....                                                                                             | 132 |

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3.57. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 132 |
| Şekil 3.58. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 133 |
| Şekil.3.59. TEM giriş sınır şartları.....               | 133 |
| Şekil 3.60. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 134 |
| Şekil 3.61. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 134 |
| Şekil 3.62. TEM giriş sınır şartları.....               | 135 |
| Şekil 3.63. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 135 |
| Şekil 3.64. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 136 |
| Şekil 3.65. TEM giriş sınır şartları.....               | 136 |
| Şekil 3.66. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 137 |
| Şekil 3.67. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 137 |
| Şekil.3.68. TEM giriş sınır şartları.....               | 138 |
| Şekil 3.69. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 138 |
| Şekil 3.70. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 139 |
| Şekil 3.71. TEM giriş sınır şartları.....               | 139 |
| Şekil 3.72. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 140 |
| Şekil 3.73. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 140 |
| Şekil 3.74. TEM giriş sınır şartları.....               | 141 |
| Şekil 3.75. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 141 |
| Şekil 3.76. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 142 |
| Şekil 3.77. TEM giriş sınır şartları.....               | 142 |
| Şekil 3.78. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 143 |
| Şekil 3.79. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 143 |
| Şekil 3.80. TEM giriş sınır şartları.....               | 144 |
| Şekil 3.81. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 144 |
| Şekil 3.82. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 145 |
| Şekil.3.83. TEM giriş sınır şartları.....               | 145 |
| Şekil 3.84. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 146 |
| Şekil 3.85. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 146 |
| Şekil.3.86. TEM giriş sınır şartları.....               | 147 |
| Şekil 3.87. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 147 |
| Şekil 3.88. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 148 |

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| Şekil.3.89. TEM giriş sınır şartları.....               | 149 |
| Şekil 3.90. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 149 |
| Şekil 3.91. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 150 |
| Şekil.3.92. TEM giriş sınır şartları.....               | 150 |
| Şekil 3.93. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 151 |
| Şekil 3.94. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 151 |
| Şekil.3.95. TEM giriş sınır şartları.....               | 152 |
| Şekil 3.96. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 152 |
| Şekil 3.97. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....         | 153 |
| Şekil 3.98. TEM giriş sınır şartları.....               | 153 |
| Şekil 3.99. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı..... | 154 |
| Şekil 3.100. Termal-Elektrik analiz çıktısı.....        | 154 |
| Şekil 3.101. Deneysel ve sayısal TEM elektrik gücü..... | 155 |
| Şekil 3.102. Deneysel ve sayısal TEM elektrik gücü..... | 156 |
| Şekil 3.103. Deneysel ve sayısal TEM elektrik gücü..... | 156 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                             | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Tablo1.1. Alternatörde oluşan kayıp yüzdeleri.....                                          | 15                     |
| Tablo 1.2. BiTe yarı iletkenlerde Farklı sıcaklıklara göre değişen Seebeck katsayıları..... | 24                     |
| Tablo 1.3. Güç üretimi için kullanılan termoelektrik materyallerin karakterleri.....        | 38                     |
| Tablo 1.4. Farklı sıcaklıklara sahip egzoz gazlarının termofiziksel özellikleri.....        | 51                     |
| Tablo. 2.1. TEJ sistemi ölçütleri.....                                                      | 75                     |
| Tablo 2.2. TEM ölçütleri.....                                                               | 78                     |
| Tablo 2.3. Deney motorunun teknik özellikleri.....                                          | 81                     |
| Tablo 3.1. Soğutma suyunun TEJ sistemine giriş sıcaklıkları.....                            | 95                     |
| Tablo 3.2. Enerji hesaplamaları.....                                                        | 131                    |

## **SEMBOLLER ve KISALTMALAR**

|      |                                         |
|------|-----------------------------------------|
| ABD  | :Amerika Birleşik Devletleri            |
| BC   | : British Colombia                      |
| BSST | : Bay State School of Technology        |
| DA   | : Doğru Akım                            |
| DT   | : Sıcaklık Farkı                        |
| GM   | : General Motor                         |
| TEC  | : Termoelektrik Soğutucular             |
| TEG  | : Thermoelectric Generation             |
| TEJ  | :Termoelektrik Jeneratör                |
| TES  | :Termoelektrik Soğutma                  |
| TEM  | : Termoelektrik Modül                   |
| MİG  | : Metal Inert Gas                       |
| MIT  | : Massachusetts Institute Of Technology |
| PVC  | : Polivinil klorür                      |
| PWM  | : Pulse-width modulation                |
| RTI  | : Research Triangle Institute           |
| ZT   | : Materyal faktörü                      |

## 1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının fosil yakıt kökenli olması ve çevreye verdiği olumsuz etkilerinden dolayı insanlık yeni nesil enerji teknolojilerini geliştirmeyi hedef edinmiştir. Günümüz teknolojisinde kullanılan ve oldukça yaygın olan fosil enerji kaynakları genel olarak kömür, petrol, doğal gaz ve orman ürünleridir. Bu gibi kaynaklardan elde edilen enerji kimyasal reaksiyon ve oksidasyon gibi birtakım olaylara dayanmaktadır. Kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkan enerji, bazı zamanlar doğrudan doğruya, bazı zamanlarda da başka bir enerjiye dönüştürülerek dolaylı olarak kullanılır. Buna en güzel örnek olarak kimyasal reaksiyonlar sonucunda elde edilen elektrik enerjisini verebiliriz. Kimyasal yol ile elektrik enerjisi elde etmede bataryalar ve kuru tip piller yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda önemle üzerinde durulan yakıt bataryaları ile ilgili olarak ise çalışmalar da yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. Ülkelerin enerji ihtiyacının karşılanmasının yanında çevre bilincinin korunması, verimliliğin artırılması, kaynak çeşitliliğinin ve sürekliliğinin sağlanması da son derece önemlidir. Enerji politikalarında düşünülmesi gereken temel unsur, teknolojik ve sosyal gelişmeyi destekleyecek şekilde enerji ihtiyacını karşılayan, güvenilir, kaliteli, temiz ve ekonomik enerji türlerine yönelmektir [1].

Petrol ve türevi enerji kaynaklarının azalması ve üretim maliyetlerindeki artışlar nedeniyle dünyanın birçok yerinde alternatif enerji kaynaklarına yönelme görülmektedir. Alternatif enerji kaynakları araştırılırken, yeni enerji kaynaklarının temiz enerji kaynağı olması yani çevreye duyarlılığı da ön plana çıkmaktadır. Motor yakıtlarının sınırlı olan petrol kaynaklarına dayanması gelecekte petrol kaynaklarına alternatif olacak yeni kaynakların bulunması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Bilindiği gibi içten yanmalı motorlarda alternatif enerji kaynağı olarak gaz veya sıvı yakıtlar kullanılmaktadır. Gaz yakıt olarak sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ve doğalgaz, sıvı yakıt olarak etanol, metanol, çeşitli bitkisel ve hayvansal yağlardan elde edilen biyodizel ile ilgili birçok araştırma yapılmaktadır. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak son yıllarda içten yanmalı motorlarda yakıt alanındaki gelişmişler hızla devam etmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar sonucunda, motorlarda pratik olarak en yüksek verimlere ulaşıldığı görülmüştür. Ancak, bu ilerlemeler motorun gelişimi için tüm olanaklar bitmiştir demek değildir. Daha iyi bir karışım, daha mükemmel bir yanma ile çevrim parametrelerinin yükseltilmesi olasıdır. Bunun sonucunda daha az yakıt tüketimi ve yüksek güç elde edilebilir. Ayrıca

yanmış gazların enerjilerinden faydalanarak ekonomikliğı arttırmak, bu çalışmalarla birlikte düşünülmesi gereken alanlar olmalıdır. Son zamanlarda yapılan çalışmaların büyük bir kısmının bu alana kaydığını gözlemlemek mümkündür. İçten yanmalı motorlarda yanma sonucunda oluşan ve kullanılamayan atık enerjinin geri kazanımı yeni teknolojileri de beraberinde getirmektedir. Kullanılacak bu teknolojinin motor sistemleri ile birlikte uyumlu çalışması gerekir [2].

İçten yanmalı motorlarda yakıt hava karışımı kullanılarak elde edilen enerjinin belirli bir yüzdesi faydalı işe dönüşmektedir. Oluşan bu verim değeri otomobil motorlarında %30-%35 arasındadır. Dolayısıyla üretilen enerjinin %65-%70'i kullanılmadan atılmaktadır. Üretilen enerjinin bir kısmı motorun soğutulmasına, bir kısmı egzoz gazına, geriye kalan bölüm ise radyasyonla çevreye atılmaktadır [3].



**Şekil 1.1.** Motorlarda üretilen enerjinin dağılımı

İçten yanmalı motorlardan yüksek verim ve çevreye olan zararlarının azaltılmasına yönelik isteklerin arttığı günümüzde kapsamlı araştırmalar hız kazanmıştır. Bunu gerçekleştirmek için motorun çalışması sırasında gerçekleşen olayların kontrolünün önemi artmıştır. Silindir içerisinde gerçekleşen yanma karakterinin motor performansı ve emisyonlar üzerinde önemli etkisi bulunduğu gibi atık ısı geri dönüşümü sistemleri üzerinde de etkisi son derece büyüktür [3].

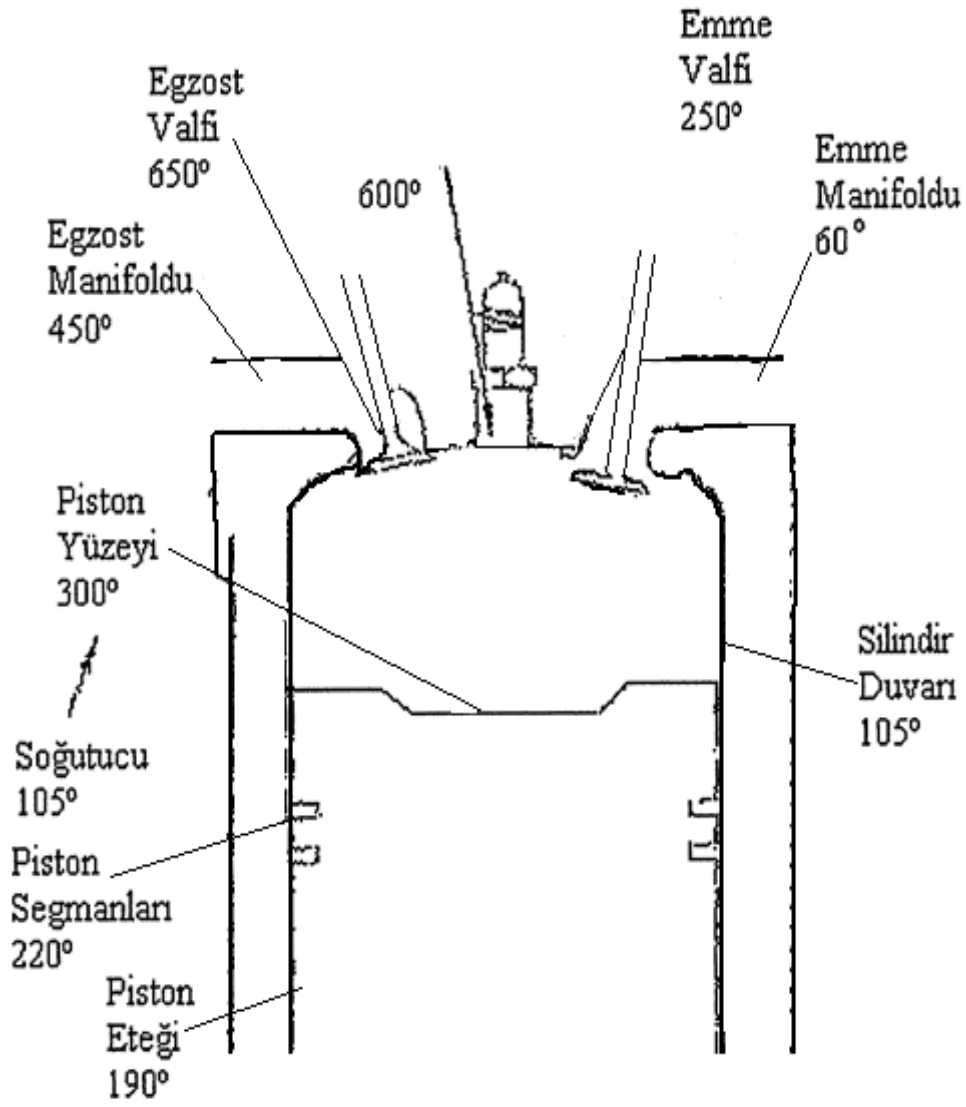
### **1.1. Motorlarda Yanma ve Egzoz İşlemi**

Yanma işlemi, yakıtın oksijenle birleştiği ve büyük miktarda enerjinin açığa çıktığı bir kimyasal reaksiyon durumudur. Yanma işleminde kimyasal reaksiyonlardan önce mevcut olan maddeler yanma işlemine giren maddeler, reaksiyondan sonra oluşan

maddelere de yanma sonu ürünleri adı verilir. Yanmanın başlaması için yakıtın tutuşma sıcaklığı değerine ulaşması gerekir ve her bir yakıt için bu değer farklılıklar göstermektedir. Ayrıca yanma işleminin başlayabilmesi için yakıt ve havanın uygun oranlarda bir arada bulunması gerekir. Kimyasal denklemlerde oluşan yanma işlemlerinde kütlemin korunumu ilkesi geçerlidir. Oluşan yanma reaksiyonları sürekli veya darbeli yanma şeklinde oluşur. Sürekli yanmada, yanma odasının yakıt ile havanın tutuşma sınırları içinde kalacak şekilde beslenmesi durumunda yanma işlemi kendi kendine devam eder. Pratikte sürekli yanmaya, darbeli yanmadan daha çok karşılaşılr. Motorlarda yakıtların yanması sonucunda elde edilen yüksek basınç ve sıcaklıktaki gazlar piston yüzeyine etki eder ve bu mekanizmayı harekete geçirir. İçten yanmalı motorlarda yanma, 0,002 - 0,004 saniye gibi çok kısa sürede gaz fazında gerçekleşen karmaşık fizikokimyasal süreçtir. Bu kısa sürede yanmanın oluşumu ve gelişimi için yakıt buharı ile havanın iyi bir karışıma sahip olması gerekmektedir. Yani karışımın homojen olması gerekir. Hava-yakıt karışımında her yakıt molekülünün etrafında gerekli sayıda oksijen molekülün bulunması durumuna homojen karışım denir. Söz konusu bu yanma işlemi sonucunda egzoz supabının belirli bir avans ile açılmasıyla egzoz süreci başlar ve bu süreç egzoz supabının gecikmeli kapanması ile sona erer. Egzoz gazlarının dış ortama akış şekline göre silindirleri boşaltmaları 3 farklı evrede gözlenir. İlk evre, belirli bir avans derecesinde açılan egzoz supabı ile başlar ve pistonun AÖN'ye gelmesi ile sona erer. Kritik hızdaki akışın etkisi ile egzoz sisteminde yüksek ses seviyeleri oluşur ve bu ses egzoz sisteminde kullanılan susturucular tarafından indirgenir. Birinci evrenin sonlarına doğru silindir içi basınç ile egzoz sistemi basıncı arasındaki oran kritik basıncın altına düşünce normal gaz akışı başlamış olur. Egzoz gazlarının yaklaşık %60-70'lık kısmı bu evrede dış ortama atılır. Bu evre AÖN 'de başlar ve ÜÖN'ye kadar devam eder. Üçüncü evre ise pistonun ÜÖN' de olduğu anda başlar ve egzoz supabının kapanması ile bu işlem sona ermiş olur [2,4].

Dizel motorlarda yanma farklı evrelerde incelenebilir. Bunları; tutuşma gecikmesi, kontrolsüz (anı) yanma, kontrollü yanma ve art yanma şeklinde sıralayabiliriz. Tutuşma gecikmesi safhasında silindir içerisinde sıkıştırılmış havaya püskürtülen yakıtın hava ile iyice karışması ve buharlaşması sağlanır. Krank açısına bağlı olarak belirgin bir basınç yükselmesi oluşur. Kontrolsüz yanma safhasında ilk safha sonunda yanabilecek hale gelmiş karışım artık silindir içerisine yayılmıştır ve ateşleme bir kaç noktadan başlamıştır. Bu andan itibaren alev çok yüksek bir hızla yayılır ve adeta bir patlama etkisi oluşturur. Bu yanma sonucu silindir içerisinde basınç aniden yükselir. Bu tip yanma bazen patlamalı

yanma şeklinde de adlandırılır. Bu safhada basıncının yükselme miktarı birinci safhada hazırlanan yanabilir karışımın miktarına bağlıdır. Tam yanma safhasında hala püskürtülen yakıt silindir içerisinde yer alan alev nedeniyle hemen yanar. Yanma bu safhada püskürtülen yakıtın miktarı ile kontrol edilir. Bu nedenle bu süreye kontrollü yanma süresi denir. Yanma sonrası safhasında yakıtın püskürtülmesi sona erer, fakat yakıtın yanması devam etmektedir. Eğer bu safha çok uzun olursa egzoz sıcaklığı artar ve verim düşer. Şekil 1.2’de içten yanmalı bir motorda meydana gelen sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde en yüksek sıcaklıklar enjektör ya da buji, egzoz valfi, portu ve piston yüzeyinde oluşmaktadır. Yüksek yanma sıcaklıklarına maruz kalan bölgeler sadece bu bölümler değildir. Egzoz gazlarının akış noktalarında yer alan valf ve port bölgelerinin soğutulması zor olan kısımlardır [5,6].



Şekil 1.2. Silindir içi sıcaklık dağılımları

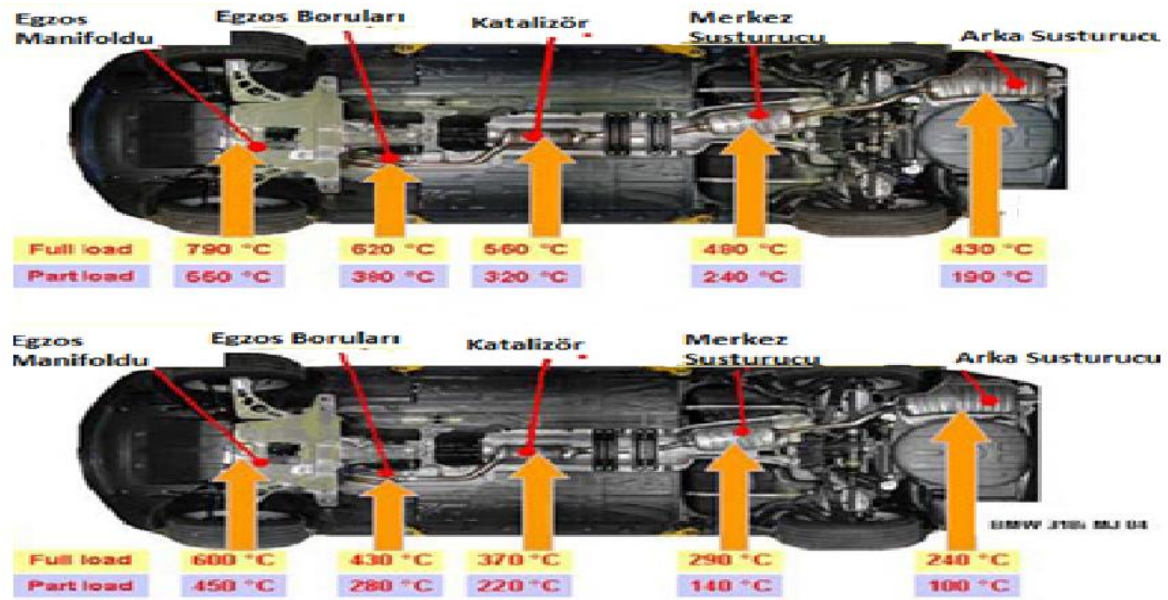
Yanma sonucunda oluşan egzoz gazlarının dış ortama atılması işlemi egzoz sistemi kısımlarının yardımıyla gerçekleşir. Motorlarda egzoz sistemi manifold, ön egzoz borusu, ara susturucu, merkez egzoz borusu, katalitik konvertör, kuyruk egzoz borusu ve ana susturucu gibi parçalardan oluşmaktadır. Bu sistem atık ısının tahliyesini, kirleticilerin azaltılmasını ve egzoz gazlarının gürültüsünün azaltılmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu çalışmamızda gerçekleştirilen TEJ sisteminin egzoz sistemi üzerine kurulması ile enerjinin geri kazanımı görevi de sağlanmış olunacaktır. İçten yanmalı motorlar için tasarlanan termoelektrik jeneratör sisteminin üretebileceği elektrik enerji kapasitesi egzoz gazlarının

sıcaklığına, debisine ve özgül ısısına yani egzoz gazının ısıl kapasitesine bağlı olduğu için yanma odası içindeki sıcaklık değerleri oldukça önemlidir.

Egzoz manifoldu, silindir içerisinde meydana gelen yanmış gazların dış ortama atılmasını sağlamaktadır. Atık gazların hızlı bir şekilde atılması için manifold tasarımı son derece önemlidir. Egzoz gazlarının geri basınç oluşturmada silindirden uzaklaştırılması için dışa doğru geniş bir şekilde imal edilmelidir. Yanmış gazların atılması ne kadar kolay gerçekleşirse, motor o kadar performanslı çalışır. Otomobil üreticileri egzoz sistemini, hem egzoz gürültüsünü azaltmak ve hem de performansı bir arada sunabilmek amacıyla geliştirirler. Manifoldlar genellikle dökme demir, alüminyum alaşım veya çelik borulardan bükülerek yapılırlar. Amyant üzerine çelik, bakır ve sac kaplamak suretiyle yapılan contalar ile sızdırmazlık sağlarlar. Egzoz boruları, yanmış gazların önce manifoldda, sonra egzoz borusunda hacim genişlemesiyle beraber bir miktar soğutulmasıyla atmosfere atılmasını sağlar. Ön, merkez ve kuyruk egzoz borusu olmak üzere üç bölümden oluşur. Egzoz borusunun hacmi motorun bir silindirinin hacminin 2 katı kadardır. Egzoz boruları paslanmaz çelik üzerine tuz ve asitlere dayanıklı alüminyum kaplanarak üretilmektedir. Motorlarda yanma sonucu meydana gelen egzoz gazlarının gürültüsünü azaltmak, aracın hacimsel verimini arttırmak ve çıkan gazların soğutulmasını sağlamak için susturucular kullanılmaktadır. Paslanmaz çelikten ve paslanmaya karşı dayanıklı malzemelerden imal edilen susturucular, minimum ses çıkışı ve maksimum performans dengesi düşünülerek üretilirler. Egzoz sisteminde yer alan bir başka parça ise katalitik konvertörlerdir. Tam olarak yanmamış hidrokarbonlara ikinci bir yanma ve kirletici gazlara bir indirgenme ortamı sağlamaktır. Bu yanma ve indirgenme birtakım katalizörler (platin, palladyum ya da rodyum) kullanılarak yapılır. Seramik veya çelik petekten yapılan iç kısım bu maddeler ile kaplıdır. Bu parçalar zararlı egzoz emisyonların atmosfere bırakılmadan önce kimyasal olarak temizlenmesini sağlarlar. İkinci yanma işlemi motor dışında gerçekleştiğinden dolayı bu işlemle dönüştürülebilir enerji elde edilmez [7].

Egzoz gazlarının dış ortama atılmasına yardımcı olan egzoz sistemi parçaları egzoz çıkışı sırasında birtakım hidrodinamik basınç kayıplarını meydana getirirler. Egzoz sistemi içerisinde oluşan basınç kayıplarını egzoz supabı kesit alanı direncinin yarattığı basınç kaybı, egzoz kanalı ve egzoz manifoldu direncinin etkisi ile oluşan basınç kaybı, egzoz borusu, katalitik konvertör ve susturucu gibi egzoz sistem elemanlarının direnç etkisi egzoz sistemlerinde oluşan basınç kayıpları şeklinde sıralayabiliriz. Egzoz sistemin hidrodinamik basınç kaybının artması beraberinde volümetrik verim değerinde azalma, art gaz

katsayısında artma ve yanma veriminde azalmaları getirir. Yanma veriminin azalması ile motor gücünde azalma ve beraberinde yakıt sarfıyatı değerlerinde artışlar oluşmaktadır. Bu nedenle egzoz sisteminin hidrodinamik basınç kaybının mümkün olduğu kadar düşük ve akmakta olan egzoz gazın akış ataletini de azaltmayacak şekilde dizayn edilmesi gereklidir. Bu durumda silindirde bir önceki çevrimden kalan egzoz gazı miktarı minimum olacaktır [2]. Yukarıda sözü edilen egzoz sistemi parçalarının sıcaklık dağılımları motorun çalışma şartlarına göre değişkenlik göstermektedir. Dizel ve benzinli motorların sahip oldukları egzoz gazı sıcaklık dağılımları Şekil 1.3’de gösterilmiştir. Motor yük ve çalışma şartlarına göre değişkenlik gösterebilen egzoz gaz sıcaklık değerlerinin iyi bilinmesi ve tespit edilmesi gerekir. Tasarlanan TEJ sistemleri için en uygun çalışabileceği sıcaklık aralığı belirlenerek jeneratörün taşıta bağlanacağı kısım büyük önem taşır [8].



Şekil 1.3. Benzinli (üst) ve Dizel (alt) motorları için egzoz gazları bileşenlerinin sıcaklık dağılımları

Egzoz gazlarının sahip olduğu bu sıcaklık değerleri önemli bir potansiyeldir. Bu nedenle enerjinin geri kazanımı alanındaki çalışmalar her geçen gün büyük önem kazanmaktadır. Çünkü teknolojinin ilerlemesi ve tüketicilerden gelen taleplere bağlı olarak araçlarda konfor gün geçtikçe artmaktadır. Artan konfora paralel olarak araçlarda enerji tüketimi de artmaktadır. Soğutma ve ısıtma sistemleri, elektrikli camlar, yol bilgisayarı, radyo, açılabilir tavan, sensör ve güvenli sürüş elektronik donanımları ve daha birçok bileşen elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Bu artış beraberinde taşıt alternatörünün

elektrik üretim kapasitesini de arttırmaktadır. Bu nedenle taşıtlarda alternatif elektrik enerjisi üretimi bu artışı az da olsa karşılayabilecek nitelikte olmalıdır [9].

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, atık ısı enerjinin dönüşümünü yapabilecek sistem ve ekipmanlar üzerinde yoğunlaşıldığı görülmektedir. Elektrik ihtiyacını karşılayabilmek için atık ısıdan faydalanma yöntemi de alternatif bir çözüm olarak karşımıza çıkar. Son yıllarda bu konuda yapılan çalışmalar da bunun bir ispatı niteliğindedir. Egzoz sistemine dayalı bir sistem kurulması halinde enerjinin sürekliliği sağlanacak ve çevresel boyutta sera gazı salınımları azaltılacaktır. Elektrik enerjisinin depo edilme sorunu ve akü sistemlerinin araç üzerinde yarattığı ekstra yükler yakıt tüketimini arttırmaktadır. Bu nedenle enerjinin araç üzerinde daha hafif elemanlar ile üretimi gereksiz yüklerden kaçınılmasını ve fosil yakıtların daha az kullanılmasını sağlayacaktır. Termoelektrik jeneratör sistemi, egzoz gazlarının ısısından ürettiği elektrik ile alternatör tarafından üretilen elektrik gücünün önemli bir bölümünü karşılaması noktasında önemli bir etkiye sahip olabilir [10].

## **1.2. Elektrik Enerjisi Dönüşüm Sistemleri**

Elektrik enerjisinin akümülatörlerde veya kondansatörlerde depo etme olanağı bulunmasının dışında, genel anlamda depo edilemeyen bir enerji türü olduğu bilinmektedir. Yani elektrik enerjisinin üretildiği anda kullanılma zorunluluğu vardır. Bu anlamda üretim ile tüketim arasında devamlı şekilde bir dengenin bulunması gerekir. Elektrik enerjisi üretmek için çeşitli yöntemler vardır. Bunlar; basınç etkisi, ışık enerjisi, ısı enerjisi, kimyasal etki ve manyetik etki ile elektrik üretme yöntemleri olarak bilinir [11].

Yenilenebilir enerji sistemlerinde doğadan alınan enerjinin kayıpsız bir şekilde yararlı işe dönüştürülebilmesi gerekir. Bu dönüşüm oranları bazı sistemlerde termodinamik, bazı sistemlerde elektrokimyasal sınırlarla belirlenmiştir. Bunların yanında sistemler arasında dönüşümler ve dağıtım işlemleri sırasında empedans kaynaklarının da devreye girmesiyle enerjinin kullanılabilirliği azalmaktadır. Doğrudan enerji dönüşümü yapan teknolojilerle kayıplar azaltılmaya çalışılmaktadır. Doğrudan enerji dönüşüm sistemlerinden biri olan güneş panelleri çoğu kişi tarafında bilinmekte ve son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş pilleri ile termoelektrik yapıların dönüştürdükleri enerji formları birbirlerinden farklı olmalarına rağmen temelde iki sistem de yarı iletken malzemeden üretilmektedir. Tarihsel olarak incelendiğinde iki teknoloji de ilk olarak uzay araçlarında kullanıldığı görülmektedir. Güneş panelleri üzerine yapılan çalışmalar ve seri

Üretim ile güneş enerjisinden yararlanma yaygınlaşmış fakat termoelektrik yapılar bu gelişimin gerisinde kalmıştır. Son zamanlarda termoelektrik tabanlı enerji sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda hız kazanmış ve verim değerleri iyileşmeye başlamıştır [12].

### **1.2.1. Elektromanyetik İndüksiyon**

Günümüzde kullandığımız bütün elektrikli aletlerin temel çalışma prensibi 1791-1867 yılları arasında yaşamış olan Michael Faraday'ın buluşlarına dayanmaktadır. Jeneratörler, elektromanyetik indüksiyon ilkesine göre çalışan ve elektrik enerjisi üretmek için kullanılan aygıtlardır. Jeneratörlerin alışma prensibi aslında sanıldığı kadar karmaşık değildir. Bir manyetik alan ve bu manyetik alanlar arasında hareket eden bobin telleri basit bir jeneratör yapmak için yeterlidir. Bir jeneratör alternatif akım enerjisi üretecek şekilde tasarlanırsa alternatif akım jeneratörü (alternatör) ve doğru akım enerjisi üretirse doğru akım jeneratörü (dinamo) olarak adlandırılır. Her iki tip jeneratör de bobin tellerinden geçen manyetik akının değişmesi ile bobinde bir elektro motor kuvvetin indüklenmesi ile çalışırlar [13].

Günlük yaşantımızda kullandığımız araba, otobüs, tramvay, metro, uçak, gibi ulaşım araçlarının çalışmasında gerekli olan elektrik enerjisi manyetik etki yardımıyla sağlanır [19].

#### **1.2.1.1. Sarj Dinamoları**

Michael Faraday'ın yaptđđ çalışmalar sonucunda manyetik etki ile elektrik akımı elde edilebileceği keşfedilmiştir. Otomobil sistemlerinde elektrik enerjisine duyulan ihtiyaçtan dolayı dinamolar otomobillere sarj sistemi olarak yerleşmişlerdir. Otomobil sistemleri ile beraber gelişen sarj sistemleri  firalı dinamolar ve daha sonra iki firalı şönt dinamolar olarak kullanılmıştır. Dinamolar sabit bir manyetik alan içerisinde hareket ettirilen bir iletkende indüklenen akım prensibi ile çalışır. Dinamo verimi manyetik alan kuvvetine, iletkenin manyetik kuvvet hatlarını kesme hızına, endüvinin her bobinindeki iletken sayısına bağlıdır. İçten yanmalı motorlarda zaman içerisinde elektrikli cihazların sayıları artmış ve beraberinde elektrik ihtiyaı da fazlalaşmıştır. Ayrıca motorlu araç sayısının artması ile şehir içi trafiğindeki yavaşlamalar dinamoların düşük hızlarında yetersiz kalmasına neden olmuştur. Bu gibi nedenlerden dolayı günümüzde dinamolar yerine alternatörler kullanılmaktadır.

Alternatörlerin çalışma prensibi tıpkı dinamolarda olduğu gibi benzer prensip üzerine kurulmuştur. Alternatörlü şarj sistemlerinde kontak açıldığı anda bataryadan gelen akım regülatör üzerinden alternatör uyarım sargılarına gelir ve oradan da şasiye gider. Bu olay başlangıç da güçlü bir manyetik alan oluşturduğundan dolayı şarj dinamolarına kıyasla daha fazla akım meydana getirir. Ayrıca bu olay sayesinde alternatörler daha düşük devirlerde de akım üretirler. Üretilen alternatörlerin şarj dinamolarına kıyasla daha hafif ve dayanıklı olması nedeniyle kasnak çapları daha küçük olup devirleri yüksek tutulur.

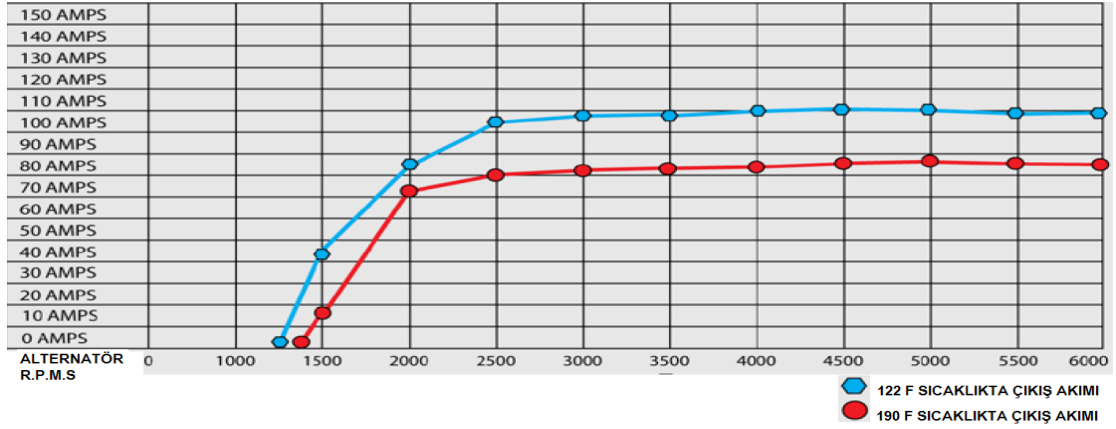
#### 1.2.1.2. Alternatör

Günümüz araçlarında elektrik üretim işini alternatörler almıştır. Alternatör motordan gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Mekanik enerji motordan bir kasnak vasıtasıyla alınır ve rotor döndürülerek, stator sargılarında alternatif akım üretilmesi sağlanır. Bu alternatif akım diyotlar tarafından doğru akıma çevrilerek bataryaya gönderilir. Şekil 1.4’de klasik tip alternatör görülmektedir [13].



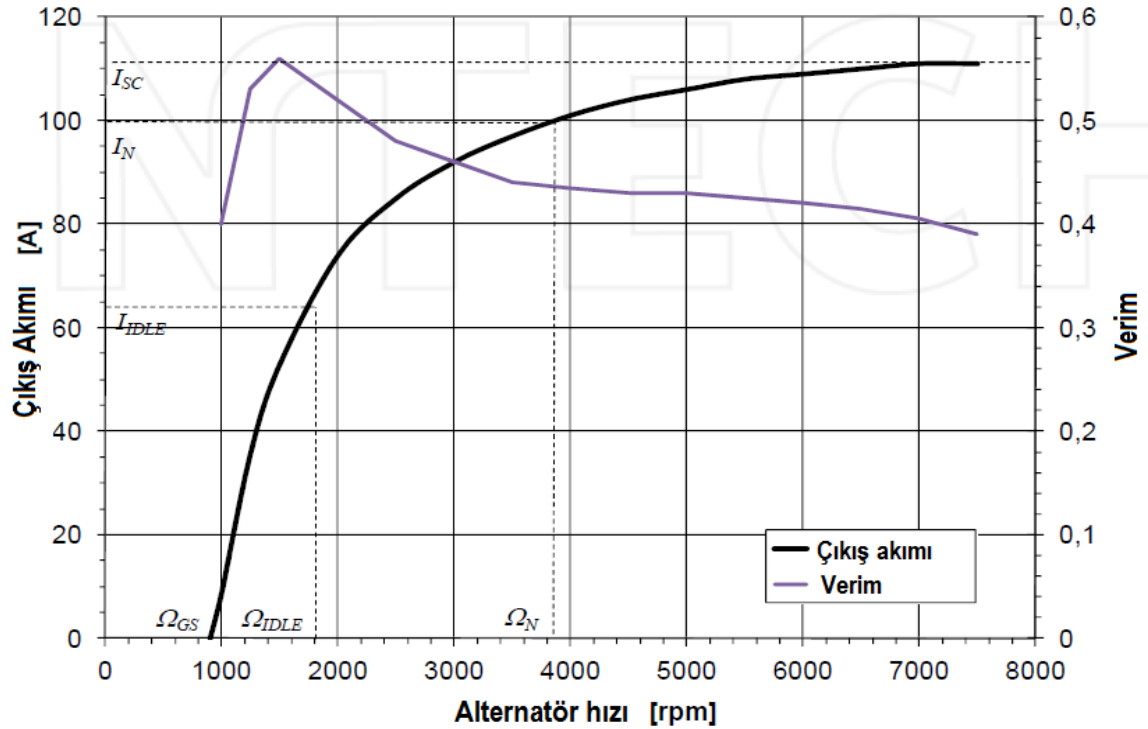
Şekil 1.4. Klasik tip alternatör

70A-12V ile 150A-12V değerleri arasında piyasada ticari olarak satışı yapılan birçok alternatör modeline rastlamak mümkündür. Bu kapasitelerinin dışında motorda farklı çalışma şartlarında farklı reaksiyonlar verirler. Örneğin değişen devir aralıklarına göre 100A-12 V maksimum kapasitede elektrik üreten bir alternatörün oluşturduğu akım değerleri Şekil 1.5’de gösterilmektedir [14].



Şekil 1.5. Alternatör devir-akım ilişkisi

Alternatör çıkış gücü regülatör tarafından kontrol edilir. Regülatör alternatör yük ve hız durumlarından ziyade bataryanın çıkış voltajını temel alır. Bu voltaj değerine göre bataryanın sürekli şarjlı kalması sağlanır. Ancak alternatörün bu işlemleri yaparken belirli bir verim aralığında çalıştığını da unutmamak gerekir. Şekil 1.6'da farklı devir aralıklarında çalışan alternatörün performans eğrileri yer almaktadır. Alternatör verimliliği yük, hız ve alternatör büyüklüklerine göre değişiklik gösterir. Rölanti devrinde genel olarak araç alternatörleri yaklaşık %50 verimlerde çalışırlar. Devir sayısının artması ile kayıpların beraberinde yükselmesi verimin düşmesine neden olmaktadır [14].



Şekil 1.6. Alternatör karakteristik eğrisi

Alternatörlerde verimin düşmesine farklı etkenler neden olabilir. Araçlarda kullanılan bu tip alternatörlerde genellikle mekanik, manyetik ve bakır kayıpları yaşarlar. Tablo 1.1’de farklı çalışma devirleri için meydana gelen kayıp yüzdeleri gösterilmektedir.

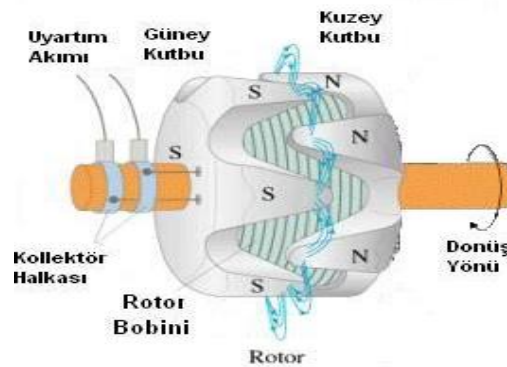
**Tablo 1.1.** Alternatörde oluşan kayıp yüzdeleri [15].

|                                  | <b>1800 RPM</b> | <b>6000 RPM</b> |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Mekanik kayıplar</b>          | %2              | %6              |
| <b>Uyartım kayıplar (Rotor)</b>  | %7              | %3              |
| <b>Manyetik Kayıplar(Statör)</b> | %21             | %20             |
| <b>Bakır kayıplar(Statör)</b>    | %49             | %57             |
| <b>Güç Redresör Kayıpları</b>    | %21             | %14             |

Alternatörleri genel yapılarına göre klasik tip alternatörler, kompakt alternatörler, pençe tipi alternatörler ve yuvarlak tip rotoru olan alternatörler şeklinde ayırmak mümkündür. Alternatörler mıknatıslanmayı oluşturan rotor, elektrik akımı üreten statör ve akımı doğrultan diyotlardan oluşmaktadır. Bu parçalara ek olarak manyetik alanın oluşturulması için rotora akım geçiren fırçalar, rotorun yumuşak bir şekilde dönmesini sağlayan rulmanlar ve rotor, statör ile diyotları soğutmak için bir fan bulunmaktadır. Tüm bu parçalar ön ve arka kapak tarafından birleştirilir.

#### 1.2.1.2.1. Rotor

Rotor, manyetik kutuplar (N-S kutupları), bir manyetik alan (rotor) bobini, kolektör halkalarından ve bir rotor milinden meydana gelmiştir.

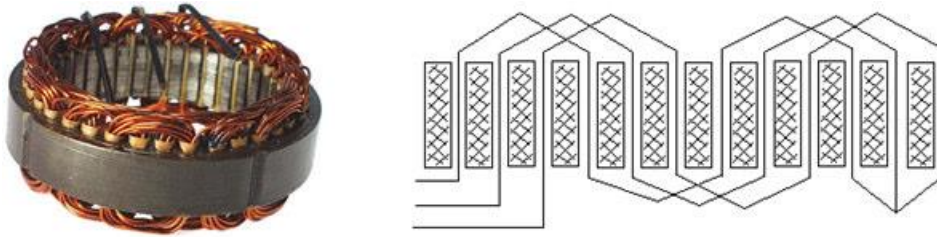


**Şekil 1.7.** Rotorun yapısı ve görünümü

Manyetik alan bobini, dönme yönüyle aynı yönde sarılmıştır ve bobinin her iki ucu bir kayar bileziğe bağlanmıştır. Bobinin her iki ucuna manyetik alan bobinini kuşatacak şekilde kutup çekirdeği bağlanmıştır. Manyetik alan, akımın bobin üzerinden geçmesiyle ve kutuplardan birinin N kutbu, diğerinin S kutbu olmasıyla oluşturulmaktadır. Kayar bilezikler, kömür temas yüzeyleri yüksek kalitede islenmiş, paslanmaz çelik gibi metallerden yapılırlar. Bunlar rotor milinden yalıtılmaktadır [13,16].

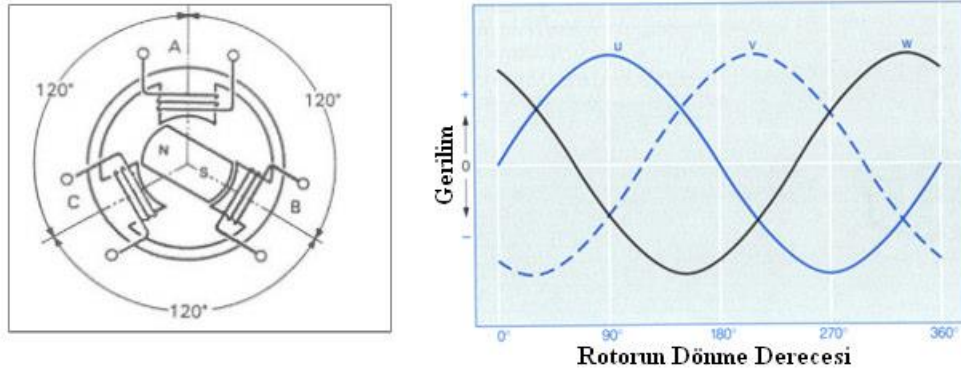
#### 1.2.1.2.2. Statör

Bu yapı stator çekirdekleri ve stator bobinlerinden meydana gelmiştir. Statorun yapısında çok uzun iletken bobin oluşturmak için kanallar kullanılır. Ayrıca üç adet statör sargısı mevcuttur. Her bir sargıya bir faz denir. Alternatörlerin üç fazlı yapılmasının sebebi, çıkış akımını yükseltmek ve çalışma sırasında meydana gelebilecek akım değişimlerini azaltmaktır. Bunlar birbirinden  $120^\circ$  açı farkıyla çalışırlar. Sargı tekniğine uygun olarak iletken tel üçer grup atlayarak seri şekilde bağlanmıştır. Diğer iki sargı da aynı şekilde bağlanarak bunların en son uçları bir birine bağlanır ve yıldız bağlantı oluştururlar. Her bir sargıda oluşan gerilim alternatörün ürettiği fazlar arası gerilimin  $1/3$  ü kadardır.



Şekil 1.8. Statorun yapısı ve stator sargıları

Mıknatıs, bunların arasında döndüğü zaman her fazda alternatif akım üretilir. Faz akımlarını kullanmaya uygun hale getirmek için sargılar arasında yıldız ve üçgen bağlantı olarak isimlendirilen iç bağlantılar yapılır [13,16].



Şekil 1.9. Üç fazlı alternatif akım

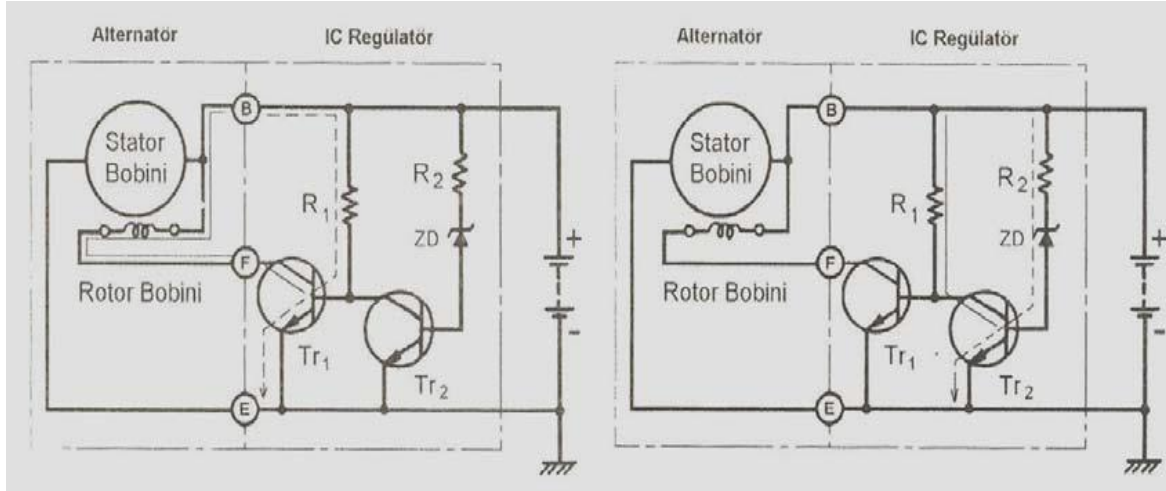
#### 1.2.1.2.3. Diyotlar

Diyotlar, yalnızca bir yönde akım geçiren elektrik devresi elemanlarıdır. Alternatörlerde alternatif akımın doğrultulması için altılı diyot köprüsü kullanılır. Diyotun uçları pozitif (+) ve negatif (-) işaretleri ile belirlenir. "+" ucu anot, "-" ucu katot olarak adlandırılır. Diyotun anoduna, gerilim kaynağının pozitif (+) kutbu, katoduna kaynağın negatif (-) kutbu gelecek şekilde gerilim uygulandığında diyot iletme geçer. Diyotlardan, elektrik alanında redresör (doğrultucu), elektronikte ise; doğrultucu, detektör, modülatör, limitör, anahtar olarak çeşitli amaçlar için yararlanılmaktadır. Diyotlar başlıca lamba diyotlar, metal diyotlar, yarı iletken diyotlar olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Alternatörlerde eş yüklü diyot tablaları içinde, üç adet pozitif ve üç adet negatif diyot bulunur. Alternatör tarafından üretilen akım, uç kapaklardan yalıtılmış pozitif yönlü diyot tablalarından verilir. Doğrultma sırasında diyotlar ısınırlar, diyot tablaları bu ısıyı yayacak ve diyotların aşırı ısınmasını önleyecek şekilde tasarlanabilirler. Alternatör tarafından oluşturulan üç fazlı alternatif akım, taşıtın aküsünde depolanamaz; ayrıca elektronik parçaların ve elektronik kontrol birimlerine güç sağlamada da kullanılamaz. Bunun için, önce akım doğru akıma çevrilmelidir [13,16].

#### 1.2.1.2.4. Regülatör

Motor devrine paralel olarak artan ya da azalan alternatörlerin devri ile beraber gerilim değerleri de sürekli değişmektedir. Alternatörün ürettiği gerilim değerleri sınırlanmazsa hem alternatör hem de beslediği alıcıları bundan zarar görebilir. Bu nedenle oluşan akım ve voltaj değerlerinin mutlaka kontrol altında tutulması gerekir. Bu kontrol ünitesine regülatör adı verilir. Temel görevi şarj gerilimini belirli bir seviyede sınırlayarak sistemdeki alıcıları yüksek gerilimlerden korumaktır. Regülatörün görevi rotor bobinine

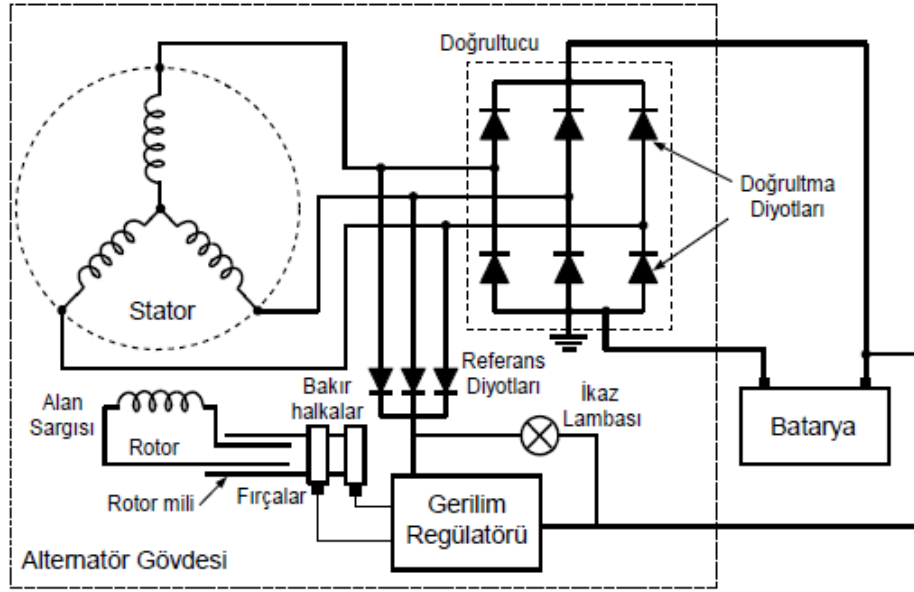
giden ikaz akımını değişen devir aralığına göre açıp kapamak veya zayıflatmak suretiyle rotorda oluşan manyetik alan şiddetini değiştirerek gerilimi sabitlemektir [17].



Şekil 1.10. IC regülâtörün prensip şeması

IC regülâtörün devre şemasında terminal B deki çıkış voltajı düşük olduğunda, akü voltajı  $R_1$  direnci üzerinden  $Tr_1$  beyz ucuna uygulanır ve  $Tr_1$  geçerek rotor sargılarında gelen akımı şasiye iletir. Rotor üzerinden gelen manyetik alan akımı şu sıra ile şasiye akar. Terminal B'deki çıkış voltajı yüksek olduğunda  $R_2$  direnci üzerinden zener diyotuna uygulanan akımın voltajı büyüktür. Akım zenerden ters yönde akmak ister, gelen voltaj zener diyotunun ters yönde iletme voltajından daha büyük olduğu için zener, akımı  $Tr_2$ 'nin beyzine iletir.  $Tr_2$  iletme geçince  $Tr_1$ 'in beyz ucundaki voltajı 0,6 V'un altına düştüğü için  $Tr_1$  rotor sargılarından akan akımın akışını keser. Böylece rotorda manyetik alan oluşmayacağı için faz sargılarında da akım indüklenmez ve alternatörün çıkış akımı düşer.  $Tr_1$  ve  $Tr_2$  transistörleri bu şekilde sürekli açılıp kapanarak rotor sargılarından geçen akımı kontrol etmiş olur. Bu olay rotorun manyetik alan şiddetini belirler ve rotordan akan akım miktarı da transistorlerin açılıp kapanma sıklığına bağlıdır. Bu yolla alternatörün ihtiyaca göre akım üretmesi sağlanmış olur.

Alternatör gerilimini yük durumuna göre ayarlayan düzeneklere gerilim regülâtörleri denir. Regülâtörün çalışma prensibi alternatörün uyartımını sağlayan uyartım dinamosunun kutup sargılarına seri olarak bir direncin girip çıkması şeklindedir [16]. Alternatörün çıkışı diyotlarla doğrultularak sisteme uygulanmaktadır. Aynı zamanda bu çıkış regülâtöre uygulanarak rotor sargısına uygulanacak gerilime karar verilmektedir.



Şekil 1.11. Taşıtlardaki en temel alternatör ve şarj sistemi

Alternatör tarafından üretilen gerilim regülatör olmaksızın çok yüksek değerde olmaktadır. Bu yüksek gerilim akünün aşırı şarj olmasına ve sistemdeki arızalara neden olur. Regülatör, şarj sisteminde akünün aşırı şarj olmasını veya şarjsız kalmasını önlemek için gerekli gerilim ayarlamalarını yapar. Rotor sargısındaki akımın değişmesi yaklaşık 100 milisaniye ve daha fazla zaman almaktadır. Bu süre yüksek stator kayıplarına neden olmaktadır. Dolayısıyla alternatörün verimini ve çıkış gücüne etki etmektedir. Otomobillerde kullanılan alternatörler aracın motoru çalışırken aküyü şarj eder ve diğer tüm elektrik sistemlerine enerji sağlar. Alternatörler, doğru akım elde etmek için gereken çeviriciye sahip olmadıklarından doğru akım üreteçlerine göre daha basit, hafif ve dayanıklıdır. Bu dayanıklılıkları sayesinde daha yüksek hızlarda çalışabilirler, böylece otomobillerdeki alternatörler motor hızının iki katı hızda dönebilir, bu da alternatörün çıkış gücünü artırır [16,18].

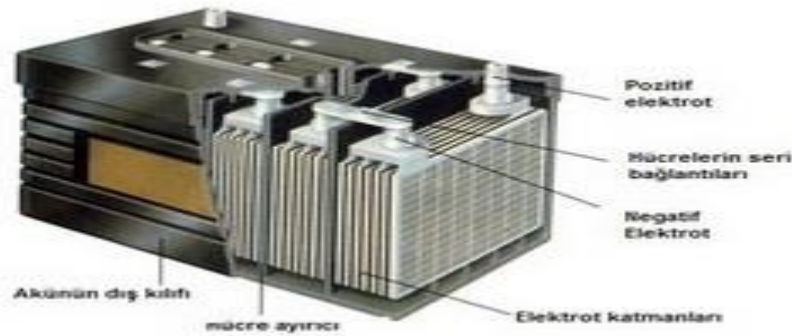
### 1.2.1.3. Elektrik Enerjisinin Depolanması

Günlük hayatımızda sıkça kullandığımız piller ve aküler kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Pil ve akülerde elektrik enerjisinin depolanması kimyasal yöntemlerle yapılmaktadır.

Aküler, verilen elektrik enerjisini içyapısında oluşturduğu değişim ile kimyasal enerji olarak depolar. Taşıt sistemlerinde elektrik enerjisine ihtiyaç duyulduğu anda kimyasal yapı değişikliği tekrardan oluşur ve elektrik enerjisi alınmaya başlanır. Kurşun

asitli aküler elektrot ve elektrolit adı verilen iki ana unsurdan oluşurlar. Elektrolit sulandırılmış sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) karışımları, elektrot ise kurşun ve bileşikleridir. Elektrotların kapasite ve büyüklükleri akünün oluşturduğu voltaj değerini değiştirmez. Her bir bölme 2V elektrik voltajı üretir. Bu nedenle değişik voltajlarda akü yapılmak istense değişen bölme sayısı olacaktır. Araç aküleri 6V ya da 12V değerlerine sahiptirler.

Plakalarda iskelet görevini üstlenen kurşun ızgaraların alaşımları ve dökümleri oluşan akımın toplanmasını ve aktif maddenin üzerinde tutunmasını sağlar. Önemli bir alaşım elementi olan antimon, döküm kolaylıkları yanında kullanım sürecinde de önemli ölçüde mekanik ve kimyasal dayanıklılık verir [20].



Şekil 1.12. Akünün iç yapısı

Tam şarjlı bir aküde pozitif plakalar kurşun dioksit ( $PbO_2$ ), negatif plakalar üzerinde ise süngerimsi kurşun aktif maddelerdir. Formasyon denilen uzun bir şarj ile pozitif plaka üzerindeki aktif madde kurşun dioksit haline dönüşür. Bu dönüşüm ile pozitif plaka akım vermeye hazır hale gelir. Akülerde genellikle önce yıpranan eleman pozitif elektrottur. Pozitif elemanın negatif elemana göre erken yıpranmasının nedeni oksidasyon reaksiyonu ile çalışan plaka oluşudur. Pozitif ve negatif plakaların birbirine değerek kısa devre yapmasını önlemek için aralara konan levha şeklindeki parçalara seperatör denir. PVC (Polivinil klorür), kâğıt, kauçuk, cam elyafı gibi değişik malzemelerden olan seperatörler vardır. Elektrolit yoğunluğu çalışma hızını etkileyen parametrelerin başında gelmektedir. Yüksek elektron yoğunluğu daha yüksek ve hızlı çalışma sağlarken, düşük elektrolit yoğunluğu ise volt ve marş basma gücünün düşmesine neden olur. Türkiye'nin iklim koşullarına uygun olan elektrolit yoğunluğu  $1.26 - 1.28 \text{ g/cm}^3$  arasındadır. Aşağıdaki denklemlerde akü içerisinde oluşan bir takım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır.

Deşarj sırasında (+) kutupta oluşan reaksiyon:



Deşarj esnasında (-) kutupta oluşan reaksiyon:



Her iki kutupta da sülfürik asit harcamasına bağlı olarak kurşun sülfat oluşumu gözlenmektedir. Bu reaksiyonlar soncunda su oluşumu meydana gelmektedir. Yukarıda yer alan reaksiyonların tersi akünün şarjı anlamına gelmektedir. Ancak şarj için elektrik geriliminin akü geriliminin üzerinde bir voltaj ile dışarıdan ters yönde uygulanması gerekir.

Şarj işleminde;



Deşarj işleminde



Bu reaksiyonlarda da görüldüğü gibi kurşun asitli akülerde oluşan gerilim büyük ölçüde sülfürik asit konsantrasyonuna bağlıdır.

Günümüzdeki kurşun-asit bataryalarında kullanılan kurşun ızgaraların mekanik ve kimyasal dayanıklılığını arttırmak için kurşun içerisine eklenen antimonun yerini kalsiyum almıştır. Antimon bataryanın çalışması sırasında gaz oluşumunu hızlandırır ve aşırı su kaybına neden olur. Bu nedenle bu bataryalar sürekli bakım gerektirir. Antimonun bu

olumsuz etkisini gidermek için ızgaralara antimon yerine kalsiyum eklenir. Kalsiyumun avantajı normal şarj voltajlarında gaz oluşumunu %75 oranında azaltmış olmasıdır. Bu nedenle normal çalışma ömürlerinde su ilavesine gerek duymazlar [19,20,21].

#### **1.2.1.3.1. Akü Şarj Etme Metotları**

Aküler için farklı şarj etme yöntemleri bulunur. Uzun süre kullanılmayan akülerin plakalarında sülfatlaşma oluşmaktadır. Sülfatlaşma sonucu sertleşen plakaları çözmek için yavaş şarj uygulanır. Akü bir alıcıya bağlanarak tamamen boşaltılır. Akünün içindeki elektrolit boşaltılır ve saf su konulur. Akü 0,5-1 A bir akımla 60-100 saat arasında şarj edilir. Şarj süresi bitiminde uygun yoğunlukta elektrolit ilave edilerek şarj işlemi tamamlanmış olunur.

Araç, akünün bitmesi nedeniyle çalışmıyorsa normal şarj işlemine tabi tutulur. Normal şarj cihazları sabit akımla şarj ettiklerinden dolayı birçok akü seri bağlanarak aynı anda şarj edilebilir. Şarj akımı akü kapasitesinin 1 / 10 ile 1 / 20 si arasında seçilir. (Örnek: Anma kapasitesi 60 amper-saat (Ah) olan aküde şarj akımı 3 – 6 amper arasında olmalıdır.)

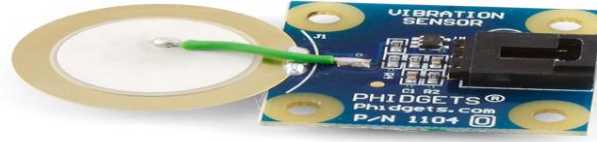
Bir başka akü işlemi olan çabuk şarj amacı deşarj olmuş aküyü kısa zamanda marşa basacak şekle getirmektir. Sülfatlaşmış, kısa devreli, eski ve aktif maddesi gevşemiş aküler çabuk şarj edilmemelidir. Sık sık çabuk şarj uygulanan bataryaların ömrü azalır. Çabuk şarjda, şarj akımı 12 V'lik aküler için 25-50 A arasındadır. Bütün akülerde 15-20 dakika uygulanması gereken bir işlemdir. Çabuk şarj işleminde toz kapakları açılmalıdır.

Ayrıca akülerin Araç üzerindeki şarjı alternatör ve regülatörden meydana gelen şarj sistemi ile yapılır. Araç üzerindeki şarj işlemi, sabit voltajla yapılan işlemdir. Şarj voltaj değeri 13.8 V ile 14.2 V değerleri arasında olmalıdır [21].

#### **1.2.2. Basınç Etkisi ile Elektrik Enerjisinin Elde Edilmesi**

Kristal yapılı bazı malzemeler mekanik basınç etkisi altına bırakıldığı zaman, elektrik yük akışı meydana getirirler. Malzemenin iki yüzünde farklı işaretli yükler oluşur. Zıt işaretli yük birikimi potansiyel fark yani voltaj demektir. Bu yöntemle voltaj elde etmeye işlemine piezoelektrik olay denir. Doğal olarak bunun tersi de gerçekleşebilir. Piezoelektrik olay, Jacques ve Pierre Curie kardeşler tarafından 1880 yılında keşfedilmiştir. Kristal mikrofonlar, quartz saatler burada bahsedilen basınç etkisi ile elektrik akımı elde etme prensibine göre çalışır. Bu olayın günlük yaşamımızdaki diğer bir uygulaması olarak otomobillerdeki hava yastıklarının sensörleri verilebilir. Bu sensörlerde

kullanılan piezoelektrik malzeme, çarpma sonucu oluşan şok dalgasını algılayarak hava yastığının açılmasını sağlayan bir elektriksel sinyal üretir. Yine, içten yanmalı motorlarda kullanılan vuruntu sensörü de motorun çalışması esnasında piezo kristallerin titreşimi sonucunda oluşan gerilimi sayesinde motordaki vuruntuyu tespit eder. Vuruntu sensörü daha sonra, vuruntunun şiddeti ile artan bir alternatif akım voltajı üretecektir. Vuruntu sensörü içerisindeki şönt rezistans, elektronik kontrolün 5 V'nin aşağı çekilmesine neden olur, böylece yaklaşık 2.5 V ölçüm değeri verecektir. Vuruntu sensörü 2.5 V'lik direkt akım voltajında taşınan bir alternatif akım sinyali üretir. Bu alternatif akım voltajı filtre ünitesine gönderir. Ardından filtre ünitesi, vuruntuyu azaltmak için elektronik ateşleme avansını ayarlar [22].



Şekil 1.13. Piezoelektrik algılayıcı

### 1.2.3. Işık Etkisi ile Elektrik Enerjisinin Elde Edilmesi

Işık enerjisinden yararlanarak elektrik enerjisi üreten sistemlere fotovoltaik sistemler adı verilir. Güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Güneş pillerinin üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Birden fazla güneş pilleri birbirlerine bağlanarak yüksek voltaj elde etmek mümkündür. Günlük yaşamımızda fotovoltaik düzenekler hesap makinesi, kol saatleri, ışık ölçme sistemleri gibi yerlerde kullanılır. Ayrıca güneş enerjisinden yararlanarak çalışacak elektrikli otomobilleri geliştirme çalışmaları devam etmektedir [11].



Şekil 1.14. Fotovoltaik düzenek

#### 1.2.4. Isı Etkisi ile Elektrik Enerjisinin Elde Edilmesi

Yenilenebilir enerji kaynağını doğadan alan ve çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunmayan kaynaklardır. Bu enerji kaynakları içinde elektrik enerjisi üretimi, büyük ölçüde elektromanyetik indüksiyona dayalı jeneratörlerin etkisinde olduğunu söylenebilir. Söz konusu etki dışında günümüzde Termoelektrik olarak adlandırılan teknoloji 19. yüzyıl ortalarından beri biliniyor olmasına karşılık yeterince işlevsel bir kullanım alanına ulaşamamıştır. Termoelektrik, sıvı ya da katı maddelerin sıcaklıklarına bağlı olarak malzemeler üzerinde oluşan elektriksel potansiyeli inceleyen bilim dalıdır. Isı enerjisi ile elektrik enerjisinin birbirlerine doğrudan dönüşümünü tanımlayan termoelektrik, 1821 yılında Thomas Johann Seebeck tarafından keşfedilmiş fakat o zamanda tam olarak anlaşılmamıştır. Seebeck'in keşfinden 12 yıl sonra 1834'de, Peltier Fransız Bilim Akademisinde, iki farklı iletken arasındaki birleşme yerinde sıcaklık anormallikleriyle ilgili bir makale yayınladı. Bu olgu Peltier etkisi olarak bilinmektedir. Peltier etkisi akım verildiğinde bir üretimi veya iki farklı iletkenin arasındaki sınır tabakanın çevresindeki ısı absorpsiyonunu içerir. Absorbe edilen ya da üretilen sıcaklık miktarı akımla orantılıdır ve orantı katsayısı Peltier katsayısı olarak bilinir. Sıcaklık absorpsiyonu ya da üretimi akımın yönüne bağlıdır. Başka bir deyişle bu olgu tersinirdir. Bundan bir anlam çıkarmaya çalışırsak Peltier'in düşüncesine göre, bunun nedeni sertlik, yumuşaklık ya da elektriksel iletkenlik gibi iletkenlerin özellikleridir. Deney sonuçlarının ortaya koyduğu teorik açıklamaya uyulmadığı zaman, ölçümlere inanmayı reddetmiştir. Sonraki birkaç yıl boyunca Becquerel ve diğer araştırmacılar Peltier etkisinin gerçek doğasını açıklamaya çalıştılar ve sonuç olarak 1898'de Lenz, bizmut ve antimon yolunun birleşim yerindeki bir çukura bir su damlası yerleştirmiştir. Akım ters çevrildiğinde bu damla buza dönüşür, sonra tekrar ters çevrildiğinde buz erir. Lenz bunun akım yönüne bağlı olduğunu açıkça izah etmiştir [23].

Termoelektrik, ısı enerjisinin elektrik enerjisine veya elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümüdür. Bu olayda, uygun malzeme seçilerek termoelektrik etkilerin neler olduğunu belirlemek gerekir. İki farklı yarı iletken malzemenin kimyasal yöntemlerle birbirine birleştirilmesi ile oluşturulan bir devreden elektrik akımı geçirilmesiyle yarı iletkenler farklı sıcaklıklara sahip olurlar. Farklı sıcaklıklardaki yarı iletkenlerde, aynı anda çeşitli etkiler oluşmaktadır. Bunlar Seebeck, Peltier, Thompson, Joule ve Fourier etkileridir. Termoelektriğin temelini oluşturan fiziksel prensipler 1800'lü yıllara kadar

dayanmaktadır. Geçmişten günümüze kadar devam eden bu alandaki çalışmalarda bilim adamları, maksimum materyal faktörü değerini (ZT) üzerinde durmuşlardır. Bu faktörde ısıdan elektrik üretmek için bir materyalin elektrik ve ısı iletkenliğinin hesaba katılması vurgulanmıştır. Sanfransisko’da yapılan materyalleri araştırma toplantısında Donald T. Morelli, otomobildeki termoelektrik sistemler için materyallerin ZT’lerinin az 2 olması gerektiğini vurgulamıştır. Araştırmacılar ZT’nin 1 ile sınırlı olduğunu düşünerek bu konuda yıllarca bir gelişme sağlayamamışlardır. Vinning ZT’nin herhangi bir teorik sınıra dayanmadığını ifade etmiştir. 1950 yılında Ioffe katkılı yarı iletkenlerin diğer malzemelere kıyasla daha iyi termoelektrik özelliklere sahip olduklarını bulmuş ve ev tipi soğutucularda bu yarı iletkenlerden yararlanılacağı ifade etmiştir. Bu soğutuculara örnek olarak gösterilebilecek buzdolaplarında Freon’a ihtiyaç duyulmaz ve çok uzun süre dayanıklılığı sağlanabilir. Birkaç yıl süren bu aktivite sırasında değerlendirilen hemen hemen tüm bilinen yarı iletkenler, yarı metaller ve alaşımlar arasında oda sıcaklığında en iyi sonucu veren malzemelerin  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ve  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  alaşımları olduğu ortaya çıkmıştır [24].

#### **1.2.4.1. Seebeck Etkisi**

Seebeck etkisi, sıcaklık farkının elektriğe dönüşümü olarak tanımlanır. Seebeck deneysel çalışmalarında iki metalden bir halka oluşturmuştur. Metallerin eklem yerlerini farklı sıcaklıklarda tutmuş ve yakınındaki pusula iğnesinin saptığını gözlemlemiştir. Çünkü sıcaklık farkına metaller farklı tepki göstermiş bu da halkada akıma sebep olmuştur. Akımın sebep olduğu manyetik alan da pusula iğnesini saptırmıştır. Seebeck bu olayı termomanyetik etki olarak açıklamıştır ve akımın oluştuğunu düşünmemiştir.

Danimarkalı fizikçi Hans Christian Ersted ‘de çalışmalarında termoelektrik kavramını kullanmıştır. Sıcaklık farkında iki metal ya da yarı iletken arasında termoelektrik voltaj fark oluşmaktadır. Termoelektrik dönüştürücüler p ve n tipi yarı iletkenlerden oluşur. Termoelektrik malzemeler hem elektrik yükünü hem de ısıyı taşıyan serbest taşıyıcılara sahiptir. Bu olayı anlamak için gaz halindeki yüklü parçacıklar örnek verilebilir. Gaz halindeki yüklü parçacıkları, bir tarafı sıcak diğer tarafı soğuk olan yani sıcaklık gradyeninin olduğu kapalı bir kutuda düşünelim. Böyle bir durumda gaz halindeki yüklü moleküller sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hızlı bir şekilde hareket ederler. Sıcak moleküller soğuk moleküllere göre kutu içinde daha fazla bölgeye yayılacak ve böylece soğuk bölgede daha fazla molekül yoğunluğu olacaktır. Bu yoğunluk farkı moleküllerin tekrar sıcak bölgeye yayılmasına neden olacaktır. Kararlı durumda sistem,

molekül yoğunluğu gradyeni sıcaklık gradyeninin oluşmasını karşılayacak şekilde kalır ve böylece molekül hareketinde net akış olmayacaktır. Eğer moleküller elektriksel olarak benzer yüklere sahip iseler soğuk bölgede yoğunlaşan moleküller elektriksel yüklerinden dolayı birbirlerini itecekler ve moleküllerin bir kısmı kutunun sıcak kısımlarına doğru sürüklenecektir. Bu şekilde gaz elektriksel yüklerinden ve sıcak soğuk bölmelerden dolayı moleküllerinin dağılımının ortaya çıkardığı bir elektriksel potansiyel farkı oluşacaktır. Sıcaklık farkından dolayı oluşan bu elektrik potansiyeline Seebeck etkisi denir ve bu etki bir sabitle tanımlanabileceği için bu sabite Seebeck katsayısı denir. Eğer serbest yük taşıyıcıları olan moleküller pozitif yüklü ise bu malzemeye p-tipli malzeme denir. Benzer olarak serbest yükler negatif yüklü iseler n-tipi malzeme olarak adlandırılırlar [24,25].

Seebeck katsayısı malzeme özelliğidir ve her malzemenin farklı bir katsayısı değeri vardır. Malzemelerin iki farklı ucu için fark sıcaklığı olduğu anda sıcak tarafta daha çok elektron fermi enerji seviyesini geçebilecek enerjiye sahip olacaktır. Bu enerji seviyesini aşan, serbest halde dolaşabilen yüksek enerjili elektronlar malzemenin içerisinde yayılım gösterecekler ve net elektron yayılımı sıcak kısımdan soğuk olan kısma doğru olacaktır. Bu olay malzeme içinde yerleşik bir voltaj farkı oluşması anlamına gelmektedir. Malzemede oluşan bu voltaj farkı malzemenin voltaj farkını vermektedir. Verimli bir termoelektrik etki oluşturmak için Seebeck katsayısı mümkün oldukça büyük olmalıdır. Bazı malzemelerde enerji ile birlikte örgü titreşimleri artar. Bu örgü titreşimleri elektronların ortalama serbest yolunun büyüklüğünü, yayılımını ters yönde etkileyebilir ve bazı iletkenlerde elektron yayılımı yönü soğuktan sığa doğru olabilir. Bu durumda Seebeck katsayısı negatif olacaktır. P ve n tipi yarı iletkenlerin yük taşıyıcı yoğunlukları üstünde katkıya yoluyla bazı değişiklikler yapmak mümkündür. Elektron yoğunluğunun artması, beraberinde elektriksel iletkenliğin de artmasını sağlamaktadır. Fakat katkıya yoluyla yük taşıyıcı yoğunluğunu arttırmak Seebeck katsayısında düşüşe neden olabilir. Ayrıca değişen sıcaklık değerleri de malzemenin Seebeck katsayısı üzerinde etkilidir. Bu değerler Tablo 1.2’de gösterilmektedir [26].

**Tablo 1.2.** BiTe yarı iletkenlerde Farklı sıcaklıklara göre değişen Seebeck katsayıları

| Sıcaklık( <sup>0</sup> C) | Seebeck Katsayısı           | Sıcaklık ( <sup>0</sup> C) | Seebeck Katsayısı           |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| P-tipi                    | (V K <sup>-1</sup> ) P-tipi | N-type                     | (V K <sup>-1</sup> ) N-tipi |
| 150                       | 0,000125                    | 150                        | -0,000125                   |
| 200                       | 0,00017                     | 200                        | -0,00017                    |
| 250                       | 0,0002                      | 250                        | -0,0002                     |
| 300                       | 0,000218                    | 300                        | -0,000218                   |
| 350                       | 0,000225                    | 350                        | -0,000225                   |

Seebeck olayı süresince sisteme giren ısı yarı iletkenler içindeki elektronların bir kısmının enerji düzeyini artırır. Daha yüksek enerji düzeyindeki elektronlar yarı iletkenin kristal yapısında hareket edecek şekilde serbest kalırlar. Elektronlar serbest kaldıkça, kristalde bir boşluk (deşik) bırakırlar. Düşük enerjili elektronlar, materyalin içinde serbestçe harekete geçememelerine rağmen bir boşluktan sıçrayabilir. Bu şekilde boşluklar yarı iletken materyal içinde yer değiştirebilir [27].

20. yy. ortalarına kadar termoelektrik etki, sıcaklık ölçümlerinde termokupl olarak kullanılmıştır. Ancak TE modülünün avantajı, termokupl elemanından çok daha yüksek bir gerilim üretebilmesidir. Aynı yüzyılın ikinci yarısında bazı ülkelerde çoğu önemli firma bu alan ile ilgili projeler başlatmışlardır. Yıllar boyunca, termoelektrik uygulamaları için kullanılan malzemelerin ZT ölçümleri 1 değerinin altında kalmıştır. Yüzyılın sonlarına doğru en iyi ZT (etkinlik) değeri Bizmut Tellur için yaklaşık 1 olarak tespit edilmiştir. Zaman içinde hızla gelişen bu teknoloji sayesinde nano ölçekli teknoloji yaklaşımları ile  $ZT < 1$  engeli kırıldı. Kısa süre içinde MIT laboratuvarı, RTI enstitüsü ve Hi-z teknolojileri nominal  $ZT > 2$  ile termoelektrik materyallerin geliştirildiğini yayınladı. Bu değerlerin zamanla daha yüksek değerlere ulaşacağı yapılan çalışmalarda kanıtlanmıştır.

Termoelektrik jeneratörlerin termal verimi üretilen net elektriksel gücün, sıcak yüzeyden emilen ısıya oranı olarak hesaplanır. Performansın termoelektrik modül malzemesinin Seebeck katsayısının karesiyle doğru, iç direnç ve termal iletkenliğiyle ters orantılı olduğu görülmektedir. Yani termoelektrik jeneratör üretimi için malzeme seçilirken, Seebeck katsayısı büyük, iç direnci ve termal iletkenliği düşük malzemeler aranırsa verim artırılmış olacaktır [28].

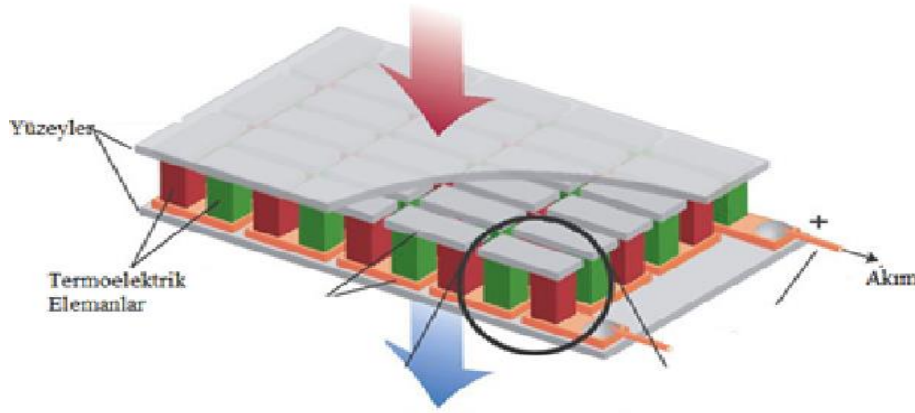
Termoelektrik sistemlerde performans, kullanılan termoelektrik malzemenin tipine göre değişkenlik göstermektedir. ZT değerinin maksimum değerine ulaşmak için bazı

hususların göz önüne alınması gerekir. Bunları, çalışma esnasında kimyasal yapının değişmemesi, karışımlarının difüzyon hızının düşük olması, iyi bir sertliğe sahip olmaları, ısısal etkilere olan dayanım, düşük geçiş dirençlere sahip olmaları şeklinde sıralayabiliriz. Burada sorun değerlerin hesaplanması kısmında düğümlenmektedir. Değer hesabı, bir malzemenin elektriksel iletkenliğinin oranlanması yoluyla yapılır. Asıl hedeflenen çalışma malzemenin içinden elektronların kolayca geçmesine uygun ancak ısı veya termal titreşimlerin (fonon) geçişine dirençli olmasıdır [30].

Termoelektrik materyallerin performansı ZT değerine göre belirlenir. ZT değeri;

$$ZT = \frac{a^2 \sigma}{k} T \quad (1.9)$$

olarak bulunur. Burada a Seebeck katsayısı,  $\sigma$  elektrik iletkenliği, k ise termal iletkenlik ve T ise ortalama mutlak sıcaklıktır. Termoelektrik materyallerin nanoyapıları üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün hızla devam etmektedir.



Şekil 1.15. TEM iç yapısı

Bir termoelektrik jeneratör aynı zamanda eşsiz bir ısı motorudur. Sessiz çalışırlar ve güvenilirlerdir. Geçen on senede termoelektrikler cihazlar çevreci ve esnek olmalarından dolayı elektrik kaynağı olarak bir cazibe haline gelmiştir. Özellikle son zamanlarda atıl ısının, yani ısı kaynağının bedava olması verimliliğin düşük olması dezavantajını ortadan kaldırmıştır. Atıl ısının enerji kaynağı olarak özellikle 140 °C altındaki kullanımı elektrik üretimindeki bu metodun ticari rekabetini yeteri kadar artırmıştır. Atık sıcak su ile desteklenen termoelektrik sistemlerin performansının son zamanlardaki araştırma sonuçları

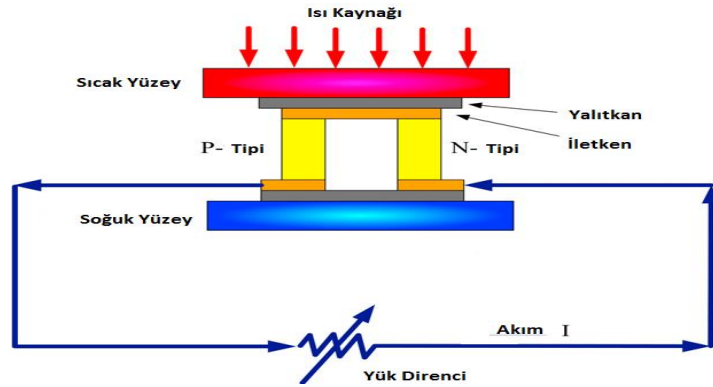
gösteriyor ki üç yılın üzerindeki işletim periyodunun elektrik gücü bu metotla üretilir ve fiyatı geleneksel kaynaklarla eş değerdedir. Bu çalışmada çevre dostu olan termoelektrik güç üretiminin geleneksel yöntemlere alternatif olabileceği anlatılmıştır [29].

Termoelektrik yapıların en yoğun kullanım alanlarında biri de soğutma sistemlerinde olmuştur. Otomobillerde kullanılan küçük buzdolapları, bilgisayar işlemcilerinin soğutulması bu sistemin kullanım alanlarının başında gelmektedir. Termoelektrik modüllerde buzdolaplarında olduğu gibi gaz sıkıştırıcı kompresörler kullanılmadığı için oldukça sessizlerdir. Bu yüzden klimalarda da kullanılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Ancak termoelektrik enerji özellikle ısının atıl durumunda, geri dönüşümünün yapılmadığı durumlarda kullanımı ile ön plandadır. Sobalar, araç egzozları, doğal sıcak su kaynakları, gazlı su ısıtıcıları, güneş ışınlarının odaklanması gibi atıl ısının değerlendirilebileceği kaynaklardan kullanılır. Termoelektrik malzemeler, birçok alanda temiz enerji vaat etmektedir. Termoelektrik enerji özellikle taşıt teknolojilerinde, pil ve akülerin şarj edilmesinde, aydınlatma elemanlarının çalıştırılmasında yaygın olarak kullanılmalıdır. Ancak bu kadar yararlı olmalarına karşın şimdiye kadar bu malzemelerin elde edilişi çok zor olmuştur. MIT ve Boston College'den araştırmacılar yaygın kullanılan termoelektrik malzemelerin etkinliğinde %40 artış sağlayabilecek ucuz ve basit bir teknik üzerine çalışmaktadırlar [31].

MIT ve BC'den araştırmacılar nanoteknolojiden yararlanarak büyük kütleli bizmut ve antimon tellür yarı iletken alaşım olarak 1950'den beri ticari aygıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanda çalışan bir ekip bu alaşımın değer katsayısında % 40'lık bir artışı tespit etti. Bu başarı, yüzyılın ilk yarısında oda sıcaklığından 250 °C dereceye kadar işlev görebilecek etkin bir malzeme kullanılarak elde edilen ilk kazanımdı. Göreceli olarak ucuz ve çevre dostu alaşım kullanılarak elde edilen bu başarı, yüksek soğutma ve enerji üretim etkinliği sağlayan keşfin hızla yaygın olarak kullanılabileceği anlamına geliyor. Nanoteknoloji kullanarak, parçalanıp yeniden nano bileşiklerden büyük kütle halinde birleştirilen eski bir malzemenin geliştirilmesi için yeni bir yol bulduklarını söyleyen Boston College'den Fizikçi ve aynı zamanda projenin sorumlularından Zhifeng Ren, bu yöntemin düşük maliyetli ve yığın üretiminin yapılabilir olduğundan bahsetmiştir. Termoelektrik malzemelerin maliyetini etkin tarzda geliştirilmesinin heyecan verici fırsatları temsil ettiği de açıklanmaktadır. Termoelektrik etkinlikte düşük maliyetli yaklaşımla erişilen bu nokta, yeni nesil ürünlerin de yolunu açmaktadır. Ekibin, mikro soğutucu ve enerji üretici olarak iş görecektir, çok ince alaşımlar kullanarak oluşturulan nano

yapılar için yararlandığı düşük maliyetli yaklaşım detaylı olarak Science Dergisinde yayımlandı. Araştırmacılara göre bu yöntem, ucuz olmasına ilave olarak, yakın zamanda yapılacak geliştirmelerle, daha az enerji tüketen veya atık enerjiyi geri kazanmaya yönelik araçları üretmek için pratik sonuçlar sağlayabilecektir. Bu bulgular, keşfedildiği 19. yüzyılın başlarından beri bilim adamlarını ilgilendirmiştir ve termoelektrik enerji üretimi arayışında çok önemli bir kilometre taşını oluşturmuştur.

Termoelektrik etki belirli malzemelerin ısıyı elektriğe çevirmesi veya tam tersini ifade eder. Bu etkiden yararlanılmasında bir aksaklık bulunmaktadır; çoğu malzeme elektriği ilettiği kadar ısıyı da iletir, bu nedenle ısı malzemenin her tarafında hızlı bir şekilde eşitlenir. Etkinliği geliştirmek amacıyla bilim adamları, elektriği iletebilen ancak ısıyı daha az ileten malzemeler üzerinde yoğunlaşmışlardır [32].



Şekil 1.16. İndüklenen elektrik akımı

TEJ'in performansı Seebeck katsayısı ( $a$ ), elektriksel iç direnç ( $R_G$ ) ve termal iletkenlik ile karakterize edilebilir. TEJ'den elde edilen güç ya gerilim ile çıkış akımının çarpılarak ya da ısı akışı değişimi gözlemleri ile ölçülebilir.

$$P = V \cdot I = Q_H - Q_C \quad (1.10)$$

Bu denklemden aşağıdaki denklemi elde edebiliriz;

$$V = N \cdot a \cdot (T_H - T_L) \quad (1.11)$$

$$V = P / I = a \cdot (T_H - T_L) - I \cdot R_G \quad (1.12)$$

$$\begin{aligned} P &= I^2 \cdot R = \left( \frac{V}{R + R_{PN}} \right)^2 \cdot R \\ &= \left( \frac{N \cdot a \cdot DT}{R + R_{PN}} \right)^2 \cdot R \end{aligned} \quad (1.13)$$

$$= \left( \frac{N.a.DT}{R + \frac{2N.L.\rho}{A}} \right)^2 . R$$

Sistemde verim ifadesini bulmak için daha önce elektriksel çıkış gücü olarak tanımlanan  $P$  değeri bulunur. Şekil 1.16’da görüldüğü gibi ısı transferi sıcak yüzey bölgesinden  $n$  ve  $p$  yarı iletken bacakları üzerine ve oradan da soğuk yüzey bölgesine doğrudur. Sisteme verilen ısı (sıcak taraf) denklem 1.15’de verilmiştir. Termoelektrik modüle sıcak taraftan verilen ısıнын hesaplanması için Kelvin ilişkisi, Joule ifadesi ve Fourier ısı transferi ifadeleri göz önüne alınmalıdır. Sıcak yüzeydeki ifadeler de bu yasaları içerir. Burada  $k$  ısı iletkenliği ifade etmektedir.

$$Q_h = \alpha . T_h . I - 0.5 I^2 R + k . \Delta T \quad (1.14)$$

$$Q_c = \alpha . T_c . I + 0.5 I^2 R + k . \Delta T \quad (1.15)$$

$$\alpha = |\alpha_n| + |\alpha_p| \quad (1.16)$$

$$R = \rho_n (L_n / A_n) + \rho_p (L_p / A_p) \quad (1.17)$$

$$k = \lambda_n (A_n / L_n) + \lambda_p (A_p / L_p) \quad (1.18)$$

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (1.19)$$

$$I = \alpha \Delta T / (R + R_o) \quad (1.20)$$

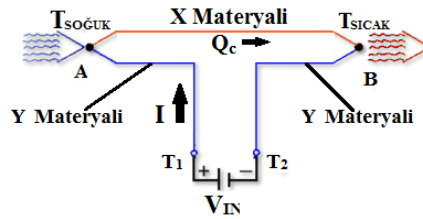
Burada  $P$  güç (W),  $I$  akım (A),  $V$  voltaj (V),  $Q_H$  sıcak yüzeyden transfer olan ısı (W),  $Q_C$  soğuk yüzeye transfer olan ısı (W),  $R$  TEJ’in iç elektrik direnci ( $\Omega$ ),  $\rho$  p/n tipi materyallerin yoğunluğunu,  $L$  p/n malzemelerinin birinin uzunluğunu,  $A$  ise p/n malzemelerinin yüzey alanı olarak tanımlanmıştır.

Sistemde verim ifadesini bulmak için daha önce elektriksel çıkış gücü olarak tanımlanan  $P$  ve  $Q_h$  sıcak bölgedeki ısı girdisi belirlenir ve sistemin verimi bulunur [32-35].

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{I^2 . R}{Q_h} \quad (1.21)$$

#### 1.2.4.2.Peltier Etkisi

1834 yılında Charles Athanasa Peltier, iki farklı metali birleştirerek elektrik akımı uygulamış ve bu birleşme noktasında metallerden birinin ısındığını, diğerinin ise soğuduğunu gözlemlemiştir. Isının akış yönü, elektrik akımının yönüne bağlı olup, gerilim ters çevrildiğinde, öncelikle ısınan metal bu sefer soğumakta ve soğuyan metal de ısınmaktadır. Termoelektrik etkinin çift yönlü olduğunu ortaya koyan Peltier deneyi termoelektrik soğutuculara (TES) öncülük etmiştir. Materyallerde ısı akışının akıma oranı Peltier Etkisi olarak bilinir. Bu durum, yarı iletken içinde ısıyı taşıyacak olan parçacıkların dışarıdan uygulanan sıcaklıktan etkilenecek yer değiştirmeleri yerine dışarıdan yarı iletken uçlarına uygulanan gerilim farkı ile ısı taşıyıcı parçacıkların yer değiştirmesi ile sağlanır. Böylece ısının yarı iletkenin bir ucundan diğer ucuna aktarılması sağlanmış olunur. Bu ısı aktarımının hızı kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Yani p ve n tipli yarı iletkenlerin seri olarak birleştirilir ve bu devre üzerinden doğru akım geçirilirse, yarı iletkenin bir ucundan ısı emilirken, diğer ucundan da ısı açığa çıkmış olacaktır. Açığa çıkan ısı miktarı, devreden geçirilen doğru akımla doğru orantılıdır. Elektronlar, farklı iki yarı iletken malzemenin birleşme noktasından birinden diğerine geçerken, yarı iletkenlerin bir tarafı ısı enerjisini soğurucu diğer tarafında ise ısı enerjisini yayıcı bir şekilde davranmaktadır.



Şekil 1.17. Peltier Deneyi ve Termoelektrik Çifti

Peltier deneyinde X ve Y malzemeleri, yine A ve B noktalarından birleştirilir.  $T_1$  ve  $T_2$  terminali arasına  $V_{IN}$  gerilimi uygulandığında akan I akımı,  $Q_c$  miktarındaki bir ısının A noktasından alınarak B noktasına verilmesine neden olur. Termoelektrik ısıyı materyalin bir tarafından diğer tarafına iletebilen taşıyıcı yük akışı söz konusudur.

Aktarılan ısı şu formülle hesaplanır:

$$Q_c = I \cdot b_{xy} \quad (1.22)$$

Burada bxy, malzemenin cinsi, modülün geometrisi ve sıcaklığa bağımlı olan bir çarpandır [31-34].

#### **1.2.4.3. Thompson Etkisi**

1856 yılında William Thompson (Lord Kelvin) tarafından Seebeck ve Peltier etkileri kapsamlı bir şekilde açıklandı ve birbirleri arasındaki ilişki ortaya çıkartıldı. Bu anlatıma göre Seebeck ve Peltier katsayıları termodinamik yasaları ile açıklanmıştır. Basit olarak açıklanabilir ki, Peltier sabiti Seebeck sabitinin sıcaklıkla çarpımına eşittir. Thompson'un bu açıklaması termoelektriğin üçüncü etkisi veya Thompson etkisi olarak bilinir. Bu açıklama şu şekilde de yapılabilir: Bir malzemenin uçları arasında elektrik akımı geçtiğinde, malzemenin bir tarafından ısı enerjisi soğuruluyor veya ısı enerjisi açığa çıkarılıyor demektir. Isı hem elektrik akımına hem de sıcaklık değişimine bağlıdır. Bu bağıllık Thompson katsayısı ile tanımlanır. Thompson ısısı, akım şiddeti, sıcaklık farkı ve zaman ile doğru orantılıdır [24,25,31].

Ortaya çıkan Thompson ısısı;

$$Q_T = t \cdot \Delta T \cdot I \quad (1.23)$$

Burada;

$\Delta T$  sıcaklık farkını,  $t$  zamanı,  $I$  ise akım şiddetini verir.

#### **1.2.4.4. Joule Etkisi**

Bu etki, farklı iki yarı iletken içinden geçen akımdan dolayı yarı iletkenler üzerinde ısı açığa çıkacağını açıklar. Açığa çıkan ısı enerjisi aşağıdaki bağıntı ile bulunur [24, 25, 31].

$$Q_J = R I^2 \quad (1.24)$$

$Q_J$ : Açığa çıkan ısı miktarı ( W ),

$R$ : Malzemenin direnci ( ohm ),

$I$ : Malzeme üzerinden geçen akım şiddeti ( A )

#### **1.2.4.5. Termal iletim etkisi**

Isının yüksek sıcaklığa sahip bölgeden, düşük sıcaklığa sahip bölgeye doğru transfer edilmesi olayıdır. Fourier etkisinden dolayı açığa çıkan ısı enerjisi aşağıdaki denklemdeki gibi verilebilir [24, 25, 31].

$$Q_F = k \cdot A \quad (1.25)$$

$Q_F$ : Yüksek sıcak bölgesinden düşük sıcak bölgesine doğru giden ısı miktarı ( W ),

$A$ : Malzemenin toplam alanı (  $m^2$  ),

$k$ : Malzemenin ortalama ısı iletim katsayısı (  $W / m^2 \text{ } ^\circ C$  )

### 1.3.Yarıiletken Yapılar

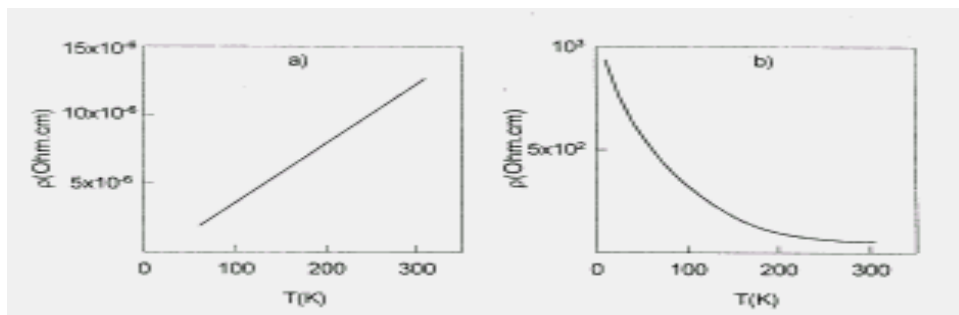
Son yörüngelerinde (valans bandı) 4 elektron bulunduran maddeler yarı iletken maddelerdir. Yarı iletkenlerin bazıları bileşik bazıları ise element halde bulunurlar. Yarı iletkenler kristal yapıdadır. Yani atomları belirli bir sistemle sıralanmıştır. Bu yapı tekli kristal (mono kristal) ya da çoklu kristal (poli kristal) olabilmektedir. Elektrik akımı geçirilen iki tür iletken olabilir. Bunlar elektron geçişli ve iyonik geçişli iletkenlerdir. Metallerde elektrik akımı malzemenin iyonları ile taşınır ve iyonik iletkenin kompozisyonu akımın geçtiği zamanla değişmektedir. Yarı iletken malzemeler ise hem elektron hem de iyon iletkenliğine sahip olabilirler. Dış etkilerle yarı iletkenlerde serbest yük taşıyıcılarının (elektronların ve deliklerin) konsantrasyonu artmaktadır. Bu yöntemle meydana gelen yük taşıyıcılarına ısısal veya dengeleyici yük taşıyıcıları denir. Serbest yük taşıyıcıları ısı, ışık, elektrik alan, basınç,  $\gamma$ -ışınları, hızlı parçacıkların (elektronların, protonları, nötronların, iyonların vb bombardımanı) etkisiyle oluşabilirler.

Metallerde atomlar tam olarak iyonlaşmış durumdadır ve serbest elektronların konsantrasyonu atomların konsantrasyonuna eşittir. Bu nedenle metallerin özellikleri dış etkilerle çok az değişmektedir. Yarı iletkenlerde ise serbest elektronların konsantrasyonu ana atomların konsantrasyonundan çok azdır. Yarı iletken atomların dış etkilerle (ışık, elektrik alanı, basınç, hızlı parçacıklarla bombardımanı vb.) iyonlaşmasını ve serbest elektron konsantrasyonunu değiştirdiği için yarı iletkenlerin özellikleri de değiştirilebilmektedir [41].

Enerjisinin etkisiyle kristaldeki atomlar arası bağlar kopabilir ve bu bağın elektronu serbest kalabilir. Atomlar arası bağdan kopan elektronun yerinde boşluk meydana gelir ve bu boşluğa delik denir. Bu olay elektron delik çiftlerinin oluşması (jenerasyonu) olarak tanımlanır. Bu olayın sonucunda iletim bandında serbest elektron ve valans bandında serbest delik meydana gelmektedir. Aynı zamanda yarı iletkenlerde bu olayın tersinide gözlemek mümkündür. Bu olaya elektron-delik çiftlerinin birleşmesi (veya

rekombinasyonu) denir. Metallerde ve yarı iletkenlerde dış elektrik alanının etkisiyle elektrik akımının oluşma mekanizması şu şekilde olmaktadır. Dış elektrik alan ( $\epsilon$ ) etkisiyle kristalde elektron hızlarının dağılımındaki simetri bozulmaktadır. Elektriksel kuvvete ( $F = -e.E$ ) karşı hareket eden elektronların hızları küçülür ve elektriksel kuvvet yönünde hareket eden elektronlar hızlanırlar. Elektronun ivmesi ve frenlenmesi elektronun bir enerji durumundan diğerine, geçmesine bağlıdır. Bu oluşum band üzerinde komşu üst düzeylerde boş durumların olması durumunda meydana gelir. Dış elektrik alan elektronlara ilave momentum verebilir ve bu nedenle de elektron boş üst düzeye geçebilir. Böylece elektronlar büyük ölçüde elektrik alanının karşı yönünde hareketlenirler. Yalıtkanlarda valans bandı elektronlarla dolmuştur ve yasak band genişliği çok büyüktür ( $E > 4-5$  eV). Bu nedenle yüksek elektrik alan ( $\epsilon \sim 10^6$  V/cm), elektronları valans bandından iletim bandına geçiremez. Sonuçta yalıtkanlarda dış elektrik alanda elektronların hız dağılımı değişmez ve bu nedenle elektrik akımı oluşamaz. Yarı iletkenlerin yasak band genişliği (yalıtkanlara göre) daha küçüktür ve ısısal enerjileri nedeniyle, elektronlar valans bandından boş iletim bandına geçebilirler ve böylece elektrik akımı oluşturabilirler. Bundan başka, yarı iletkenlerde katkılarla ve dış etkilerle iletim bandında yük taşıyıcılarının oluşturulması mümkündür [30].

Katı cisimler elektrik özelliklerine göre (özdirenç) göre 3 gruba ayrılır. Bunlar sırasıyla iletkenler, yalıtkanlar ve yarı iletkenlerdir. Metaller ile yarı iletkenler arasındaki farkı, sıcaklık bağlantısından Şekil 1.18’de açık şekilde görülmektedir.



**Şekil 1.18.** (a) Metalin (Fe) ve (b) yarı iletkenin (Si) özdirencinin sıcaklıkla değişiminin gösterimi [30].

Şekil 1.18 incelendiğinde metallerde sıcaklık arttıkça direnç de artmaktadır. Katkısız yarı iletken bir malzeme için özdirenç ise metalin aksine sıcaklık arttıkça azalmaktadır.

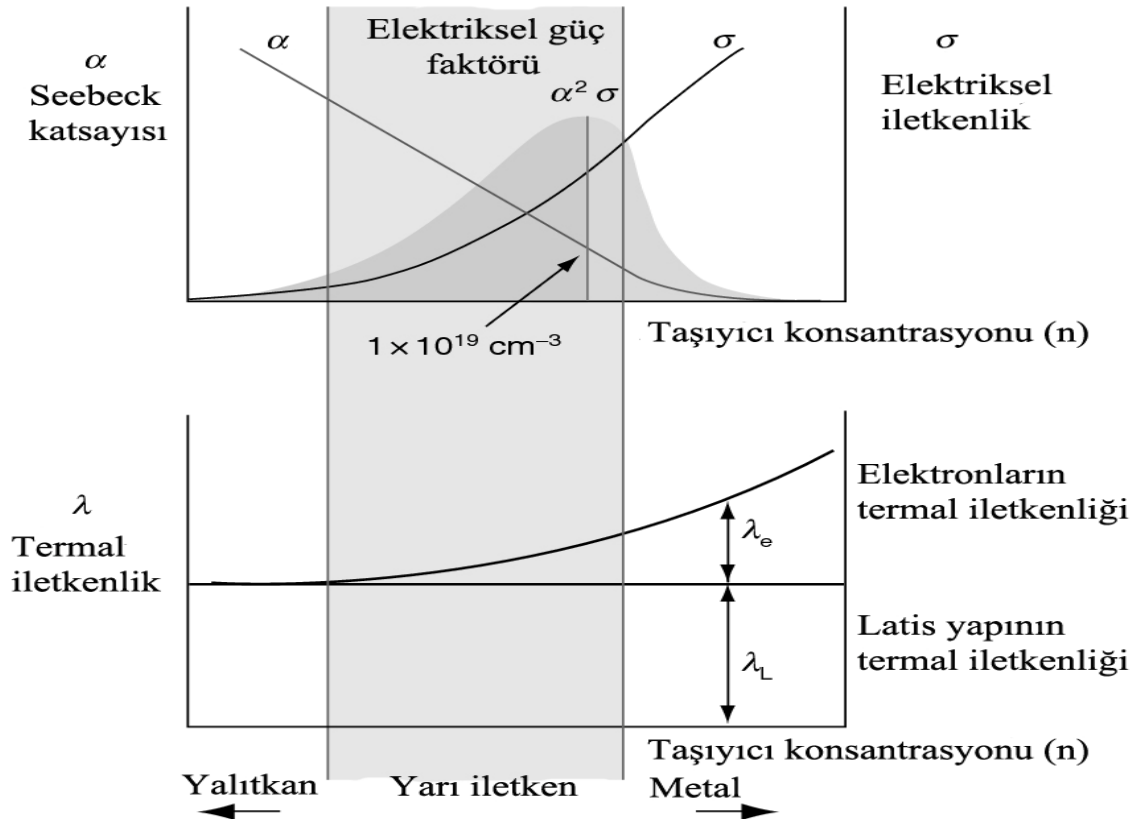
Metallerin özdirenci sıcaklıkla artmakta veya iletkenliği azalmaktadır. Katkısız yarı iletkenlerde, metallerin aksine elektronların konsantrasyonu sıcaklık arttıkça artmaktadır.

Yarı iletken malzemelerin başlıca şu özellikleri vardır:

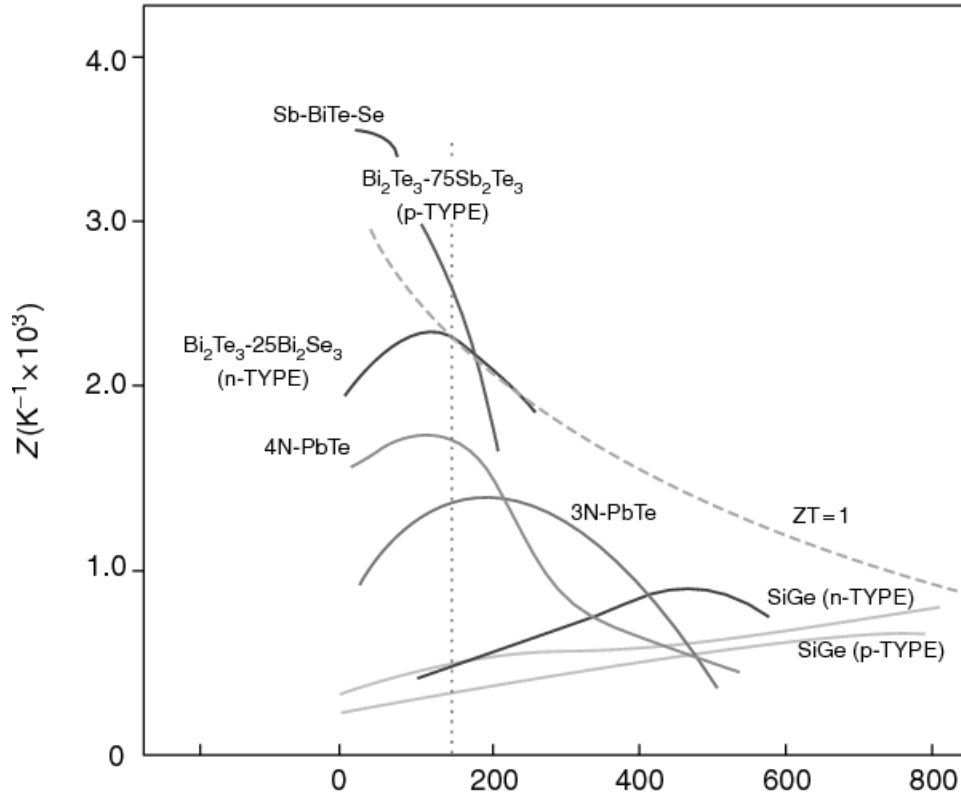
- İletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alırlar
- Normal halde yalıtkandırlar
- Ancak ısı, ışık ve manyetik etki altında bırakıldığında veya gerilim uygulandığında bir miktar valans elektronu serbest hale geçer, yani iletkenlik özelliği kazanır. Bu şekilde iletkenlik özelliği kazanması geçici olup, dış etki kalkınca elektronlar tekrar atomlarına dönerler
- Tabiatla basit eleman halinde bulunduğu gibi laboratuarda da bileşik eleman halinde de elde edilebilir
- Yarı iletkenler kristal yapıya sahiptirler. Yani atomları kübik kafes sistemi denilen belirli bir düzende sıralanmıştır
- Bu tür yarı iletkenler, yukarıda belirtildiği gibi ısı, ışık, etkisi ve gerilim uygulanması ile belirli oranda iletken hale geçirildiği gibi, içlerine bazı özel maddeler katılarak iletkenlikleri artırılmaktadır
- Katkı maddeleriyle iletkenlikleri artırılan yarı iletkenlerin elektronikte ayrı bir yeri vardır.

Uygulanan elektrik alanına karşılık maddedeki yük taşıyıcıları serbest hale gelirse, maddenin içinden elektrik akacaktır. Serbest taşıyıcıların sayısı, maddeden maddeye çok büyük farklılıklar gösterir. Örneğin bakır ya da gümüş gibi metallerde serbest elektron yoğunluğu  $10^{23} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinde iken kuvars ya da alüminyum oksit gibi yalıtkanlarda  $10^3 \text{ cm}^{-3}$ 'den daha azdır. Serbest elektron yoğunlukları arasındaki bu fark elektriksel iletkenlikten kaynaklanmaktadır. Elektriksel iletkenlik metallerde  $10^6 \text{ mhos-cm}^{-1}$  mertebesinde iken iyi yalıtkanlarda bu iletkenlik derecesi  $10^{-15} \text{ mhos-cm}^{-1}$  ya da daha küçüktür. Metal ya da yalıtkanlarda, serbest taşıyıcı yoğunluğa sabit olup çok fazla değişmez. Ancak yarı iletkenlerdeki serbest taşıyıcı yoğunluğunun derecesi, uygun yarı iletken yapılarına elektrik alanının uygulanması ile atomlarının katkılanmasıyla değişebilir. Bu şekilde serbest taşıyıcı yoğunluğunun değiştirilebilmesi özelliği yarı iletkenleri, elektriksel uygulamalar için yegâne çözüm olarak ortaya çıkartmaktadır. Silisyum atomu en yakın dört komşu atoma bağlıdır. İki bitişik atom arasında paylaşılan elektronlar kovalent bağlar oluştururlar. Mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklıklarda, bu bağların bir kısmı

silisyum atomunun denge konumu civarındaki rastgele ısı hareketinden dolayı oluşan enerji ile kopar. Isıl iyonlaşma olarak isimlendirilen bu süreç, serbest elektron açığa çıkararak bağı kopan silisyum atomunun çekirdeğini sabit pozitif yük haline getirir. Başka bir sürede başka bir serbest elektron pozitif yük tarafından çekilerek kopan bağ ile birleşir. Bununla birlikte, serbest elektron veren silisyum bir pozitif yüke sahip olur. Bu hareketli pozitif yük normal olarak bir elektronlu boş bağdan kaynaklandığı için delik olarak isimlendirilmiştir. Isıl iyonlaşma mekanizması elektron ve delikleri eşit sayıda üretir. Bir yarı iletken de akım akışı, akım ile ters yöndeki net elektron akışı ve akım ile aynı yöndeki net delik akışının toplamıdır. Serbest taşıyıcılar sürüklenme ve yayılım gibi iki mekanizma yardımıyla hareket edebilirler. Bir yarı iletken bir etki uygulandığı zaman serbest delikler alan tarafından ivmelendirilir. Deliklerin hız bileşeni alana paralel iken, elektronların hız bileşeni alana ters yöndedir. Sürüklenme hızı olarak adlandırılan bu hız elektrik alanın şiddeti ile doğru orantılıdır [42].



**Şekil 1.19.** Malzeme içerisindeki taşıyıcı konsantrasyonuna göre iletkenlik, Seebeck katsayısı, güç faktörü, ve termal iletkenliğin değişimi [25].



Şekil 1.20. Termoelektrik malzemelerin performansı

Bu materyalleri geliştirmenin bir yolu termal iletkenlik ağıнын azaltılması, diğer bir yolu ise fonon cam elektronik kristaller olarak adlandırılan kristal gibi elektrik iletkenliği, cam gibi ısıyı iletkenliğine sahip zayıf atom ve molekülleri ihtiva eden kristal yapılarıdır [25, 43].

### 1.3.1 Yarı İletken Alaşımların Üretiminde Kullanılan Yöntemler

Geliştirilmiş termoelektrik malzemeler bulmak için en verimli yaklaşım, içine titreyen atom veya moleküller sıkıştırılmış kristal yapılı yeni malzemelerin sentezlenmesidir. Bununla birlikte, 50-150 K sıcaklık aralığında çalışabilecek termoelektrik malzemenin teknolojiye önemli bir kazanç sağlayacağına inanılmaktadır. Film şeklindeki termoelektrik malzemelerin hazırlanmasında iki yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan biri vakum buharlaştırma, diğeri ise kalın filmlerin preslenmesi dışındaki döküm işlemidir [24,30].

### 1.3.1.1 Flaş Buharlaştırma Yöntemi

İnce film tipi şeklindeki termoelektrik malzemelerin elde edilme yönteminde kullanılmaktadır.  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  termoelektrik malzemelerinin ince tabakası flaş (vakum) buharlaştırma yöntemiyle hazırlanmaktadır.

Flaş buharlaştırmanın uygulanma sebepleri;

- 1) Termoelektrik malzemelerin doğrusal bir şekilde elektrotlarına dokunabilmeleri
- 2) Düşük sıcaklık sentezi
- 3) Elektronik cihazların hazırlanmasında vakum buharlaştırmanın uygun olması
- 4) Filmlerin kimyasal bileşimi için flaş buharlaştırmanın kesin bir kontrol sağlamasıdır.

### 1.3.1.2 Döküm Yöntemi

Kalın film tipi termoelektrik malzemelerin elde edilmesinde kullanılmaktadır.

Uygulanma sebepleri;

- 1) Vakum buharlaştırma yöntemiyle kalınlık için bir limit vardır. Fakat kalın filmler geçerli elektriksel yoğunluğun düşük olabileceği durum için temin edilir.
- 2) Sonuç vakum buharlaştırmadan daha düşüktür.
- 3) Bileşenlerin kontrolünü ve safsızlığını bozan etmenlerin ilavesi basittir.

Buharlaştırma için ham tozlar p-tipi ve n-tipi malzemeler için farklı bileşimlerdir. Malzemeler küçük parçalar halinde eritilmiş (1-5 mm maksimum boyutta ) ve toz haline dönüştürülmüştür (250-500  $\mu\text{m}$  büyüklüğünde).  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ve  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  karışımlarının tozları %99,999 yüksek saflıktaki kimyasallardır. Filmlerin kristal yapılarını incelemek için X-ışınları analiz yöntemi kullanılmıştır. Elektriksel iletkenlik ve Seebeck katsayıları sıcaklığın 200 °C olduğu durumda Ar gazı içinde ölçülmüştür. İnce film tipi numuneler değişik sıcaklıklar kullanılarak hazırlanmış ve kristal yapıları ile kimyasal bileşimleri analiz edilmiştir. Film tipi termoelektrik malzemeler termoelektrik modüllerde soğutma ve atomların dizilişinde meydana gelen elektriksel varlığın belli olması için hazırlanmıştır.

Flaş buharlaştırma ve döküm yöntemleri, film şeklindeki p-tipi ve n-tipi (Bi,Te,Se) malzemelerinin hazırlanması için uygulanmaktadır. Film tipi termoelektrik malzemeler ısının etkisiyle sıvılaşma olmaksızın tek bir kütle içinde birleşen malzemelerin özellikleriyle sıcaklık kontrolleriyle karşılaştırılmıştır. Termoelektrik malzemelerin kullanımında elektronik bir cihaz görevi gören termoelektrik modül soğutmayı elektrik jeneratörleri gibi sağlamaktadır. Bu cihaz uygun soğutmayı CFC (klor-flor-karbon) uygulamaz ve elektriksel jeneratörleri sıcaklık değişimlerinden etkilenmez. Termoelektrik

modül elektrik enerjisini ısıya çevirmede basit bir cihazdır. Bu yüzden termoelektrik modüller düşük yeterlilikte enerji değişimleriyle limitlendirilmektedir.  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  malzemesi sistem içinde büyük termoelektrik etkinliğe sahiptir.  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  için üretim yöntemleri kütle üretimi için uygun değildir. Hazırlık yöntemleri dondurma eksenler boyunca ve toz sinterleme işlemleridir. Modüller kesme, toplama, lehimleme yöntemleriyle yapılandırılmaktadır.

Kuantum teorisine göre izole edilmiş atomda elektronların enerjisi kesikli olarak değişebilir. Pauli ilkesine göre atomun her enerji düzeyine en çok iki ters yönlenmiş spinlere sahip elektronlar yerleşebilir. Yarı iletken malzeme oluştuğunda yani atomlar birbirine çok yaklaştığında komşu atomların kuvvetli elektrik alanı etkisiyle valans elektronlarının enerji düzeyi banda ayrılır. Valans elektronlarından oluşmuş enerji bandına valans band denir. İletim ve valans bandları arasında yasak band bulunmaktadır.  $E_c$  iletim bandındaki elektronların en büyük enerjisidir,  $E_v$  valans bandının maksimum enerjisi,  $E_g$  yarı iletkenin yasak band genişliği ve bu enerji düzeyi valans bandının tavanı olarak adlandırılır. İletim bandının tavan enerjilerinin farkı (1.27) denkleminde verilmiştir.

$$E_c - E_v = E_g \quad (1.26)$$

Denklem, yarı iletkenin yasak enerji band genişliğini karakterize eder. Kusursuz ve katkısız yarı iletkenlerde elektronların enerjisi yasak band enerjileri içinde olamaz. Yasak band genişliği yarı iletkenlerin kimyasal bağ türü ve atomların türü ile belirlenir. Farklı yarı iletkenlerin yasak band genişliği 0,1 eV'dan 5 eV'a kadar değişebilir. Yarı iletkenlerin yasak band genişliği sıcaklık arttıkça değişir. Bu olayın nedenleri kristaldeki atomların ısısal titreşim genliğinin ve atomlar arası uzaklığın sıcaklıkla değişmesine bağlıdır. Yarı iletkenlerin çoğunda sıcaklık arttıkça yasak band değişikliği küçülmektedir. Yarı iletkenlerde, mutlak sıfırdan daha büyük sıcaklıklarda, elektronlar valans bandından daha yüksek enerji düzeylerine veya iletim bandına geçebilir. Valans bandından iletim bandına geçişlerin enerjisi yarı iletkenin yasak band genişliği ile belirlenir. İletim bandında yerleşen elektronlar, serbest elektronlar olarak adlandırılır [45].

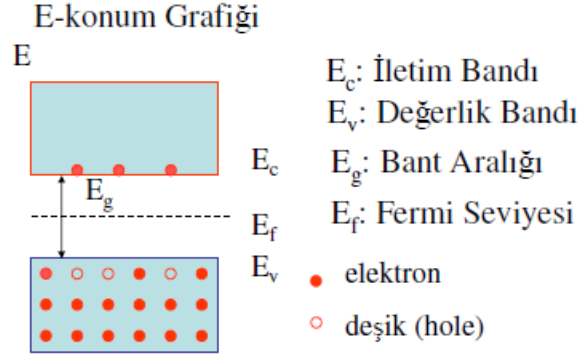
**Tablo 1.3.** Güç üretimi için kullanılan termoelektrik materyallerin karakterleri [46].

| materyal                        | bileşenler                                                                             | iletken tipi | sıcaklık farkı (°C) | ZT          | mekanik özellikler                                |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------|-------------|---------------------------------------------------|
| Si                              | Mn-Si                                                                                  | p            | 300 – 600           | 0.80        | Yang modülü<br>12,000MPa<br>Poisson oranı<br>0.34 |
|                                 | Mg-Si                                                                                  | n            | 380 – 600           | 1.07        | –                                                 |
| Si-Ge                           | Si <sub>0.8</sub> Ge <sub>0.2</sub>                                                    | n            | 730                 | 1.00        | Basınç dayanımı<br>653 MPa                        |
|                                 | Si <sub>0.8</sub> Ge <sub>0.2</sub>                                                    | p            | 730                 | 0.70        | Basınç dayanımı<br>473 MPa                        |
| Oxide                           | NaCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                                       | p            | 30 – 500            | 1.20        | –                                                 |
|                                 | (Ca,Sr,Bi) <sub>2</sub> Co <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                 | p            | 330 – 730           | –           | –                                                 |
|                                 | (ZnO) <sub>5</sub> (In <sub>0.97</sub> Y <sub>0.03</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | n            | 430 – 800           | 0.31        | –                                                 |
|                                 | Zn <sub>0.98</sub> Al <sub>0.02</sub> O                                                | n            | 430 – 700           | 0.42        | –                                                 |
| PbTe                            | PbTe                                                                                   | n            | 230 – 577           | 0.70        | –                                                 |
| TAGS                            | GeTe-AgSbTe <sub>2</sub>                                                               | p            | 430                 | 1.40        | –                                                 |
| LaTe                            | LaTe <sup>-1.4</sup>                                                                   | n            | -730                | 1.17 – 1.43 | –                                                 |
| filled-Skutterudites            | YbCo <sub>0.9</sub> (PtPd) <sub>0.1</sub> Sb <sub>3</sub>                              | n            | 330 – 630           | 1.12        | –                                                 |
|                                 | Ce <sub>0.12</sub> Fe <sub>0.7</sub> Co <sub>3.29</sub> Sb <sub>12</sub>               | p            | 330 – 630           | 0.93        |                                                   |
| Bi-Sb-Te-Se                     | Bi-Sb-Te-Se                                                                            | n, p         | -180 – 250          | 0.3 – 1.01  | –                                                 |
| Zn <sub>4</sub> Sb <sub>3</sub> | Zn <sub>4</sub> (Sb <sub>0.97</sub> Sn <sub>0.03</sub> ) <sub>3</sub>                  | p            | 230 – 480           | 1.00        | –                                                 |
|                                 | Zn <sub>4</sub> Sb <sub>3</sub>                                                        | p            | 230 – 480           | 1.22        | –                                                 |

Katılar atomlarının dizilişlerine göre amorf yapı ve kristal yapı olmak üzere iki grupta toplanırlar. Bazı katıların atomları gelişigüzel dizilmiş olup, belirli bir düzene sahip değildirler. Bunlara amorf katılar denir ve oluşturdıkları yapıya da amorf yapı adı verilir. Bazı katılarda ise, katıyı oluşturan atom, atom grupları ve moleküller, o katıya özgü belirli bir düzen içinde bir araya gelirler. Bu katılara da kristal denir ve oluşturdıkları yapıya da kristal yapı adı verilir. Elektronik devre elemanları yapımında germanyum ve silisyum maddeleri saf olarak kullanılmaz, içlerine katkı maddeleri enjekte edilerek n ve p tipi yarı iletkenler elde edilir. Saf silisyum maddesine arsenik ilave edilmesi ile n tipi yarı iletken elde edilir [47].

Enerji bant teoremine göre, valans bandı tamamen dolu ve iletim bandı tamamen boş olan katılara yalıtkanlar adı verilir. Yalıtkanlarda bu iki bant arasındaki yasak enerji aralığının geniş olması nedeniyle, oda sıcaklığındaki elektronların valans bandından iletim bandına geçmeleri olanaksızdır. Valans ve iletim bantları üst üste binen katılara ise iletkenler adı verilir. Tüm metaller bu gruba girerler. Valans ve iletim bantları arasındaki yasak enerji aralığı yalıtkanlarda olduğu kadar geniş olmayan katılara da “yarı iletkenler” adı verilir. Yarı iletkenler, çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptirler. Bir yarı iletkende, valans bandındaki bir elektronun ısı uyarılmayla yasak enerji aralığını aşarak iletim

bandına çıkması sonucu, valans bandında bu elektrona karşılık sadece bir tane hol oluşur. Bu durumda elektron ve hol yoğunlukları birbirine eşit olacaktır.



**Şekil 1.21.** Konum grafiği

Enerji bantları tamamen dolu veya tamamen boş ise kristal yalıtkan gibi davranır, çünkü elektrik alan uygulandığında bant içinde boş yerler olmadığı için elektronlar hareket edemezler. İletim bandına geçen elektronlar valans bandında hol adı verilen boşluklar bırakırlar. Bunlar yükçe elektrona eşit, değeri ise pozitifdir. Yarı iletkenlerde elektriksel iletim, hem valans bandındaki holler hem de iletim bandındaki elektronlar ile oluşmaktadır. Buna göre, elektronların ve hollerin oluşturduğu akım yoğunluğu, kendi yükleriyle hızlarının çarpımına eşittir. E elektrik alanı uygulanan bir yarı iletkende elektronların ve hollerin oluşturduğu toplam akım yoğunluğu (J), formül 1.27 ile bulunur.

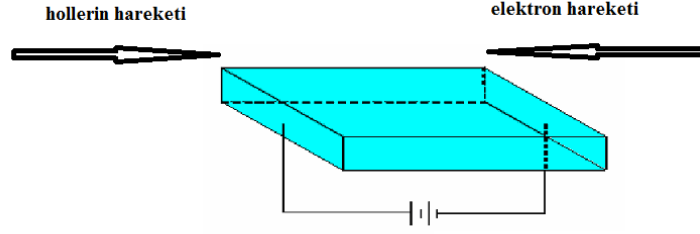
$$J = J_e + J_h = -en v_e + ep v_h \quad (1.27)$$

Burada ;

-  $e, n, v_e$  sırasıyla elektron yükünü, yoğunluğunu ve sürüklenme hızını,

+ $e, n, v_h$  sırasıyla hol yükünü, yoğunluğunu ve sürüklenme hızını göstermektedir.

Şekil 1.22, elektrik alanı uygulandığında bir yarı iletkenindeki elektronların ve hollerin hareket yönlerini göstermektedir. Elektronlar elektrik alanla ters yönde hareket ederlerken holler elektrik alan ile aynı yönde hareket ederler.



**Şekil 1.22.** Bir yarı iletkende elektrik alanının varlığında elektron ve hollerin hareket yönleri

Elektron teorileri genel olarak;

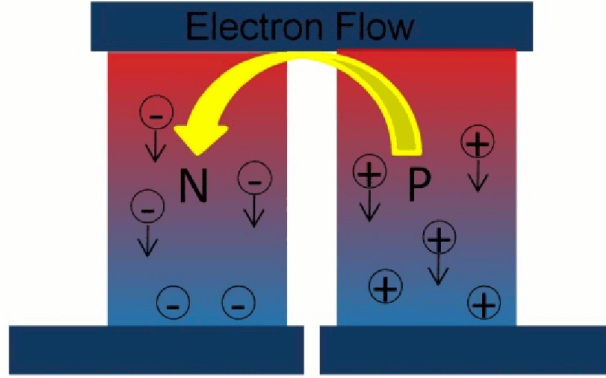
- Elektron gaz teorisi
- Serbest elektron teorisi
- Elektron band teorisi olarak 3 grupta incelenebilir.

Elektron gaz teorisinde elektronların tıpkı gaz atomları gibi davrandığı, serbest elektron teorisinde elektronların katı içerisinde serbest olarak hareket ettiği, band teorisinde ise elektronların katı içerisinde belli enerji seviyelerinde bulundukları ve seviyelerini değiştirme sureti ile iletkenliği sağladıkları esas alınmaktadır. Temel olarak iletken malzemelerin ısınması sonucu elektronların elektronca zengin bölgeden elektronca fakir olan bölgeye ilerlemesi ile elektriksel potansiyel üretmeleri prensibi üzerinden değerlendirilir [42].

N tipi elemanlar, kristal yapısı içerisinde serbest elektronun yarattığı negatif yükü sembolize etmektedir. N tipi malzeme içerisinde yük taşınımını bu elektronlar gerçekleştirmektedir. Malzeme içerisinde bol miktarda elektron hareket ederken, ısıyı da beraberinde taşımaktadır. Isı akımı elektron akımıyla beraber gerçekleşmektedir. P tipi elemanlar da valans elektronu bulunan katkı maddeleriyle kovalent bağ kurarken eksi yüklü iyon haline gelirler ve atomik yapıları içerisinde elektron boşlukları oluşur. Elektrik akımı bu delikler tarafından taşınır. Isı yükü, delik akımıyla aynı yönde gerçekleşir. N tipi elemanla bağlanınca ısıyı ters yönde iletirler.

Yalıtkan katıların içinde meydana gelen ısı iletiminde phononlar veya titreşimlerin nicel durumu önemli rol oynar. Bizmut antimon tellür termoelektrik ürünlerde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Bu malzeme araştırmacılar tarafından nano boyutlarda toz haline getirilene kadar ezilmiş ve tekrar (nanoparçalardan oluşmasına karşın) normal boyutlarında birleştirilmiştir. Yeniden birleştirilen bu karışımdaki damarlar ve rastgele

oluşumlar "phonon"ların malzeme içindeki geçişini önemli ölçüde yavaşlatmış, bu da ısıyı tutup elektriğin akışına izin vererek termoelektrik başarımı köklü biçimde değiştirmektedir.



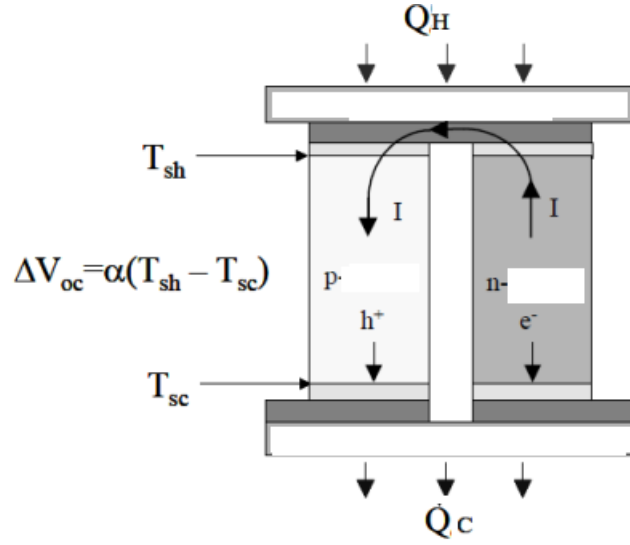
Şekil 1.23. P-n çiftinde elektron-yük taşıyıcı hareketleri

Bu olay yarı iletken ve metallerde serbestçe hareket yeteneğine sahip olan n tipi materyallerde elektronlar, p tipi materyallerde holler olarak bilinen yük taşıyıcılara dayanır [39].

TEJ sistemlerinin yüzeylerine farklı sıcaklıklar uygulandığı zaman p tipi yarı iletkende boşluklar, n tipi yarı iletken ise elektronlar şekilde gösterildiği gibi ısı kaynağından uzaklaşırlar. Elektron ve boşlukların oluşan bu hareketi elektrik akımına neden olur. Bu olayda akım yönü elektronların tersine olur. TEJ sisteminin performansı sadece modüllerin karakteristik özelliklerine bağlı değildir. Sıcaklık farkı, konvertör kullanımı ve yük durumu gibi faktörler sistemin performansı üzerinde etkilidir. Çünkü maksimum enerji transferi modül iç ve dış yükünün birbirine eşitlendiği zamanda meydana gelir.

Termoelektrik yapılar, termoelektrik jeneratörler ve soğutucular olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Termoelektrik jeneratörler ve soğutucular termodinamik kanunlarına bağlı olarak doğrudan enerji dönüşümlerini gerçekleştiren yapılardır. Termoelektrik jeneratörler ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yapılardır. Termoelektrik soğutucular ise ısıнын soğuk bölgeden sıcak bölgeye elektrik enerjisini kullanarak taşınmasını sağlayan ısı pompalarıdır. Buna ek olarak termoelektrik soğutucularda soğuk bölgeden sıcak bölgeye ısı transferinin gerçekleşmesi için dışarıdan bir iş uygulanması gereklidir. Termoelektrik jeneratörlerde ve soğutucularda yarı iletken malzemeler kullanılmakta ve kullanılan n ve p tipi yarı iletkenlerin ısı transferinde gösterdikleri tepkiler değişiklik göstermektedir. N ve p tipi bu iki yarı iletkenin birbirlerine

iletken bir malzeme ile bağlanması ile tek bir hücre oluşturulmuş olur. Bu hücrelerin birleştirilmesi ile termoelektrik modül oluşturulur.

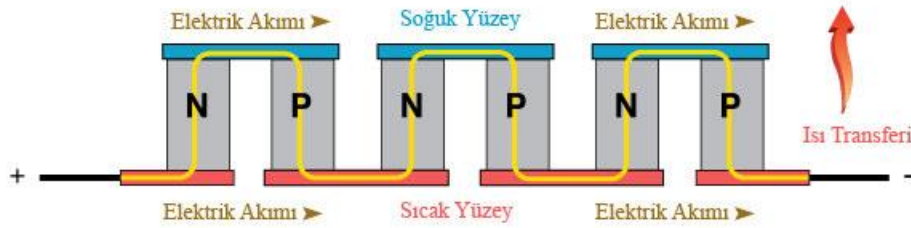


Şekil 1.24. Sıcaklık farkıyla oluşan elektron hareketliliği [40].

Termoelektrik enerji üretimi Seebeck etkisi optimize edilmiş özel yarı iletkenlerden oluşabilir. N tipi yarı iletken pelet bir voltmetreye bağlıdır. Isı peletin sıcak tarafından soğuk tarafına doğru hareket ettiği için, yük taşıyıcılar ısı ile birlikte hareket eder.

Termoelektrik güç üretiminde birlikte kullanılan p ve n tipi peletler şekil 1.24’de gösterilmiştir. Elektronların akışının delik akışının tersi yönünde olduğuna dikkat edilmelidir. Çok sayıda n ve p tipi peletler kullanılan sistemlerde elektriksel olarak seri, termal olarak paralel bağlama görülür. Termoelektrik modül farklı sayılarda n ve p tipi yarı iletken malzemeden oluşabilir. Elektriksel olarak seri, termal olarak paralel bağlanan bu termo elementler farklı boyut ve kapasitelerde farklı amaçlar için kullanılabilir. Termoelektrik modüller sadece soğutma veya ısıtma değil aynı zamanda elektrik üretiminde de kullanılabilirler. Bunun için yapılması gereken tek şey yüzeyler arasında yeterli sıcaklık farkı oluşturmaktır. Termoelektrik alanı, termoelektrik sistemlerde kullanılan malzemelerin de özelliklerinin anlaşılması ve katkılı yarı iletkenlerin iyi termoelektrik özellikler göstermesinin ardından hızlı bir gelişim süreci içine girmiştir. Termoelektrik endüstrisinin ilk ürünü  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  malzemesidir. Günümüzde değişik alanlarda kullanılan birçok farklı malzeme vardır. Son yıllarda Phonon-Cam/Elektron-kristal olarak bilinen malzemenin kullanılmasıyla nano düzeye inmenin yolu açılmıştır. Termoelektrik verimliliği arttırmak için daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi elektriksel iletkenliği arttırmak, termal iletkenliği düşürmek önemli bir etki oluşturmaktadır [41].

Termoelektrik elemanların yapısında p ve n tipi elemanlar bir dizi oluşturmak amacıyla birbirlerine ardışık olarak bağlanırlar. Bu bağlantı şeklinin temel amacı ısı ve elektrik akımının şiddetini arttırmaktır. Bu yapı içerisinde elektron akımı zikzaklar çizerek ilerlerken ısı akımı tüm yapıya dik olacak şekilde gerçekleşir [48].



Şekil 1.25. Seri bağlı p-n çiftinde akım yönü

Seebeck etkisi ile iletken bir çubuğun iki ucuna sıcaklık farkı uygulandığı zaman soğuk ve sıcak tarafları arasında elektrik akımı meydana gelir. Deney düzeneğinde kullanılan modüller bu prensibe göre düzenlenmiş ve çalıştırılmaktadırlar. İki farklı yarıiletken malzemenin (p-n çifti) birbirine seri olarak birleştirilmesiyle oluşturulan devrede yüzeylere farklı sıcaklıklar uygulanmak suretiyle bir elektrik gerilimi elde edilir. Bu gerilim “Seebeck voltajı” olarak da isimlendirilir [49-52].

#### 1.4. Termoelektrik Soğutucular (TES)

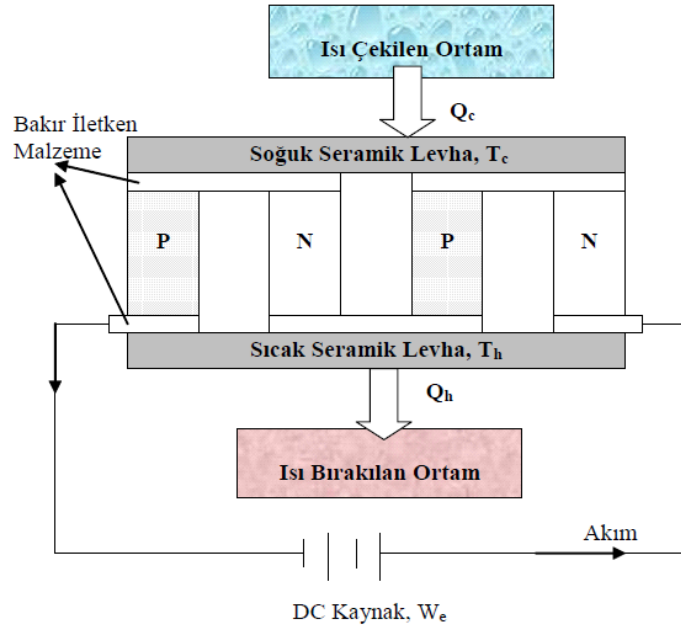
Termoelektrik soğutucular en az çevre sıcaklığında soğutma sıcaklık döngüsü ve sıcaklık kararlılığı gerektiren aletlerde katı fazda ısı pompaları olarak kullanılırlar. İki elektriksel yalıtkan olarak kullanılan seramik levhaların arasına konulan n- ve p-tipi yarı iletken termoelementlerden oluşan termoelektrik çevirici modüllerdir. Elektrik akımı modül boyunca geçerken ısı modülün bir yüzünde absorbe edilir ve buzdolabı gibi çalışan aletlerde olduğu gibi ısı diğer yüzden karşı yüzeye aktarılır. Aracın etkinliği genelde Carnot etkinliğinin yüzdesi olarak verilir. Şimdiki termoelektrik araçlar yaklaşık %10 Carnot etkinliği ile çalışırlar. Kompresörlerin etkinliği yaklaşık %30’dur ve boyuta göre yükselme gösterir. Termoelektrik soğutucular/buzdolapları, küçük boyutları, yüksek güvenilirlikleri, geniş çalışma sıcaklığı sınırları, düşük güç ihtiyacı ve hiçbir soğutucu veya sıvı gazın kullanılmaması gibi geniş uygulama çeşitliliği nedeniyle uygundur. Bunun yanında kızıl ötesi dedektörler, düşük frekans yükseltici ve bilgisayar çipleri gibi ısıya duyarlı elektronik aygıtlara noktasal soğutma sağlar. Termoelektrik modüllerin kullanımı

genelde en iyi çözümdür ve ısıнын idare edilmesi gereken sistemlerde ise tek çözüm yoludur. Her yönüyle hiçbir soğutma sistemi ideal değil ve her alet için termoelektrik modüllerin kullanımı uygun değilken, termoelektrik soğutucular alternatif teknoloji olarak daha büyük avantajlar sağlar.

Termoelektrik modüllerin en önemli bazı özellikleri şunlardır:

- Hareket eden parçaların bulunmaması: Termoelektrik modül hareket etmeyen parçası olmaksızın elektriksel olarak çalışabilir. Bu nedenle hemen hemen hiç bakıma ihtiyaç duymazlar.
- Küçük boyutları ve ağırlığı: Bütün termoelektrik soğutucu sistemleri diğer benzer mekanik sistemlere göre çok daha küçük ve daha hafiftir. Buna ek olarak, standartlarının çeşitliliği ve özel boyut seçenekleri ve konfigürasyonları tam olarak ihtiyaç duyulan aletin elde edilmesini sağlar.
- Çevre sıcaklığında soğutabilme özelliği: Konvansiyonel ısı tabakası sıcaklığı çevre sıcaklığının üstüne yükseltmek gerekirken termoelektrik soğutucular çevre sıcaklığı değerlerinin altında sıcaklık üretmek için aynı tabakaya bağlanır.
- Aynı modülle ısıtma ya da soğutma yapılabilmesi: Termoelektrik soğutucular uygulanan DA gücün polarlığına bağlı olarak ısıtır veya soğutur. Bu özellik verilen sistemde farklı ısıtma ve soğutma fonksiyonları sağlama ihtiyacından kurtarır.
- Kesin sıcaklık kontrolü: Yaklaşık sıcaklık kontrol çemberi sayesinde termoelektrik soğutucular  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 'den daha iyi kontrol sıcaklıklarına sahiptirler.
- Yüksek güvenilirlik: Termoelektrik modüller katı hal yapısında olduklarından yüksek güvenilirlik gösterirler. Güvenilirlik alete bağlı olsa da tipik termoelektrik soğutucuların ömrü 200.000 saatten daha fazladır.
- Elektriksel olarak sessiz çalışma: Mekanik soğutucu sistemlerine göre termoelektrik modüller hiçbir elektriksel ses üretmez ve duyarlı elektronik sensörler bağlanılarak kullanılabilirler.
- Her türlü yönlendirmede çalışma: Termoelektrikler her türlü yönlendirmede çalışabilirler ve yerçekimli ortamlara uyumludur. Böylece birçok uzay araçlarında kullanılabilir.
- Uygun güç kaynağı: termoelektrik modüller doğrudan DA güç kaynaklarında çalışırlar. Geniş giriş gerilim ve akım sınırlarına sahip modüller kullanılabilir. Sinyal genişliği modülasyonu birçok alette kullanılabilir.
- Nokta soğutma: Termoelektrik soğutucularla sadece belli bir parçayı veya alanı soğutmak mümkündür. Böylece geri kalan soğutulmaya ihtiyacı olmayan kısımlar soğutulmaz.

- Elektriksel güç üretebilme yeteneği: Termoelektrik soğutucuların yüzüne diferansiyel sıcaklık uygulayarak yani tersi şekilde kullanılırsa bir miktar DA güç elde etmek mümkündür.
- Çevreye duyarlılığı: Konvansiyonel soğutucu sistemleri kloroflorokarbonlar veya diğer kimyasallar kullanılmadan üretilemezler. Bu kimyasal maddeler çevreye zarar verebilirler. Termoelektrik aletler hiçbir tür gazı kullanmaz ve üretmez [53,54].



Şekil 1.26. Bir termoelektrik soğutucu modülü

Buzdolabında kullanılan dondurucu sıvının yerini, bir yarı iletken alabilir. Yoğuşturucu eleman da bir ısı transfer elemanı ile yer değiştirebilir. Ayrıca kompresörün yerini de doğru akım kaynağı alabilir. Termoelektrik modüle doğru akım kaynağının bağlanması, elektronların yarı iletken nesneden geçmesini sağlar. Maddenin soğuk tarafında, elektron hareketi sayesinde ısı soğurulur ve sıcak uca gönderilir. Sıcak olan uca ısı transfer elemanı bağlandığı için, ısı, ısı transfer elemanından çevreye verilir. Termoelektrik soğutucuların başlıca kullanım alanları mikroişlemciler, buzdolapları, gece görüş teçhizatları vb. olarak verilebilir. TES'ler özellikle yeni nesil bilgisayar işlemcilerinin soğutulmasında ve araç tipi buzdolaplarının yapımında kullanılır. Bağlantı uçlarına DA akım uygulandığı zaman, bir yüzey soğurken diğer yüzey ısınır. Elektrik güçlerine ve boyutlarına bağlı olarak çeşitli tip ve modellerde üretilirler. Sıcak yüzeyde, elektronların yüksek enerji seviyesindeki n-tipi yarı iletken elementten daha düşük bir enerji seviyesindeki p-tipi yarı iletken element üzerinde hareket etmesiyle bir ısı düşüşü

olur, böylece ısı enerjisi atılmış olur. Termoelektrik soğutucular ısı pompasıdır; hareketli parça, akışkan ve ya gaz içermez. Dışarıdan verilen elektriksel güç arttırılırsa, hareketli elektron sayısı da artacağından soğuk yüzey ile sıcak yüzey arasındaki ısı transfer miktarı da artacaktır. Eğer akım yönü ters çevrilirse, bu işlem tersine işleyecek ve sıcak yüzeyle, soğuk yüzey kendi arasında yer değiştirecektir. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkından dolayı modül elektrik üretmeye başlayacaktır [54].

Soğutucu modül içerisinde ortalama 100 adet veya daha fazla termoelement –mikro modül bağlantısı içerebilir. Termoelektrik modül ortalama olarak, yüzey alanı 2,5 ile 50 mm<sup>2</sup> ve yüksekliği de 2,5 ile 6 mm arasında olmaktadır. Bu düzenleme elektrik akımlarının her n ve p tipi elemanlarının alt üst tabaka boyunca ileri ve geri hareket etmesiyle sıcaklığın soğutucu boyunca tek yönde hareket etmesine sebep olur. N- tipi malzemedeki fazla elektronlar ve p- tipi malzemedeki elektron eksikliği ile meydana gelen boşluklar, ısı enerjisini termoelektrik modül boyunca taşınır. Isı akımın aktığı yönde hareket eder. Akımın yönünün değiştirilmesiyle ısı akım yönü değişeceğinden sıcak olan yüzeyde soğuma, soğuk olan yüzeyde de ısınma olacaktır. Termoelektrik modüle optimum akım uygulandığında soğuyan yüzey tarafında sıcaklık düşüşü maksimum olur. Bir termoelektrik modülün optimum akım şiddetinin değeri, termoelektrik modülün üretiminde kullanılan termoelektrik yarı iletken malzemelerin kalitesine, boyutlarına ve yapısal özelliklerine göre değişir. Bütün bunlar TES sistemler için geçerlidir [55].

#### **1.4.1. Termoelektrik Soğutucularda Kullanılan Malzemeler**

Termoelektrik soğutucunun etkinliği kullanılan malzeme ile yakın bir ilişki halindedir. Termoelektrik soğutucularda p ve n tipi termo elemanlarda kullanılan yarı iletken malzemeler, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, PbTe, SiGe ve BiSb gibi alaşımlardır. Bizmut Teleryum, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, yüksek termoelektrik etkinliği ve uygun sıcaklık aralığı nedeniyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Alt ve üst plakalarda seramik malzeme kullanılır. Böylece ısı iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık ve mekanik mukavemet sağlanır. Termo elemanları birbirine bağlayan iletken malzeme olarak bakır veya alüminyum gibi ısı iletkenliği yüksek malzemeler kullanılmaktadır [54].

## **1.5. Termoelektrik Güç Ekipmanları**

### **1.5.1. Termoelektrik Modül**

Genelde ticari olarak üretilen TEJ'ler n ve p tipi yarı iletken, elektrik iletkenleri, elektrik yalıtkanları ve seramik yüzeylerden oluşur. TEJ'in iki farklı yüzeylerine farklı sıcaklıklar uygulandığında, termoelektrik etkisi nedeniyle elektrik akımı indüklenir. Herhangi bir termoelektrik cihazı oluşturan modülün temelinde bir termoelement-mikro modül bulunur. Bir mikro modül iki seramik dilim arasına p ve n tipi yarı iletken malzeme birbirine elektriksel olarak seri, termal olarak paralel olacak şekilde sıkıştırılarak monte edilir. Bu tabakalar mekanik olarak bütün yapıyı bir arada tutmaya ve ayrı elementlerin elektriksel olarak birbirine ve dış bağlantı yüzeylerinden yalıtılmasına yardımcı olur [57].

### **1.5.2. Isı değıştiriciler**

Genelde çok ısı üreten, yarı iletken elemanlara takılırlar. Kullanılan malzeme genelde alüminyum ya da bakır malzemelerdir. Isı dağıtıcılarının iki temel işlevi vardır. Bunlardan ilki, ısı üreten malzemenin üzerine takıldığı için üretilen ısının bir kısmını emmektir. Isı dağıtıcıların ikinci işlevi ise, soğutucu ile temas yüzeyini artırarak ısı transferini arttırmaktır. Bakır; alüminyuma göre ısıyı daha iyi ileten bir metaldir. Bu nedenle ısı dağıtıcının, en sıcak bölümü ile en soğuk bölümü arasında, alüminyum ısı dağıtıcılara göre çok daha az sıcaklık farkı vardır. Bakırın, alüminyuma göre en büyük dezavantajı özgül kütlesinin çok daha büyük olmasıdır. İyi bir ısı dağıtıcısı geniş bir yüzey alanına sahip ve hafif olanıdır. Özellikle sıcak yüzeye temas eden bölüm bakır olmalıdır. Isı boruları sistemin performansını artıracak için bol miktarda olmalıdır. Sıvıların ısı iletimi havaya göre daha yüksektir. Bu nedenle sıvı soğutma çözümleri hava soğutma çözümlerine göre daha yüksek performans sağlarlar [56].

### **1.5.3. DA/DA dönüştürücüler**

Bu çeviriciler ayarlanmış anahtarlamalı DA-DA kaynaklarında ve DA motor sürücü uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu çeviricilerin girişinde hat geriliminin doğrultulmasıyla elde edilmiş, genellikle ayarsız doğru gerilim bulunmaktadır. Bu nedenle girişte, hat gerilimindeki değışimlerin sonucunda iniş çıkışlar meydana gelir. Anahtarlamalı DA-DA çeviriciler, ayarsız DA girişini istenilen gerilim kademesinde kontrollü DA çıkışına çevirmek için kullanılırlar. Bu çeviricilerin uygulamalarına bakılırsa,

bir yalıtım transformatörü ile anahtarlama güç kaynaklarında ve DA motor sürücü uygulamalarında kullanıldığı görülebilir. Genel olarak;

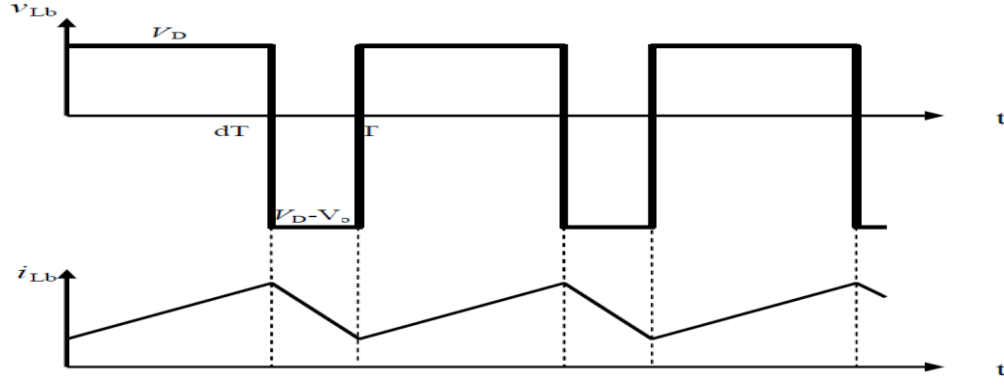
1. Alçaltıcı çevirici
2. Yükseltici çevirici
3. Alçaltıcı -Yükseltici çevirici
4. Cuk çevirici
5. Tam köprü çevirici

Tipte dönüştürücüler mevcuttur [42].

TEJ'ler için, elde edilen gerilim modül yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılı olarak değiştiğinden, çıkışına sabit gerilim isteyen algılayıcıları bağlamak mümkün olmamaktadır. Bu tür algılayıcıları bağlayabilmek için DA-DA çeviricilere ihtiyaç duyulur [57].

DA-DA dönüştürücülerin tasarımında verim ve düzenleme gibi iki önemli durum vardır. Dönüştürücülerin fonksiyonları boyunca güç tüketen parasitik dirençler veya rezistif bileşenler bulunduğu için verimlilik sorunu da ortaya çıkabiliyor. Yani bir başka deyişle verimlilik asla %100 olamamasına rağmen, dönüştürücünün etkisini optimize etmek gerekir. Bu dönüştürücülerin temel prensibi elektrik bileşenlerinde depolanma içerir. Enerji depolama ve bırakma süresi kontrol edilerek, ortalama gerilim seviyesi ortaya çıkar. Ortalama yük voltajı güç kaynaklarının voltaj seviyesinden yüksek ya da daha düşük olabilir. Enerjinin depolama ya da serbest bırakma dönemi anahtarlama cihazları tarafından gerçekleştirilir. Günümüzde bu dönüştürücülerde kullanılan yaygın anahtarlama cihazları transistördür. Gerilim düşüren dönüştürücüler giriş geriliminden daha küçük voltaj gerilimi sağlarken, boost tipi yükselten dönüştürücüler giriş geriliminden daha düşük voltaj sağlayabilir.

Yükselten devrenin sürekli akımla çalışması durumunda endüktör üzerindeki akım ve gerilim değişimi Şekil 1.27'de verilmektedir. Devredeki anahtarın iletme sokulmasıyla yüklenmeye başlanan endüktörde biriken enerji, anahtarın tıkamaya sokulmasıyla yüke doğru aktarılır. Devrenin girişindeki endüktans genelde yüksek değerli olup giriş akımının sürekli olmasına yardım eder. Giriş akımının sürekli olması nedeniyle bu tür devreler düşük akım dalgalanmasına izin veren kaynakların çıkış gerilimlerinin yükseltilmesinde tercih edilirler.



Şekil 1.27. Endüktör üzerindeki Akım-gerilim ilişkisi

Şekil 1.27’de gösterilen endüktör geriliminin ortalama değerinin sürekli durumda sıfır olacağı koşulundan hareketle dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişki denklem 1.28’de ki gibi hesaplanır.

$$V_o = \frac{1}{1-d} V_s \quad (1.28)$$

Bu eşitlikte,  $V_o$  çıkış gerilimini,  $V_s$  giriş gerilimini,  $d$  anahtarın doluluk oranını (duty cycle) gösterir.

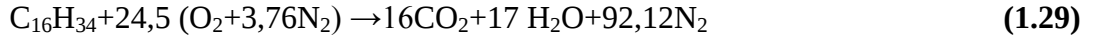
Yükseltici DA-DA dönüştürücüler var olandan daha yüksek bir DA düzey elde etmek amacıyla çeşitli uygulamalarda kullanılır. Giriş gerilimi bazen bir batarya, bazen bir yenilenebilir enerji kaynağı (güneş paneli, yakıt hücresi), bazen de doğrultulmuş şebeke gerilimidir. Yenilenebilir enerji kaynakları veya bataryalarla birlikte kullanıldıklarında genelde 12 V civarında bir gerilimi 40-50 V düzeylerine çıkartmaları amaçlanır [42, 58,59].

## 1.6. Taşıtlarda Atık Enerji Hesaplamaları

### 1.6.1. Egzoz Gazlarının Termofiziksel Özellikleri

Termoelektrik sistem ve egzoz sistemi hesaplamalarına geçmeden önce egzoz gazının farklı sıcaklıklardaki termofiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekir. İçten yanmalı motorlarda kullanılan petrol kökenli yakıtların kimyasal ve yanma denklemlerinden yararlanılarak egzoz gazı termofiziksel özellikleri hesaplanabilir.  $C_nH_m$  formülüne sahip yakıtın tam yanması için gerekli hava miktarı, ürün ve reaktantlara ait farklı atom

dengesiyle hesaplanabilir.  $C_{16}H_{34}$  kimyasal formülüne sahip olan motorin için hava ile stokiyometrik yanmasıyla oluşturulan denklem aşağıdaki gibidir.



bu durumda hava/yakıt oranı hesaplanırsa

$$H/Y = 24,5 \cdot (32 + 3,76 \cdot 28) / 16 \cdot 12 + 34 \cdot 1 = 14,8 \text{ ( kg Hava / kg Yakıt)}$$

Motorlarda bütün çalışma şartlarında stokiyometrik karışım hazırlamak mümkün değildir. Motorun çalışma şartlarına göre karışım zenginleşebilir veya fakirleşebilir. Kısacası içten yanmalı motorlarda çalışma şartlarına bağlı olarak bu değer geniş sınırlar arasında değişebilir. Teorik olan hava miktarlarından daha fazla hava kullanılsa da eksik yanmadan söz edilebilir. Yakıt ile havanın iyi bir karışım oluşturmaması, yanma için ayrılan süre, türbülans seviyesinin yetersiz olması eksik yanmaya işaret eder. Bu olayların meydana gelmesi yakıt enerjisinin bir kısmının kayıp olması anlamına gelir. Oluşan yanma verimi aşağıdaki formül ile bulunur.

$$\eta_y = \frac{H_u - Q_e}{H_u} \quad (1.30)$$

$\eta_y$ : Yanma verimi

$H_u$ : Yakıt alt ısı değeri (kJ/kg)

$Q_e$ : Belirli bir sıcaklık için Yanma entalpisi (kJ/kg)

Yakıtın yanma denklemine göre egzoz gazının termofiziksel özellikleri aşağıdaki formüllerden bulunabilir.

Egzoz gazının özgül ısısı,

$$C_{p_{egzoz}} = \frac{\sum M_i \cdot n_i \cdot C_{p_i}}{\sum M_i \cdot n_i} \quad (1.31)$$

Egzoz gazının yoğunluğu,

$$\rho_{egzoz} = \frac{\sum M_i \cdot n_i \cdot \rho_i}{\sum M_i \cdot n_i} \quad (1.32)$$

Egzoz gazının dinamik viskozitesi,

$$\mu_{egzoz} = \frac{\sum M_i . n_i . \mu_i}{\sum M_i . n_i} \quad (1.33)$$

Egzoz gazının kinematik viskozitesi,

$$\gamma_{egzoz} = \frac{\sum M_i . n_i . \gamma_i}{\sum M_i . n_i} \quad (1.34)$$

Egzoz gazının ısı iletim katsayısı,

$$k_{egzoz} = \frac{\sum M_i . n_i . k_i}{\sum M_i . n_i} \quad (1.35)$$

burada, M egzoz gaz bileşeninin kütesini, n mol sayısını, i indisi temsil eder. Bu denklemler kullanılarak farklı sıcaklıklara sahip olan egzoz gazlarının termofiziksel özelliklerini bulmak mümkündür. Yapılan kabuller neticesinde Tablo 1.4’de dizel motoruna ait yanma sonu egzoz gazlarının termofiziksel özellikleri yer almaktadır [60].

**Tablo 1.4.** Farklı sıcaklıklara sahip egzoz gazlarının termofiziksel özellikleri

| Sıcaklık<br>(K) | Cp<br>Özgül Isı<br>(kJ/kg.K) | $\rho$<br>Yoğunluk<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Dinamik<br>Viskozite<br>(N.s/m <sup>2</sup> ) | Isıl<br>İletkenlik<br>(W/m.K) | Kinematik<br>Viskozite<br>(m <sup>2</sup> /s) | Pr    |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|-------|
| 400             | 1106                         | 0.912                                      | 207.11                                        | 23.6                          | 30.4                                          | 0.751 |
| 450             | 1114                         | 0.810                                      | 226.3                                         | 29.1                          | 33.8                                          | 0.745 |
| 500             | 1126                         | 0.729                                      | 245                                           | 35                            | 37.2                                          | 0.741 |
| 550             | 1140                         | 0.662                                      | 262.6                                         | 36.6                          | 40.3                                          | 0.742 |
| 600             | 1070                         | 0.607                                      | 279.5                                         | 48                            | 43.6                                          | 0.686 |

Daha önceki bölümlerde değinildiği gibi yakıttan elde edilen enerjinin en fazla %35-40’lık kısmı motorda kullanılabilmekte, geriye kalan %60-65’lik kısmı egzoz gazı, soğutma ve diğer kayıplar olarak çevreye atılmaktadır. Atılan bu kayıplar içerisinde egzoz gazının oranı motor tipine göre değişmekle birlikte %35 civarında bir rakama tekabül eder. Kullanılacak olan alternatif bir sistem ile atık enerjinin geri dönüşümü söz konusu olabilir. Egzoz gazının ısıl kapasitesini bulmak için egzoz gazı debisinin bilinmesi gerekir. Egzoz gaz debisi aşağıdaki denklemden;

$$m_{egzoz} = m_{yakıt} + m_{hava} \quad (1.36)$$

bulunabilir. Motor deneyleri gerçekleştirilirken yakıt miktarı ölçülebilir. Aynı zamanda hava miktarı da hesaplanan hava/yakıt oranına göre bulunabilir. Egzoz gazı debisi hesaplandıktan sonra egzoz gazı ideal ısı transfer kapasitesi, egzoz gazı sıcaklığının jeneratör soğutma sistemi tarafından bir miktar düşürülebileceği varsayılarak hesaplanabilir [43,60].

## 1.7. Isı Transfer Hesaplamaları

### 1.7.1. Egzoz Gazı İdeal Isı Transfer Kapasitesi

Mühendislik uygulamalarında en önemli ve en çok karşılaşılan konulardan birisi, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı transferidir. Sözü edilen akışkanlar genellikle katı bir cidar ile birbirinden ayrılmaktadırlar. Termoelektrik jeneratör sisteminin daha etkili ve verimli çalışabilmesi için termoelektrik sistemin soğutma etkinliğinin artırılması gerekir.

Birbirine paralel yönde iki akışın söz konusu olduğu TEJ sistemi iç içe merkezli eşanjör olarak da düşünülebilir. Farklı sıcaklıklarda akışkanları barındıran bu sistem ile termoelektrik modüller yardımıyla faydalanmak mümkündür. Isı değiştirici sistemlerden temel farkı hatta en önemlisi modüllerin varlığıdır. Bu nedenle oluşan ısı hesaplamaları birbirine paralel akış yapan sistemlere göre hesaplanabilir.

Egzoz gazlarının sahip olduğu ısı enerjisi denklem 1.38’de verilmiştir.

$$Q_{eg} = m_{eg} \cdot C_{peg} \cdot \Delta T_{id} \quad (1.37)$$

Burada ;

$Q_{eg}$ :Egzoz gazı ideal ısı transfer kapasitesi [W]

$m_{eg}$ :Egzoz gazı debisi [kg/s]

$C_{peg}$ :Egzoz gazının özgül ısısı [j/kgK]

$\Delta T$ : Egzoz gazının sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Enerji dengesinden,

$$Q_{\text{sistem}} = k \cdot A \cdot DT_{\text{in}} = m_{\text{eg}} \cdot C_{p\text{eg}} \cdot DT_{\text{eg}} \quad (1.38)$$

Burada;

$Q_{\text{sistem}}$ : Egzoz gazından elde edilen ısı miktarı [W]

$k$  : Toplam ısı transfer katsayısı [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

$A$ : Isı transfer yüzey alanı [ $\text{m}^2$ ]

$DT_{\text{in}}$ : Logaritmik sıcaklık farkı [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$m_{\text{eg}}$ : Egzoz gazı debisi [ $\text{kg}/\text{s}$ ]

$C_{p\text{eg}}$ : Egzoz gazının özgül ısısı [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]

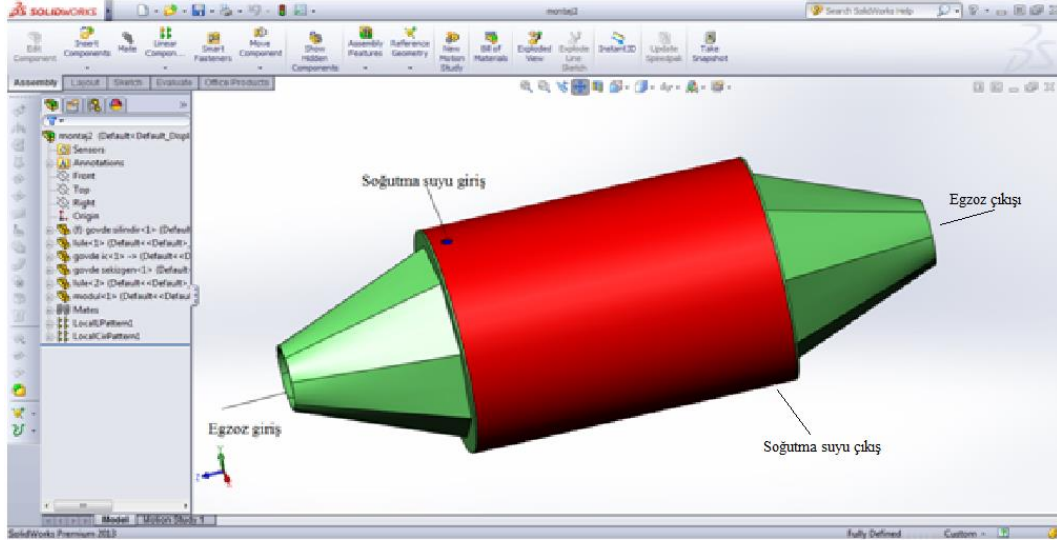
$DT_{\text{eg}}$ : Egzoz gazının giriş ve çıkış sıcaklık farkı [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Dairesel kesitli borular için verilen denklemlerde  $\phi$  yerine, aşağıda tanımı verilen Hidrolik  $\phi$  (Eşdeğer  $\phi$ ) kullanılarak çözüme gidilir.

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{U} = 4 \cdot \left( \frac{\text{Akışın geçtiği Alan}}{\text{Islak Çevre}} \right) \quad (1.39)$$

Reynolds sayısının tanımlanmasında ortalama akış hızı önemlidir. Akış oranı ısı transfer katsayısı için akış kanalının geometrik özellikleri akış özellikleri ve akış değerlerine göre bulunabilir [60,61].

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A \cdot u \text{ ise } u = \frac{m_{\text{eg}}}{\rho \cdot A_{\text{eg}}} \quad (\text{m/sn}) \quad (1.40)$$



**Şekil 1.28.** Deneysel çalışmada kullanılacak sistemin 3 boyutlu görünümü

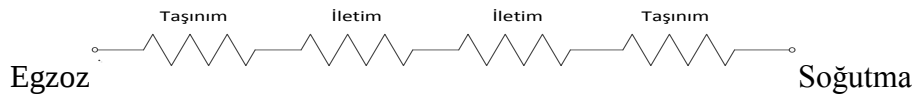
Şekilde yer alan jeneratör sistemimiz katı bir duvar ile ayrılmış iki akışkanın akışını içerir. Isı, önce egzoz gaz akışkanından iç duvara taşınım, duvar iç yüzeyinden dış yüzeyine iletim, modüller boyunca tekrar bir iletim ve modüllerden soğuk akışkana ise tekrardan taşınım yaparak transfer edilir. Bu ısı transfer işlemine ilişkin ısıl direnç ağı Şekil 1.29’da görülmektedir. Burada  $i$  ve  $0$  indisleri, içteki borunun iç ve dış yüzeylerini belirtir. Çift borulu bu sistemin ısıl direnç,

$$R_{\text{duvar}} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi kL} \quad , \quad R_{\text{taş}} = \frac{1}{(2\pi rL)h}$$

olur; burada  $k$  duvar malzemesinin ısı iletkenliği ve  $L$  borunun uzunluğudur. Bu durumda termal bağlantı elemanı olan macun ihmal edilirse toplam ısıl direnç,

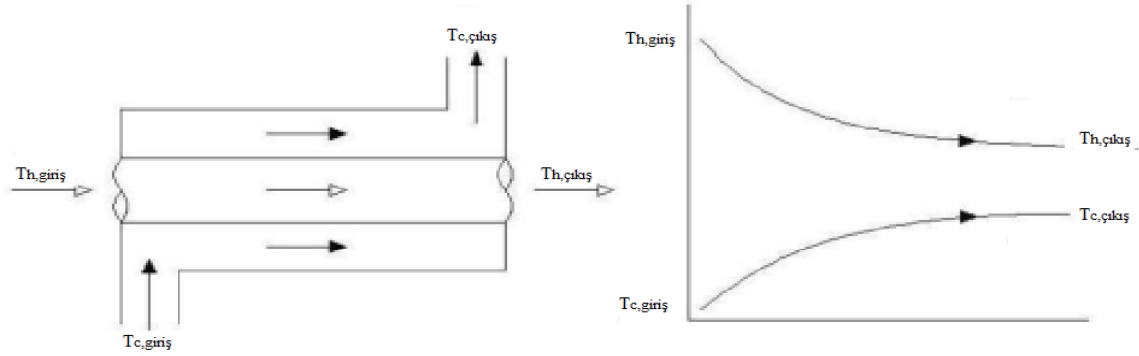
$$R = R_{\text{toplam}} = R_i + R_{\text{duvar}} + R_{\text{modül}} + R_o \quad (1.42)$$

olur; oluşan toplam ısıl direnç ağı ise şekilde gösterilmektedir.



**Şekil 1.29.** Toplam ısıl direnç ağı

Egzoz gazları ve soğutma sıvısından oluşan akışkanlar, jeneratör sisteminin bir ucundan girip aynı doğrultuda paralel akış sergilemektedirler.



**Şekil. 1.30.** Isı değiştirici sistemdeki akış yönü ve sıcaklık değişimi

Bu sistemde sıcak olan akışkan sekizgen iç borudan akmaktadır. En dış katmanda bulunan silindir ve sekizgen cidar arasında ise soğutucu akışkan dolaşmaktadır. İki akışkanın akışkanları birbirine karışmaksızın sıcak olan akışkandan ısı enerjisi, soğuk olan akışkana geçecektir. Sıcak olan akışkandan soğuk olan akışkana olan ısı geçişini hesaplamak için kullanılan parametrelerin tanımlanması gerekir. Çevreye olan ısı kaybı, potansiyel ve kinetik enerjilerdeki değişimler ihmal edilmiştir. Ayrıca faz değişiminin olmadığı ve özgül ısıların sabit kaldığı kabul edilmiştir. Bu şartlara sahip bir ısı değiştiricisi için:

$$q = A \cdot U \cdot DT \quad (1.43)$$

Burada;

U : toplam ısı geçirme katsayısı

$\Delta T$  : ortalama sıcaklık farkı

A : ısı transferi yüzey alanı

Toplam ısı geçişi hesaplanırsa;

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (1.44)$$

Burada;  $\Delta T_{LM}$  logaritmik sıcaklık farkını ifade etmektedir. Paralel akışlı bu sistemde,

$$\nabla T_1 = T_{h, \text{giriş}} - T_{c, \text{giriş}} \quad (1.45)$$

$$\nabla T_2 = T_{h, \text{çıkış}} - T_{c, \text{çıkış}} \quad (1.46)$$

denklemleri elde edilir. Toplam ısı transfer katsayısı,

$$U = \frac{Q}{A \cdot \nabla T_{LM}} \quad (1.47)$$

Hausen tarafından laminar akış ve sabit ısı akışı hesaplamaları:

$$\frac{hd_H}{\lambda_f} = Nu_f = 4,65 + \frac{0,19 \cdot (Re_f \cdot Pr_f \cdot \frac{d_H}{L})^{0,8}}{1 + 0,117 \cdot (Re_f \cdot Pr_f \cdot \frac{d_H}{L})^{0,467}} \quad (1.48)$$

Sürtünmeden oluşan ısı kaybı hesaplamaları için sürtünme faktörü:

$$\xi_f = \frac{64}{Re_f} \quad (1.49)$$

$$Re_f < 2300, Re_f = \frac{d_h \cdot u_f}{\nu_f} \quad (1.50)$$

Gnielinski tarafından türbülanslı akış katsayılar:

$$\frac{hd_H}{k} = Nu_f = \frac{(Re_f - 1000) \cdot Pr_f \cdot \frac{\xi_f}{8}}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi_f}{8}} \cdot (Pr_f^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_H}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \quad (1.51)$$

$$\xi_f = \frac{1}{(1,82 \cdot \log(Re_f) - 1,64)^2} \quad (1.52)$$

$$Re_f > 2300, Re_f = \frac{d_h \cdot u_f}{\nu_f} \quad (1.53)$$

$Nu_f$  Nusselt sayısı,  $Re_f$  Reynolds sayısı ve  $Pr_f$  Prandtl sayısıdır. Karakteristik ölçüt  $d_h$ ,  $u_f$  ortalama akış hızı,  $\nu_f$  kinematik viskozite ve  $k$  ise ısı iletim katsayısıdır [61,62].

### 1.7.2. Türbülans modelleri

Bütün problemlerin çözümünde kullanılacak ortak bir türbülans modeli mevcut olmadığından, akışkanların sayısal olarak incelenmesinde kullanılacak türbülans modelinin seçimi, sonuçlardan alınması istenilen doğruluk derecesi ve hassasiyet göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Fluent aşağıdaki türbülans modellerinin kullanımını sağlar.

1. Spalart-Allmaras Modeli,
2. k- $\epsilon$  Modelleri,
  - Standart k- $\epsilon$  Modeli,
  - Renormalization- Group ( RNG) k- $\epsilon$  Modeli,
  - Realizable k- $\epsilon$  Modeli,
3. k- $\omega$  Modelleri,
  - Standart k- $\omega$  Modeli,
  - Kayma Gerilmesi Transport (SST) k- $\omega$  Modeli,
4.  $u^2 - f$  Modeli,
5. Reynolds Gerilim Modeli (RSM),
6. Large Eddy Simulation (LES) modeli,
7. Ayrılmış Eddy Simülasyon Modeli DES modeli.

Spalart-Allmaras modeli oldukça basit bir denklemdir. Spalart-Allmaras modeli duvar sınır akışlarını içeren uzay uygulamaları için tasarlanmıştır ve zıt basınçlı gradyanlarına uğrayan sınır tabakalar için iyi sonuçlar verir.

Standart k- $\epsilon$  türbülans modeli iki ayrı taşınım denkleminin çözümüne imkan vermek suretiyle türbülans hız ve uzunluk ölçeğini saptamaya izin veren en basit ve temel iki denklemlili türbülans modelidir. Standart k- $\epsilon$  türbülans modelinde akış tümüyle türbülanslı kabul edilir ve moleküler viskozitenin etkisi ihmal edilir. Bu nedenle standart k- $\epsilon$  türbülans modeli yalnızca tam türbülanslı akışlar için geçerlidir.

RNG k- $\epsilon$  modeli ise geniş istatistiksel teknikler kullanılarak çıkarılmıştır. Temelde standart k- $\epsilon$  türbülans modeline benzemekle beraber aşağıdaki yenilikleri içerir.

- Kinetik enerji denkleminde hızlı değişiklik gösteren akışkanlar için daha fazla doğruluk imkanı sağlayan ek terimleri barındırır.
- Dönmenin türbülans üzerindeki etkisi RNG modelinde göz önüne alınmıştır.

- Türbülans Prandtl sayısı için analitik ifade sağlar,  $k$ - $\epsilon$  modelinde olduğu gibi sabit olmaz.
- Standart  $k$ - $\epsilon$  türbülans modeli yüksek Reynolds sayılı türbülans modeli iken, RNG  $k$ - $\epsilon$  türbülans modeli düşük Reynolds sayılı akışlarda söz konusu olan efektif viskozite için analitik olarak çıkarılmış diferansiyel formüller sağlar.

Realizable  $k$ - $\epsilon$  türbülans modeli ise standart  $k$ - $\epsilon$  türbülans modeline kıyasla daha yeni ve aşağıda verilen özelliklerden dolayı standart  $k$ - $\epsilon$  türbülans modelinden farklı bir türbülans modelidir. Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Türbülans viskozitesi için yeni bir formülasyon içerir.
- Türbülans kinetik enerjisi kaybı ( $\epsilon$ ) denklemi için yeni yaklaşım içermektedir.

Reynolds gerilme türbülans modeli (RSTM ) en açık ve ayrıntılı türbülans modelidir. RSTM türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı ile beraber Reynolds gerilmeleri için taşınım denklemlerini çözerek Reynolds-ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini kapar.

Standart  $k$ - $w$  modeli yaygın olarak kullanılan  $k$ - $\epsilon$  modelinin bir farklı çeşididir. Özellikle Reynolds sayıları 10000'den düşük türbülanslı akışlarda etkin ve doğru sonuçlar vermektedir. Standart  $k$ - $w$  modeli temel taşınım denklemlerindeki  $k$ -türbülansın kinetik enerji ve  $w$ -özellik yayılım oranı ile ifade edilir. Bu model kullanılarak momentum ve enerji denklemlerinde verilen türbülans terimleri çözdürülmektedir [63,64,65].

### 1.8. Enerjinin Geri Kazanımı Alanında Yapılan Çalışmalar

Egzoz gazlarının enerjisi kullanılarak enerjinin geri dönüşümünün sağlanması taşıtlar için büyük önem taşımaktadır. Nitekim bu alanda yapılan çalışmalar son zamanlarda daha da artmaktadır. Motor egzoz gazı üzerine yapılan bu sistemler absorpsiyonlu soğutma sistemleridir. Çalışılan bu yapıda LiBr/su akışkan çifti kullanılmıştır. 1.3 litrelik 4 silindirli motor için tasarımı ve imalatı yapılan soğutma sisteminin motor verimine ve soğutma kapasitesine etkisi dikkat çekmiştir. Ancak deney sonuçlarında motor egzoz sistemine monte edilen soğutma sisteminin motorda geri basınç oluşturduğu ve beraberinde yakıt sarfiyatında bir miktar artışların olduğu yapılan deneyler sonucunda belirtilmiştir. Ayrıca egzoz gazlarından çekilen enerji miktarının artmasıyla

soğutma sisteminin kapasitesinin arttığı görülmüştür. Aşağıda verilen bağıntı, motor performansı üzerine geri basıncın etkisini belirlemede kullanılır.

$$W = \frac{\Delta P \cdot m}{\rho} \quad (1.54)$$

Burada,  $W$  güç kaybı,  $\Delta P$  egzoz manifoldu geri basıncı,  $m$  egzoz gazlarının kütleli debisini ve  $\rho$  egzoz gazlarının yoğunluğunu göstermektedir. Böylece güç kaybı geri basınç ile hesaplanmıştır [66].

Egzoz gazları tarafından ısıtılan LPG yakıtlı motor sistemi mevcut motorun soğutucu akışkanı tarafından ısıtılan LPG yakıtlı motor sistemlerine alternatif ve özellikle hava soğutmalı motorlarda LPG yakıtının verimli bir şekilde kullanılmasına müsaade eden bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Klasik su soğutmalı içten yanmalı motorlarda yüksek basınç altında sıvı faz da bulunan LPG yakıtı bir regülatör yardımıyla sıcaklığı artırılarak silindirlere gönderilir. Egzoz manifoldu çıkış borusunun dış kısmına bağlantısı yapılmış hacimsel LPG yakıtının ısı eşanjörüne giriş sıcaklığı 20 °C çıkış sıcaklığı ise ortalama 150 °C, egzoz gaz sıcaklıkları ise giriş kısmında 800 °C, çıkış kısmında ise ortalama 450 °C olarak ölçülmüştür. Klasik su soğutmalı içten yanmalı motorların LPG sisteminde motor suyunun belirli sıcaklığa erişmesi söz konusudur. Atık egzoz gazları kullanılarak ısıtılmış LPG yakıtı bu dezavantajı ortadan kaldırarak yakıt sarfiyatının azalmasına yol açmıştır [67].

Egzoz gaz enerjisinin kullanıldığı bir başka sisteme ise sıklıkla karşılaşılan aşırı doldurmalı motorlardır. Bu sistemler motor emme havasını atmosfer basıncı üstünde sıkıştıran doldurucu ünitesi ve bu doldurucuya hareket veren bir tahrik ünitesinden oluşur. Bu tahrik ünitesi çalışma mekanizması bakımından üç ana grup altında toplanır.

1-Mekanik tahrikli aşırı doldurma

2-Egzoz türbini ile aşırı doldurma

3- Basınç dalgaları ile aşırı doldurma

Egzoz türbini ile aşırı doldurma sistemi egzoz gazlarının enerjisiyle çalışır. Aynı mil üzerinde çalışan tahrik türbini ve kompresör çarkı birlikte çalışırlar. Egzoz gazlarının enerjisi türbin yardımıyla kompresöre güç sağlamak amacıyla kullanılır [68].

Atık ısının geri kazanımı alanında yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Motorda yanma sonucunda açığa çıkan enerjinin büyük bir kısmı soğutma ve egzoz sistemleri ile birlikte atmosfere atılır. Ancak unutulmamalıdır ki ısı enerjisinin açığa çıktığı bir başka sistem ise fren sistemidir. Frenleme esnasında disk ile balata arasında sürtünmeden doğan ısı enerjisi de taşıtlardaki atık ısıyı oluşturmaktadır. Enerjinin geri kazanımında önemli gelişmeler gösteren bu teknoloji taşıtlardaki fren sisteminde de karşımıza çıkmaktadır. Fren sistemlerinden enerjinin geri dönüşümünün termoelektrik sistemlerle gerçekleştirebileceğini gösteren Alpcon ve Aalborg üniversitesi araştırmacıları bu konuda bir takım araştırma ve yeni uygulamalar geliştirmişlerdir. İlk olarak fren balatası üzerindeki bir takım sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir.



Şekil.1.31. TEJ fren balatası

TEJ sistemi ile birlikte tasarlanan fren balatasının Şekil 1.31’de görülmektedir. Isı kaynağı olarak TEJ’nin sıcak yüzeyini bakır oluşturmaktadır. Diğer taraftan TEJ’nin soğuk kısmında ise ısı emici demir malzemesi kullanılmıştır. Balata yüzeyine nazaran ısı emici olarak demir blok kullanımı sıcak yüzey ile soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkını bir miktar artmıştır. Çalışmada 30, 50 ve 70 km/h hızlarda yapılan ani frenlemelerde değerler kaydedilmiştir. Nitekim TEJ’nin iç direnci zamanın bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Çünkü jeneratörde meydana gelen sıcaklık artışı iç direnç değerinin artmasına neden olur. Maksimum güç üretimi için bağlanan direncin TEJ’nin iç direncine eşit olması gerekir. Bu nedenle değişken direnç kullanımı en doğru yoldur. 300 ile 400 °K arasında 1’den 200 ohm değerine kadar lineer artış gösteren TEJ’nin iç direnci görülmektedir. Yapılan deneylerde enerjisinin geri dönüşüm miktarının düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. 90 saniye

boyunca ortalama güç üretimi 0,19 mW değerindedir. Bu oluşum çıkış gerilim değerinin düşük seviyelerde olmasından kaynaklanmaktadır [69].

Atık ısıdan termoelektrik modülleri ile elektrik enerjisi elde edilmesinde maksimum verim almak için termoelektrik jeneratörlerin iç direnciyle yük direncinin birbirine eşit olması gereklidir. Modüllerin üretim teknolojisi ve güç elektroniğindeki değişimler nedeniyle bu modüllerin etkinlikleri her geçen gün artmaktadır. Nitekim bazı alanlarda yapılan çalışmalarda bunun bir kanıtı olarak söylenebilir. Örneğin termoelektrik jeneratörlerin evsel ve saha uygulamalarını görmek mümkündür. İzlanda'da termoelektrik jeneratörlerin evlerde elektrik üretiminde kullanılmasına yönelik uygulamalar bulunmaktadır. Jeotermal kaynaklar yönünden zengin olan İzlanda'da sıcak ısı kaynağı olarak jeotermal sıcak su ya da kazan dairelerinde ısıtma amaçlı üretilen suyu ve soğuk ısı kaynağı olarak kış ortam sıcaklığının kullanılması ile elde edilen termal farktan elektrik üretebilen özel termoelektrik sistemler geliştirilmiştir. Bu modüller 20 W ile 50 W arasında üretilmektedirler. Yapı çatı sistemine yerleştirilen güneş kolektörleri ile ısıtılan su hem duşlarda sıcak su ihtiyacını karşılamakta hem de termoelektrik modül üzerinde sıcak ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Soğuk su da termoelektrik modül üzerinde soğuk yüzeyi oluşturmakta ve elektrik elde edilmektedir. Bu sistem için dizayn edilen termoelektrik jeneratörler 50 W ile 100 W arasında güç üretebilmektedir [70].



**Şekil 1.32.** Jeotermal kaynaklı termoelektrik üreteç

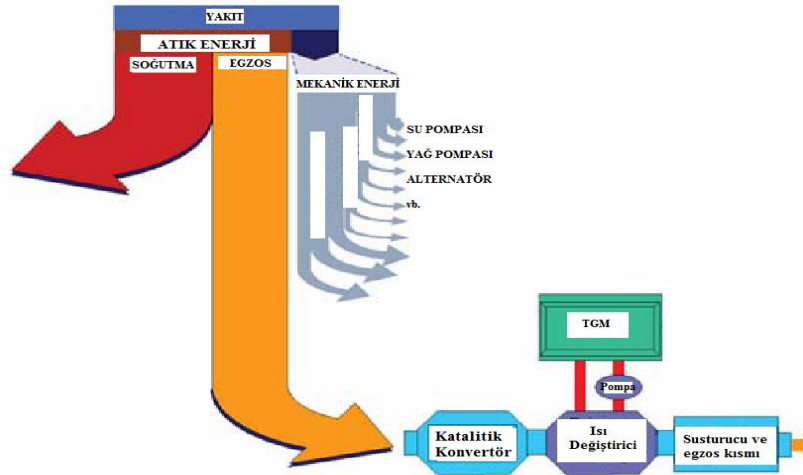
Termoelektrik teknolojisinin kullanıldığı bir başka alanda araç koltuk sisteminin lokal olarak ısıtılması ve soğutulması olmuştur. Termoelektrik enerji, pil ve akülerin şarj edilmesinde, aydınlatma elemanlarının çalıştırılmasında, araçlarda yakıt tasarrufu sağlanmasında kullanılmaktadır. Termoelektrik enerjiyi özellikle ısının atıl durumda, geri dönüşümünün yapılmadığı durumlarda kullanımı ön plandadır. TEJ modüllerinin etkinliği

düşüktür; bu da onların genel amaçlı elektrik jeneratörü olarak kullanılmalarını engellemektedir. Ancak süreklilik arz eden atık sistemleri, kalorimetre uygulamaları, ya da DA besleme (termal batarya) olarak faydalanılmaktadır. Bunlar arasında uzay araçları elektroniği, sıcak su/yağ telemetri sistemleri, fırın/kazan/kalorifer kontrol elektroniği, jeotermal ve güneş enerjisi gibi uygulamalar sayılabilir. Üzerinde çalışılan bir diğer uygulama da motor egzoz manifoldu üzerinden geri kazanımlı alternatör projesidir [71-73].

Son zamanlarda termoelektrik modülün jeneratör olarak modellenmesi alanında yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Matlab/Simulink benzetim programıyla Termoelektrik Modülün (TEM) Termoelektrik Jeneratör (TEJ) olarak kullanılması için, matematiksel modelinin benzetimi yapılmış ve farklı iki sıcaklık aralıkları için benzetim sonuçları deneylerle teyit edilmiştir. Modüle ait akım, gerilim, güç, sıcak yüzey ve soğuk yüzey sıcaklıkları ve bu yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı değerlerinin sürekli izlenmesi ve kayıt altına alınması için özel bir SCADA programı geliştirilmiştir. Matlab/Simulink benzetimiyle elde edilen teorik sonuçlarla SCADA sistemiyle ölçülen deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır [74].

Otomotiv endüstrisi atık gazların dönüşü üzerine son zamanlarda bazı gelişmeler göstermektedir. 400 °K ile 1000 °K sıcaklık aralığına sahip egzoz gazlarındaki enerjinin geri dönüşümü ile alternatör sistemine yardımcı ya da onun yerine kullanılması sonucu yakıt tüketiminde azalmaların olabileceği vurgulanmıştır. İşletme sistemine, motor kapasitesine göre değişen atık ısı 20 kW ile 400 kW aralığında olup son derece önemli bir kayıp olarak değerlendirilmektedir. Atık termal enerjinin geri dönüşümü ile üretilen elektrik enerjisi yakıt etkinliğini arttırmada, artan elektrik ihtiyacını karşılamada ve sera gazı emisyonlarını azaltma konusunda etkili olabilecektir. Bu alanda devam eden çalışmalarda  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  alaşımları kullanılarak bazı prototipler başarıyla elde edilmiştir [75].

Yakıttan elde edilen enerji, soğutma, egzoz ve mekanik sistemler tarafından kullanılabilir hale dönüşebilmektedir. Bunun en güzel örneklerinden birini sunan TEJ'in etkinliğini arttırmaya yönelik birçok çalışma araştırmacılar tarafından ilgi alanı olarak belirlenmiştir.



Şekil 1.33. Yakıt enerjisinin dönüşümü

Modülün elektrik gücü düzenleme sisteminde uygun DA/DA dönüştürücü üzerinden araca bağlanması gerekir. Modülde üretilen gücün kullanılması alternatör üzerine düşen yükün hafiflemesi anlamına gelecektir. Sistemde kullanılan modül Skutterudites denilen PbTe ve BiTe bileşikli yapıdan meydana gelmektedir. Bu sistemde egzoz gazlarının ve soğutucu akışkanın belirli bir sıcaklık ve debisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu modülde elektrik çıkış gücü hesaplamaları yapılmış ayrıca alternatör yükünün azalması sonucu taşıtın yakıt tüketiminin azaldığı tespit edilmiştir. Burada egzoz gazlarının akışından termal enerjinin oluşmasını sağlayan bileşen The Primary Exchanger (PHX) olarak adlandırılmıştır. Bu sistemde modüller 200 °C sıcaklık ve 17 bar gaz basıncına dayanıklı olabilmesi istenmiştir [76].

Bir başka çalışmada termoelektrik cihazların analizini yapan ANSYS hesaplamalı sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Simülasyon çalışması için 32 çift ayaktan oluşan bir termojeneratör tasarlanmıştır. Tasarlanan bu cihazın ölçüleri, genişlik ve uzunluk 25 mm kalınlık ise 1 mm olarak verilmiştir. TEJ’de geometrinin etkisini analiz etmek için 100, 500 ve 1000 mm boyutlarında 3 farklı dolgu kalınlık değerleri kullanılmıştır. TEJ modülleri kübik ve ayakları 2 mm olarak seçilmiştir. Bilindiği gibi TEJ çıkış gücü fark sıcaklıklarına bağlıdır. Fark sıcaklıkları 100, 300 ve 500 °C olarak tanıtılıp çalışmada kullanılmıştır. Maksimum elektrik çıkışı sağlayacak direnç tespit edilerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Ansys FEM ile yapılan termoelektrik modül analizlerde farklı uygulamaları da görmek mümkündür. Modül üzerinde homojen olmayan sıcaklık dağılımlarına göre yapılan analiz sonuçlarında farklı akım ve voltaj değerleri oluşmuştur. Sıcaklık dağılımının üniform olduğu analiz sonuçları incelendiğinde üniform olmayan

sıcaklık dağılımlarına kıyasla üretilen akım ve voltaj miktarları daha fazla olduğu görülmektedir [36,77].

Daha önceki konularda değinildiği gibi termokupllar termoelektriğin temelini oluşturmaktadırlar. Buradan yola çıkan çalışmaların zamanla geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan bir başka çalışmada 100 W elektrik gücünden daha fazla çıkış gücüne sahip yüksek güç yoğunluğundaki termoelektrik jeneratörlerinin geliştirilmesi anlatılmaktadır. Çalışmada yüksek güç için tasarlanan ısı değiştirici boru ve termoelektrik alt grupları içeren jeneratörler ele alınmıştır. Bu çalışmada bloklar halinde üst üste tasarlanmış termoelektriğin kullanılmasının etkisi üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda değişen sıcaklık, akış ve elektrik yük verilerinde farklı değerlerde elektrik enerjinin üretildiği vurgulanmıştır [78].

Bir başka çalışmada 200 °C sıcaklık farkında %14 etki gösteren tasarım ve oda sıcaklığından 260 °C'ye kadar sıcaklıklarda 5 mikron kalınlığında Si maddesi üzerinde p tipi B4C/B9C ve Si/SiGe n tipinin termoelektrik özellikleri incelenmiştir. Bu verilere dayanarak atık ısıdan elektrik dönüşümü gerçekleştiren jeneratör için tasarım özellikleri yorumlanmıştır. Filml (Quantum well) modül için çıkış gücü tahminleri gösteriyor ki, 2.5 inç kare şeklindeki modülde sıcaklık farkı 200 °C'de %15 etkilere sahip jeneratörler elde edilebilir ve düşük ısı iletkenliği ile ısı iletkenlik azaltılarak modül etkinliği artırılabilir. Bu olay ticari olarak satışı yapılan Hi-Z Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> alaşımlarının daha etkili ve güçlü olduğunu gösteriyor. Ayrıca, sistem performansının ( güç, etkinlik, voltaj) tasarım ve yüzey malzemesine bağlı olduğunu gösteriyor [79].

Clarkson üniversitesi küçük vasıtalı araçlar için TEJ' nin uygulamaları geliştirme çalışmalarını sürdürmektedir. Çoğu trafiğe kapalı alanlarda ağır vasıtalı araçlar ile alakalı TEJ sistemini geliştiren firma olan Hi-Z teknoloji ile ortaklaşa çalışan Clarkson Üniversitesi küçük vasıtalarda eksiksiz bir TEJ sistemi tamamlanarak test etmiştir. Sistemin temel elemanları Bizmut ve tellürün farklı kompozisyonlarından oluşan yarı iletkenler, seramik yapı ve termokupllardır. Bu sistemde bir yüzeyin ısıtılmasına karşın diğer yüzeyin soğutulması ile elektrik üretimi olduğu bilinmektedir. Bu araştırma projesinin birinci safhasında kamyonet tipi araçlar için TEJ sisteminin tasarımı ve teknik özellikleri geliştirilmiştir. Clarkson üniversitesi ile GM'nin ortaklaşa geliştirdiği sistem 343 mm uzunluğunda ısı değiştirici üzerine yerleştirilen 42 adet modülden oluşur. Egzoz gaz sıcaklığının 650 °C, soğutucunun 90 °C olduğu test şartlarında elektriksel çıkış gücü 177 W olarak ölçülmüştür [80,81].

TE sistem performansını etkileyen önemli faktörlerden biriside şüphesiz malzeme yapısıdır. Düşük taşıyıcı konsantrasyonlu yalıtkanlar ve hatta yarı iletkenler geniş Seeback etkisine sahiptirler. Ancak düşük taşıyıcı konsantrasyonu da düşük elektrik iletkenlikleri ile sonuçlanır. Taşıyıcı konsantrasyonu ve Seeback etkisi arasındaki ilişki elektron taşıma modellerinden görülebilir. Şu ana kadar en yaygın olarak kullanılan termoelektrik materyaller  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ve  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  alaşımları olmuştur. En yaygın şekilde p-tipi kompozisyonlarda  $(\text{Sb}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})_2\text{Te}_3$ , n-tipi kompozisyonlarda ise  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.8}\text{Se}_{0.2})_3$  üzerinde çalışılmıştır. Bu alaşımların elektronik taşıyıcı özellikleri ve kimyasal kusurları üzerine çalışmalar son derece geniş çaplı olarak devam etmektedir [82].

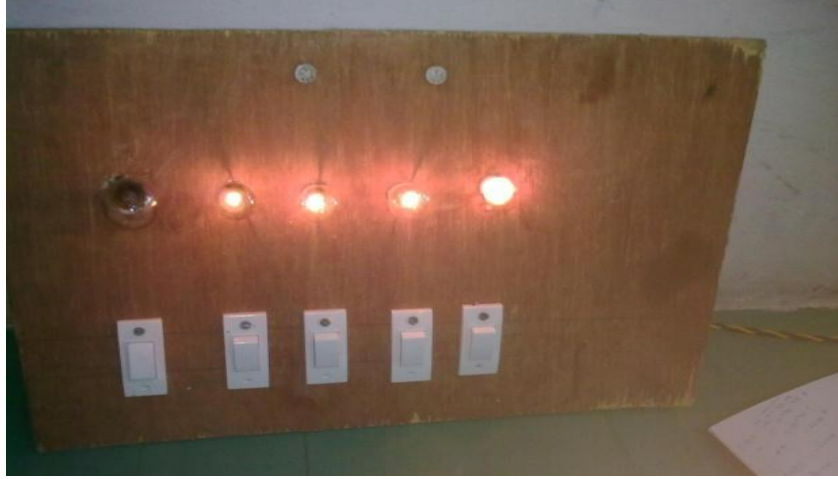
Isı akışının doğrudan yararlı elektrik enerjisine çevrildiği birçok işlemde biri olan termoelektrik enerji üretimi yüksek güvenilirlik, sessizlik, hareketli parçaların olmayışı ve uzun ömürlü bakımsız çalışması gibi sebeplerle ön plana çıkmaktadır. Termoelektrik jeneratör sisteminin jeotermal sistemler için de kullanılabilir olduğu yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Melcor firmasının CP1.4-127-06L kodlu 12 adet termoelektrik modülü elektriksel olarak seri bağlanarak bir modül düzeneği oluşturulmuştur. Sistemde ısıtma bloğu için kullanılan jeotermal su yerine, güneş enerjisi ile ısıtılan su veya doğrudan güneş enerjisi kullanılarak da elektrik enerjisi elde edilebilir. Jeneratör yüksüz ise 43 °C sıcaklık farkında ürettiği gerilim 28,12 V olarak ölçülmüştür. 40 °C sıcaklık farkında 6.15 W olarak bulunmuştur [83].

Düşük sıcaklıklarda  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  tarafından yüksek sıcaklıklarda  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Zn}_4\text{Sb}_3$ 'dan oluşan termoelektrik jeneratörler EES (equation solver software) yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Şerit halindeki kanatçıklar ısı taşınım katsayısı ile sonlu fark yöntemi kullanılarak modelleme yapılmıştır. TEJ çıkış gücü soğutucu sıcaklığı 90 °C olan sistemde tahmin edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda malzemelerin miktarı gaz sıcaklıklarını azaltmak için yeterli olmadığı zamanlarda by pass gerekli olacağı sonucuna varılmıştır [84].

Araç uygulamaları için üretilen sistem egzoz gazlarının geri dönüşümünde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Egzoz gaz sıcaklığının 600 °C, çıkış gücünün 125 W olduğu sistem, tek silindirli motora uyarlanmıştır. TE yapı grupları jeneratör seviyesi test etme imkanı sağlayan termal döngü ve sağlamlığı gösterilmiştir [85].

Motor tarafından sağlanan ısıya büyük kısmı işe dönüşmeden atık ısı olarak atmosfere atılmaktadır. Bu atık enerji faydalı enerjiye dönüştürülebilir ve bu sayede motor etkinliği artırılabilir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmada 18 adet TEJ modül geometrik olarak dikdörtgen yapıya sahip sistem üzerine yerleştirilmiştir. Sadece egzoz

gaz akışının geçişinin amaçlandığı çalışmada CAD yazılımı ile farklı şekillere de sahip olabilecek modellerin ağırlık tahminleri yapılmıştır. Yapılan çalışma ile üçgen, dikdörtgen ve altıgen tasarımların gerçekleşmesi durumunda sırasıyla 12.4, 14.1 ve 21.3 kg ağırlık tahminleri yapılmıştır. Dikdörtgen yapıya sahip olan sistem üzerine 18 adet TEM montajı gerçekleştirilmiş ve elektrik yükü olarak 25 W gücünde üç adet, 15 W gücünde ise bir adet ampul sisteme bağlanmıştır.



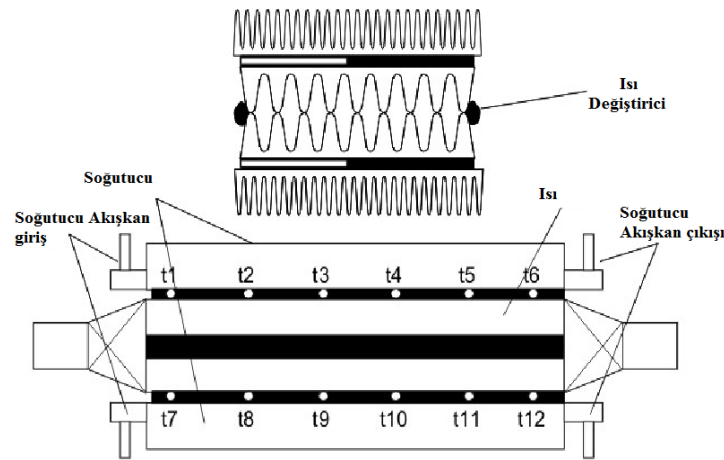
Şekil 1.34. Elektrik yükü olarak sisteme bağlanan ampuller [86].

Ayrıca egzoz gazlarının enerjisinden daha fazla yararlanılmaya yönelik sistemde kanatçık kullanımı yoluna gidilmemiştir. Kanatçık kullanımı ile egzoz gazı geri basıncının artacağı ve bu durumun motoru olumsuz etkileyebileceği düşüncesiyle dikdörtgen geometriye sahip sistemde kanatçık kullanımından kaçınılmıştır [86]. Yapılan birçok araştırmada gaz akışkanların basınç düşüşleri üzerinde sıcaklığın etkisinin ihmal edilebilir bir seviyede olduğu vurgulanmıştır. Dolayısıyla TEJ sistemi bağlı motorda egzoz geri basınç değerleri incelendiğinde ciddi basınç değişimleri yaşanmamıştır [99-102].

Son yıllarda gerçekleştirilen akademik çalışmalar ile kendini tanıtan termoelektrik sistemler ticari olarak da firmaları rekabet ortamına koymuştur. Piyasada satışı bulunan farklı model ve markalarda çok sayıda termoelektrik modüle rastlamak mümkündür. Deneysel olarak gerçekleştirilen bir başka çalışmada, TEP1-1264-1.5 modeline sahip TEM'in 200°C sıcaklık farkında en fazla 3V gerilim, 0,637A akım ve 1,91W güç ürettiği, TMG-450-0.8-1.0 modülünün 200 °C sıcaklık farkında en fazla 8,97 V gerilim, 0,417A akım ve 3,742W güç ürettiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca çalışmada farklı elektriksel yükler uygulanan modüllerin farklı çıkış gücü oluşturduğu gözlemlenmiştir [87].

Termoelektrik sistemlerin atık ısı sistemlerinde kullanılması ile motor performansında önemli artışların sağlanacağı düşüncesiyle güç üretim sistemlerinde kullanılan termoelektrik jeneratörlere bazı bileşenler eklenebilmektedirler. Bu bileşenler, eşanjör, termoelektrik modül soğutma sistemi ve DA/DA dönüştürücüler olabilir. Bu yapılarda egzoz gazlarının ısını etkin bir şekilde geri kazanmak için ısı değiştiricileri kullanılabilir. Egzoz gazlarının hızlı akışı nedeniyle ısı değişimi yüzey alanında akışı geciktirecek çıkıntılar, ısı değişim yüzey alanının artırılması uygulanması gereken bazı durumlar olabilir. Yapılan bu çalışmanın içeriği şunlardır;

- Isı değiştirici yüzeyi üzerinde ki 12 noktada sıcaklık ölçümü, alt ve üst kısımda ısı değiştirici ile bağlantı sağlayan soğutucu akışkan
- Soğutucu akışkan ölçümleri
- Egzoz gaz sıcaklığı ölçümleri
- Hava ve yakıt tüketim ölçümleri
- Güç ölçümleri

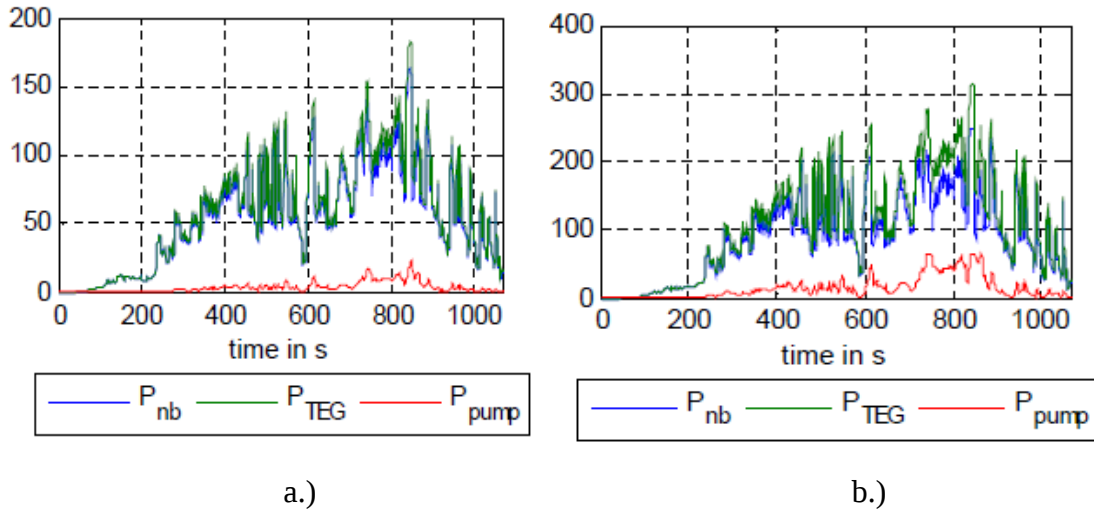


Şekil 1.35. Tasarlanan ısı değiştirici ve TE modül

Şekil 1.35'te gösterilen model üzerinde gerçekleştirilen çalışmada sistemin motor bağlantısı gerçekleştirilmiş ve bazı veriler kaydedilerek TEJ sistemi için yorumlar yapılmıştır. Yapılan motor ölçümlerinde egzoz gazlarının ısı yoğunluğunun motor hız ve motor yüküne bağlı olarak değiştiği ve maksimum motor gücünün  $3300 \text{ dak}^{-1}$  devirde 120 Nm yük altında 41 kW olduğu belirtilmiştir. Bu ısı değiştirici, motor çalışma parametrelerine bağlı olarak egzoz gazlarının 0.6 ile 5 kW arasındaki enerjisini faydalı kullanımına müsaade eden bir tasarım olduğu vurgulanmıştır. 20-120 Nm aralığında değişen

yük değerlerine göre 3300 motor devrinde 1.4-5 kW, 2300 dak<sup>-1</sup> motor devri için 0.6-3 kW 'lık bir enerji kazanımının sağlandığı üzerinde durulmuştur. Tasarıma özgü değişikliklerle daha fazla egzoz gazı ısı enerjisinin kazanılabileceği ve böyle bir sistemle 750 W'lık elektrik enerjisi üretilebileceği ifade edilmektedir [88].

Termoelektrik enerji teknolojileri diğer enerji kaynaklarıyla kıyasla birçok çevresel avantajlara sahip olduğu yapılan çalışmalarda ispatlanmıştır. Bu avantajlar içinde en dikkat çekici olanlar ise herhangi bir emisyon ve atık ürün olmamasıdır. Ancak içten yanmalı motorlarda kullanacak termoelektrik jeneratör sistemleri soğutma ve egzoz sistemlerinde bir takım kayıpları meydana getirebilir. Termoelektrik sistemde ek soğutma sisteminde kullanılan fan ve pompalar kayıp olarak nitelendirilirler. Enerji geri dönüşümü sağlayan TEJ sistemi ile birlikte kullanılan içten yanmalı bir motor Modelica Kütüphanesi temelli bir modelle geliştirilmiştir. Bu modelde ticari olarak kullanılan iki farklı termoelektrik modül için faydalı güç değerleri tespit edilmiştir. Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> ve PeTe temelli termoelektrik modüllerin oluşturdukları elektrik enerjisi değerleri sırasıyla 180 W ve 310 W olarak bulunmuştur.  $P_{TEG}$  üretilen güç,  $P_{pump}$  sistemde pompanın harcadığı güç  $P_{nb}$  ise net gücü ifade etmiştir.



**Şekil 1.36.** Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> (a) ve PeTe (b) temelli termoelektrik modüllerin oluşturdukları elektrik enerjisi değerleri [89].

Termoelektrik modüller ve sistemlerini Matlab, Ansys, Comsol gibi farklı programlar yardımıyla da analiz etmek mümkündür. Yapılan bir çalışmada, Comsol V 4.2 yazılımı ile p ve n çiftinden oluşan TEM yapısı farklı Seebeck değerlerinde yüzeylerdeki sıcaklık ve voltaj dağılımları incelenmiştir. Daha çok farklı sıcaklıklardaki akışkanlara sahip olan ısı değiştirici sistemlerde kullanılan yapıların akış-ısı analizlerini de

gerçekleştirmek mümkündür. Yapılan bazı çalışmalarda, termoelektrik sistemlerde kullanılan akışkanların analizlerini gerçekleştirebilen Fluent programı ile yapılan çalışmada farklı ısı taşınım katsayıları ile üretilebilecek termoelektrik enerjisi matematiksel hesaplamalar ile belirlenmiştir [88,89]. Termoelektrik modüllerin fiziksel boyutlarının soğutma kapasiteleri üzerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiş analiz sonucunda sıcak bölge ile soğuk bölge arasındaki sıcaklık farklarına ve uygulanan elektriksel akım değerlerine bağlı olarak soğutma gücü, harcanan elektriksel güç ve performans katsayıları hesaplanmıştır [93,94].

Termoelektrik modüllerin performansını değerlendirmek amacıyla değişik yöntemler geliştirilmiştir. Statik yöntemlere dayalı olarak hesaplanan termoelektrik çıkış parametrelerinin hatalı olabilme ihtimaline karşılık dinamik ısı ve elektriksel çıkış parametrelerinin elde edilmesine yönelik gerçekleştirilmiş yeni bir yazılım geliştirilmiştir. Çalışmada akım, voltaj, elektrik gücü gibi dinamik çıkış verileri oluşturmak amacıyla USB tabanlı çok fonksiyonlu algoritma geliştirilmiştir. Sistem yazılımı Delphi görsel yazılım dili ile geliştirilmiştir. Bu şekilde hızlı, güvenilir ve kolay TEM çıkış parametreleri alınabilmektedir [95].

Atık ısı enerjisinin kullanıldığı bir başka çalışma alanı da soba ve fırın sistemleridir. Soba kullanılan evlerde sobanın duvara dönük yüzünde meydana gelen yüksek sıcaklığın termoelektrik modüllerin sıcak yüzeyini oluşturduğu görülmektedir. Termoelektrik modüllerin diğer yüzeyini ise duvara yerleştirerek elde edilen sıcaklık farkından elektrik enerjisi üretimi de mümkün hale gelmiştir. Bazı elektrikli ev aletlerinin çalıştırılması amaçlanarak, TEP1–1264–3.4 kodlu termoelektrik elemanlar kullanılmış ve farklı dirençler uygulanarak maksimum 150°C sıcaklık farkında 2,4 W güç ve % 3,2 verim elde edilmiştir [96, 97].

Yenilenebilir enerjinin kullanımına olan ilgiyi arttırmak ve hidrojen ile yakıt pili gelişimine katkıda bulunulmak amacıyla yapılan bir başka çalışmada katı oksit yakıt pilinin çalışması esnasında ortaya çıkan atık ısıdan yararlanılmıştır. Hafif, gürültüsüz çalışabilen, yedek parça sorunu olmayan; savunma sanayi, medikal vb. çeşitli uygulama alanları bulunan ve Seebeck etkisiyle ısıyı elektriğe dönüştüren termoelektrik modüller kullanılarak elektrik enerjisi üreten bir sistemin geliştirilmiştir. Hava ve su olmak üzere iki farklı soğutucu akışkan kullanılmıştır. Havanın ısı iletkenliğinin suyu kıyasla daha az olması soğutma etkinliğini azaltmıştır. Ayrıca akışkanların akış hızlarının artmasıyla birlikte soğutmanın daha etkin olduğu vurgulanmıştır [98].

## 2. MATERYAL VE METOT

İçten yanmalı bir motorun egzoz gaz sıcaklığından yararlanılarak üretilebilecek elektrik enerjisi taşıtlar için son derece önemlidir. Günümüz araçlarında teknolojik gelişmelere paralel olarak enerji tüketimi de her geçen gün artmaktadır. Bu artış beraberinde taşıt alternatörünün elektrik üretim kapasitesinin de artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine direk dönüşümünü gerçekleştirecek bu sistemler büyük bir öneme sahiptirler. Buradan hareketle yapmış olduğumuz bu çalışmamızda amaç, içten yanmalı dizel bir motorun egzoz sistemine uyarlanacak termoelektrik jeneratörünün etkisini hem sayısal hem de deneysel görebilmektir. Taşıtlar için alternatif elektrik enerjisi üretecek bu sistem ile aynı zamanda motor egzoz sistemleriyle uyumlu çalışabilecek bir jeneratör yapısı oluşturulması amaçlanmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında termoelektrik soğuk yüzeyi hava ile soğutmanın su ile soğutma yöntemine kıyasla daha etkisiz kaldığı söylenebilir. Bu çalışmada, motordan bağımsız harici olarak tasarlanan soğutma sistemi ile TEM'leri kaplayan cidarın soğutulması uygulaması hedeflenmiştir. Sıcaklık farkını arttırmaya yönelik termoelektrik soğutma sisteminde radyatör kullanılmıştır. Ara soğutucunun (radyatör) kullanımı ile termoelektrik soğutma sistemi suyunun sıcaklığının düşürülmesi amaçlanmaktadır. Deneysel çalışmaların tamamında aynı cins motorin kullanılmıştır ve kullanılan dizel yakıtı Elazığ ilinde ticari petrol istasyonundan satışı yapılan bir ticari yakıt olarak seçilmiştir.

İçten yanmalı dizel motor farklı yük ve devir aralıklarında çalıştırılarak termoelektrik jeneratör sisteminde oluşan değişimler kayıt altına alınmıştır. Alınan bu değerler aynı zamanda Ansys 12.0 paket programı içerisinde yer alan Fluent ve Ansys Thermal Electric programlarında geliştirilen modeller için sınır şartlarını oluşturmaktadır. Bu sınır şartlarında oluşan analiz sonuçlarının sistem hakkında daha iyi yorumların yapılmasını kolaylaştırmıştır. İçten yanmalı motorlara uyarlanması planlanan bu jeneratör sistemi yardımıyla atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü mümkün hale getirilerek alternatörlerin yükleri azaltılabilir. Jeneratörde yer alan modüllerin yüzeyleri arasında ısı geçişinin azaltılması, sıcak yüzeyin ısı kaybının düşürülmesi, soğuk yüzeyin daha iyi soğutulması gibi yapılacak bazı iyileştirmelerle termoelektrik etkinlik daha da artırılabilir. Deney düzenekleri bu tanıma göre tasarlanmıştır. Buradaki amaç

termoelektrik modüller üzerinde maksimum sıcaklık farkını oluşturarak doğal şartlar altında çevre dostu alternatif bir enerji üretme sistemi meydana getirmektedir. Ayrıca termoelektrik sistemlerde performans, kullanılan termoelektrik malzemenin yapısına göre de değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle termoelektrik modülün optimum çalışabileceği sıcaklık değerlerinin oluşturulması, modüllerin maksimum etkinlikte çalışması anlamına gelmektedir. Modüllerin optimum çalışma aralıkları, boyutları, akım ve voltaj değerleri göz önüne alınarak seçimi yapılmıştır. Özellikle soğuk havanın etkili olduğu iklim bölgeleri düşünüldüğünde, sistemin ihtiyaç duyduğu sıcaklık farkı artacağı için sistemin daha verimli çalışabileceği tahmin edilmiştir. Bu sistemde egzoz gazları ile birlikte soğutucu akışkanın da belirli bir sıcaklık ve debisine ihtiyaç duyulmaktadır. Burada, jeneratörün bir tek modülü için alınacak ısı enerjisi düzeyinin yüksek tutulması amaçlanmıştır.

## **2.1. SAYISAL ANALİZLER**

### **2.1.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile Analiz**

Mühendislik sistemlerinde akış ile alakalı yapılan analizler iki temel yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu temel yaklaşımlar deneysel ve sayısal çalışmalardır. Bu yöntemlerden biri olan deneysel metot güvenilir sonuçlar vermesine rağmen belli bir düzene gerektirdiği için pahalı ve zaman alıcı bir yöntemdir. Analitik yöntem ile sadece lineer problemlerin çözümünde sonuç almak mümkündür. Ancak lineer olmayan problemler de mühendislikte oldukça yer almaktadır. Türbülanslı akış bu karmaşık problemlere verilecek en güzel örneklerden birdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), bilgisayar programları kullanılarak akışla ilgili olan denklem takımlarının çözdürülmesidir. Geometrinin kolayca oluşturulup analiz edilmesine imkan vermesinin yanında, deneysel çalışmalara oranla oldukça daha ucuz olması HAD'in yerini sağlamlaştırmıştır. Sayısal akışkanlar dinamiğinde analiz yapmak için kullanılan programdan birisi ve en yaygın olanı Ansys Fluent paket programıdır. Fluent paket programında yapılacak analiz için model oluşturma, hücre oluşturma, sınır ve bölge şartlarının oluşturulması için modelleme programı olarak da Solidwork 2013 versiyonu kullanılmaktadır. Fluent programı, ısı transferi, kütle transferi, akışkanlar dinamiği, kimyasal reaksiyon gibi olayların simülasyonunu yapan, kütle korunumu, momentum korunumu, enerji korunumu, türbülans transport ve karışım denklemlerini sonlu hacimler yöntemi ve kontrol hacmi tekniğini kullanarak ayrık (segregated) veya birleşik (coupled)

çözüm yöntemi ile sayısal olarak çözebilen ve mühendislik uygulamalarında kullanılan genel amaçlı bir bilgisayar programıdır.

Bilgisayar simülasyonu aracılığıyla hızlı değişiklikler yaparak çok kısa sürede sonuç elde etme ve yorumlama işlemi HAD aracılığıyla kolayca gerçekleştirilebilir. Yapılacak sayısal çalışmalar vasıtasıyla problem hakkında ayrıntılı ve gerçeğe yakın veriler elde etmek mümkündür. Her sayısal metodun başlangıç noktası, kısmi diferansiyel ya da integral denklemleri ve sınır şartlarıyla oluşturulmuş matematiksel bir modeldir. Bütün HAD uygulamalarında temel yönetici denklemler olarak akışkanlar dinamiğinin süreklilik, momentum ve enerji denklemleri kullanılır. Bu denklemler, problemin yapısına, çözüldüğü koordinat sistemine vb özelliklere bağlı olarak türetilerek probleme uygun çözüm geliştirilmiş olur. Bu denklemler yazılırken yapılan kabuller şunlardır;

Çalışma iki boyutlu ve zamana bağlıdır.

Türbülans modellemesinde k-ε model kullanılmıştır.

Radyasyon ısı transferi diğer ısı transferi şekillerine göre ihmal edilmiştir.

Cidarlarda duvar sınır şartı uygulanmıştır.

Kaldırma kuvvetleri de ihmal edilmiştir.

Çevre ile TEJ sistem arasında konveksiyon olduğu kabul edilmiştir.

#### **2.1.1.1.Kütlenin Korunumu Denklemi**

Diferansiyel denklemler bir kontrol hacmi düşünülerek türetilir. Sonsuz küçük kontrol hacmi için kütlenin korunumu denklemini en genel haliyle aşağıdaki gibi yazabiliriz;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.1)$$

#### **2.1.1.2.Momentum Korunumu Denklemleri**

Momentumun korunumunun bir ifadesi olan Newton'un ikinci kanunu şöyle açıklanabilir: Kontrol hacmine etki eden net kuvvet, kontrol hacmindeki akışkan parçacığının kütlesiyle ivmesinin çarpımıdır ki bu, kontrol hacminden çıkan akışın net momentum hızına da eşittir.

Momentumun korunumu denklemi farklı koordinatlar için farklı şekillerde yazılmaktadır. En genel haliyle üç farklı koordinat düzlemi için momentum denklemleri;

x momentum,

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \end{aligned} \quad (2.2)$$

şeklinde yazılır.

y momentum, (2.3)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \nabla \cdot V + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \end{aligned}$$

### 2.1.1.3. Enerji Denklemi

Enerji denklemi yazılacak olursa;

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e V) = + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

### 2.1.1.4. Türbülans Denklemleri

Bu çalışmada standart k- ε türbülans modeli seçildi. Seçilen bu modele göre türbülans yayılım ve kinetik enerji denklemi aşağıdaki gibidir;

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + Gk + Gb - \rho \varepsilon - Y_m \quad (2.5)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C1s \frac{\varepsilon}{k} (Gk + G3sGb) - C2s \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

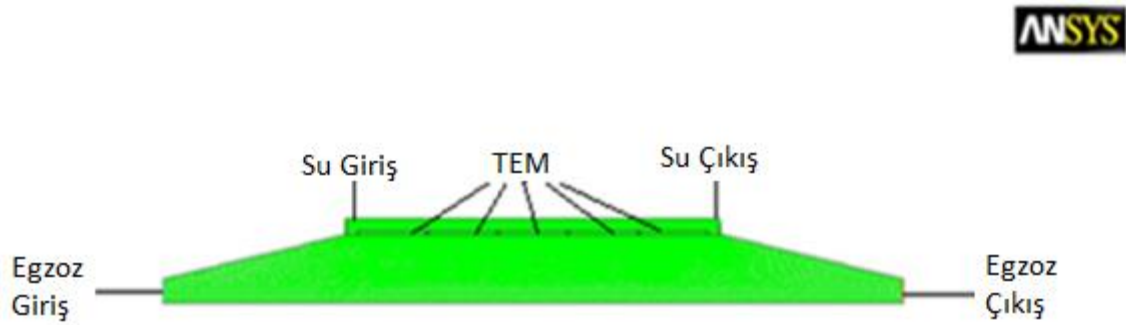
Bu denklemlerde Gk ortalama hız değişiminden dolayı türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu, Gb kaldırma kuvvetinden dolayı türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu, Y<sub>m</sub> bütün yayılma oranlarında sıkıştırılabilir türbülansla genişleyen çalkantıların katkısını

simgelemektedir.  $C1\varepsilon$ ,  $C2\varepsilon$  ve  $C3\varepsilon$  model sabitleridir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  sırasıyla  $k$  ve  $\varepsilon$  için türbülans Prandtl sayılarıdır.

Çalışmada iki farklı fiziksel model tasarlanmıştır. Bunlardan ilki Ansys 12.0 Fluent programında 2 boyutlu çalışmanın geometrisini oluşturan modeldir. Bu çalışma, grid yapısının oluşturulması Gambit programı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Duvar yüzeyleri, suyun ve egzoz gazlarının giriş ve çıkış bölgeleri, TEM'ler Gambit kod programında tanımlanmıştır. Sayısal analizlerimizde akış olarak kullanılan su ve egzoz gazları giriş hız ve sıcaklık olarak girilmiştir. Çıkış koşulları ise normal çıkış olarak verilmiştir. Ağ yapısı tamamlanan model ağ dosyası olarak Fluent yazılımına transfer edilmiştir. Bu çalışmada Piso (Presto) algoritması sönümleyici olarak kullanılmıştır.

Çalışmada ağ yapısından bağımsız çözüm elde etmek için farklı hücre sayılarında çözümler denenmiştir. Bu kapsamda sırasıyla yaklaşık 5000, 11000, 23000 ve 44000 hücre sayılarında ağ yapıları oluşturularak çözümler gerçekleştirilmiştir. Gerek çözüm süresi gerekse sonuçların kıyaslanması neticesinde yaklaşık 23000 (22756) hücre sayısına sahip ağ yapısı seçilmiş ve tüm sayısal çözümlerde kullanılmıştır.

Sekizgen yapının diğer çokgen çeşitlerine göre (kare altıgen vb.) üzerinde daha fazla modül taşınması ve silindirik yapıya benzer özellikleri bu geometrinin seçilmesinde önemli parametreler olarak düşünülmektedir. Çözüm kolaylığı bakımından sekizgen yapının iki boyutlu analizi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.1.** TEJ sisteminin Ansys Fluent programında iki boyutlu görünümü

Sistem bire bir ölçülerde gerçek modelin aynısı çizilerek oluşturulmuştur. Sistem Şekil 2.1'de görüldüğü gibi giriş ve çıkış lüleleri, su girişi ve çıkışı ile TEM'den oluşmaktadır.

**Tablo. 2.1.** TEJ sistemi ölçütleri

| Sistem Elemanları     | Özellikler                                                                                        |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Lüleler</b>        | Uzunluk:150 mm, Daralan kesit dış çapı:57 mm,<br>Geniş kesit Yükseklik:144.8mm, Et kalınlığı: 2mm |
| <b>Sekizgen yapı</b>  | Uzunluk: 300 mm, Yükseklik: 14.48 mm, Et kalınlığı: 2mm                                           |
| <b>Silindir ceket</b> | Uzunluk: 300 mm, İç çapı: 180 mm, Et kalınlığı 15mm                                               |
| <b>TEM</b>            | 56 mmx56 mmx5 mm                                                                                  |

### 2.1.2. Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method, FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) mühendislik ve fizik gibi birçok alanda önemli bir çözüm tekniğidir. FEM programı termal, akış elektromanyetik analizlerin yanı sıra birleşik çözümleme olanaklarını da sağlamaktadır. Termal-yapısal, akışkan-yapısal, elektromanyetik-termal, termal elektrik, piezoelektrik piezodirenç gibi birleşik fizik yetenekleri içinde birkaçını oluşturmaktadır. Ansys coupled-field eleman tipi kullanıcılarına termoelektrik cihazların tam ve etkili analizi imkanı sağlamaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinden Joule ısıtma etkisine ek olarak Seebeck, Peltier ve Thomson etkileri de termoelektrik jeneratör ve termoelektrik soğutucu cihazların analizlerinde kullanılmaktadır [94].

Bilgisayar ortamında simülasyon kolaylığı sağlayan birçok program piyasada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlardan bir olan Ansys 12.0 Thermal- Electric programı sonlu elemanlar tabanlı yazılım ile birleştiğinde sistem simülasyonu için kullanılma imkanı sağlamaktadır. Ansys sonlu elemanlar programı geniş bir element arşivine sahip olup analiz tiplerinin birbirleriyle etkileşmesi şeklinde olan analizlerin yapılması imkanını oluşturmaktadır. Bu alanlar, termal-yapısal, akışkan-yapısal, elektromanyetik-yapısal, termal-elektrik şeklinde görülmektedir. Bu sebeple sonlu elemanlar yöntemi mühendislik ve fizik konularında çözüm tekniği haline gelmiştir.

Termoelektrik analizde ısı akışı;

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = \dot{q} \text{ eşitliği ile gösterilir.} \quad (2.8)$$

Elektrik yükünün sürekliliği;

$$\nabla \cdot \left( \frac{\partial D}{\partial t} + J \right) = 0 \text{ ile verilir.} \quad (2.9)$$

Termoelektrik süreklilik denklemi ile birleştirilirse;

$$\vec{q} = [\Pi]J - [\lambda]\nabla T, \quad (2.10)$$

$$\vec{J} = [\sigma](E - [a] \cdot \nabla T), \quad (2.11)$$

$$\vec{D} = [\epsilon]\vec{E} \quad (2.12)$$

elde edilir.

Burada  $\rho$  yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C$  özgül ısı kapasitesi ( $\text{J/kg.K}$ ),  $T$  mutlak sıcaklık ( $\text{K}$ ),  $\dot{q}$  birim hacimdeki ısı üretimi ( $\text{W/m}^3$ ),  $\vec{q}$  ısı akısı vektörü,  $J$  elektriksel akım yoğunluğu vektörü ( $\text{A/m}^2$ ),  $E$  elektrik alan yoğunluğu vektörü ( $\text{V/m}$ ),  $\vec{D}$  elektriksel akı yoğunluğu vektörü ( $\text{C/m}^2$ ),  $\lambda$  termal iletkenlik matrisi ( $\text{W/mK}$ ),  $\sigma$  elektriksel iletkenlik matrisi ( $\text{S/m}$ ),  $a$  Seebeck katsayısı ( $\text{V/K}$ ) matrisi,  $[\epsilon]$  dielektrik geçirgenlik matrisidir ( $\text{F/m}$ ) [94].

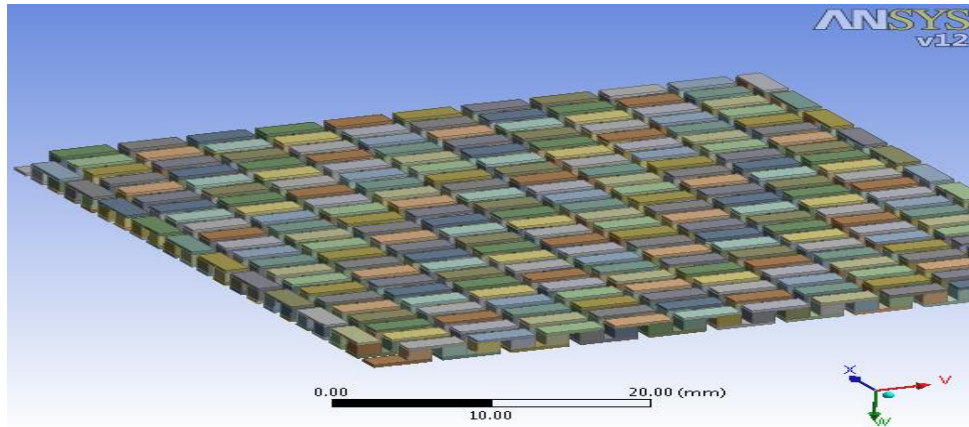
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot ([\Pi]J) - \nabla \cdot ([\lambda] \nabla T) = \dot{q} \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot ([\epsilon] \nabla \phi) + \nabla \cdot ([\sigma][a] \nabla T) + \nabla \cdot ([\sigma] \nabla \phi) = 0 \quad (2.14)$$

İkinci fiziksel modelimizi oluşturulan şekildeki sistemde toplam 252 adet yarı iletken malzeme bulunmaktadır. Genelde iki paralel yüzey arasına dilimlenmiş olarak bulunan bu sistemlerde p ve n ayakları arasında bağlantı malzemesi olarak bakır eleman bulunmaktadır. Şekil 2.2’de 126 adet p tipi, 126 adet ise n tipi materyal kullanılarak oluşturulan geometrinin 3 boyutlu görünümü verilmiştir. İlk olarak hazırlanan model için ve materyal seçimi, mesh ve sınır şartları belirlenmiştir. Ansys Workbench içindeki Thermal-Electric bölümünde temsili yer alan Bizmut tellür malzemeleri p ve n tipi malzemelere atanmıştır. Daha sonra sistemde kullanılan bütün malzemelerin fiziksel özellikleri sisteme yüklenmiştir. P ve n yarı iletken malzemeleri ve bağlantı elemanı olarak seçilen bakır malzemesi için isotropik termal iletkenlik, direnç ve Seebeck katsayıları atanmıştır. Bir sonraki adımda termoelektrik analiz yapmak için süreç aşağıdaki gibidir:

- Fiziksel yapı
- Modeli yapmak, ağ oluşturmak ve modeldeki her bir bölgenin fiziksel niteliklerini atamak
- Sınır şartlarını ve yüklemelerini uygulamak
- Çözümleri oluşturmak

Yapılan analizler beraberinde birtakım kabullerin yapılmasını gerektirmiştir. Bunları seramik alt ve üst yüzey sıcaklıklarının termoelektrik modül yüzey sıcaklığı olduğu ve homojen olarak dağıldığı, TEM ile çevre arasında etkileşimin olmadığı, bağlantı noktalarının kusursuz olduğu şeklinde sıralayabiliriz. Ansys Workbench benzetim programı kullanılarak 3-boyutlu termoelektrik çözümleme için gerekli model Autodesk Inventör programında oluşturulmuştur. Çizimi yapılan bu model Ansys Workbench programına aktarılmıştır. Mesh işlemi için varsayılan yöntem ise dikdörtgen mesh ağıdır. Açık devre geriliminde sistemi simülasyon etmek ve düşük potansiyel sınır şartı için dış elektrik yükü olarak bakır iletken malzemenin dış kenar yüzeyi seçilmiştir. Bakırın elektrik iletkenliğinin yüksek olması buradaki tercih nedenidir. Zaten modüllerde yer alan iletken yapısı da bu şekildedir. Aynı şekilde yüksek potansiyel sınır şartı için dış elektrik yükü olarak bakır iletken malzemenin diğer uçtaki dış kenar yüzeyi seçilmiştir.

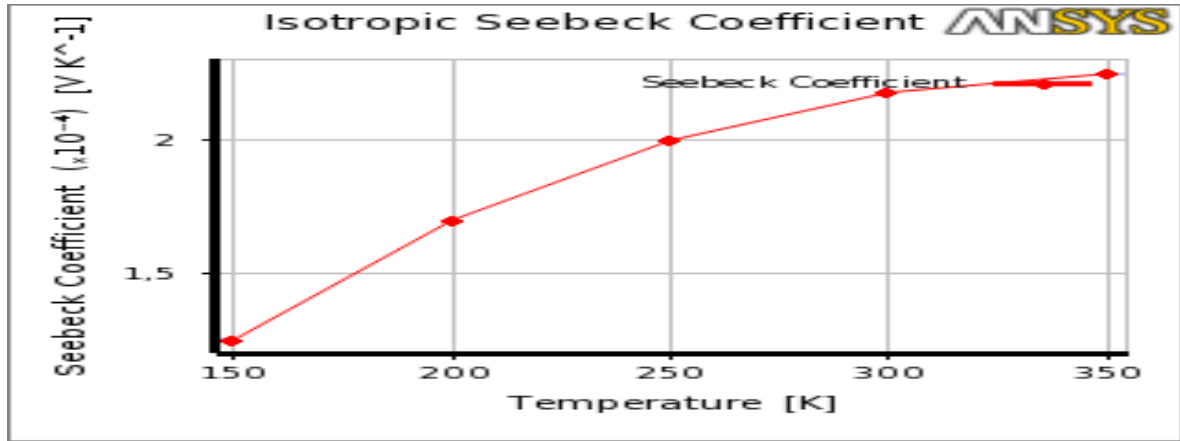


Şekil 2.2. TE modelin görünümü

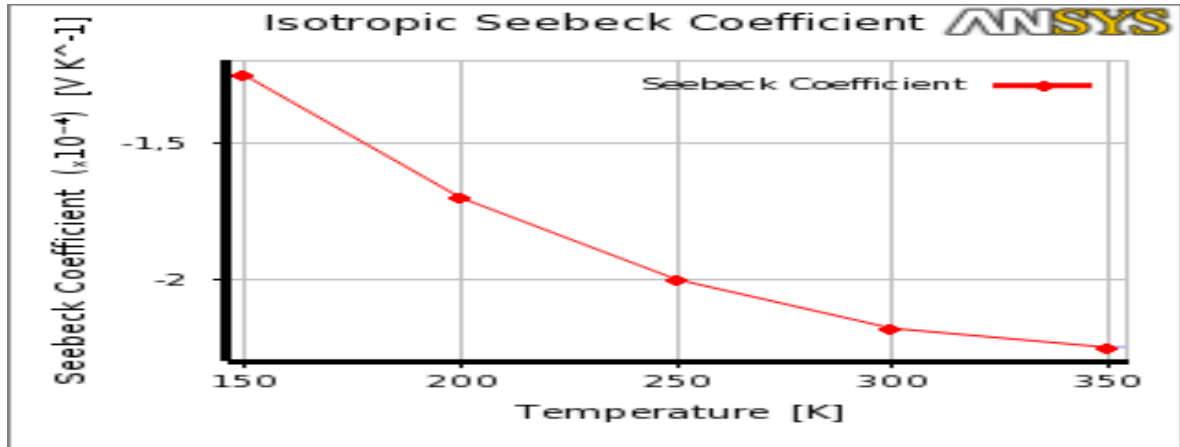
Tablo 2.2. TEM ölçütleri

| ÖZELLİKLER<br>(300 K) | Termal<br>iletkenlik<br>(W/m.K) | İsotropik<br>Direnç (ohm.m) | Adet | Yükseklik<br>(mm) |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|------|-------------------|
| P tipi                | 1,373                           | 1,04E-5                     | 126  | 2,5               |
| N tipi                | 1,456                           | 1,04E-5                     | 126  | 2,5               |
| Bakır iletken         | 385                             | 1,68E-8                     | 257  | 0,5               |

Toplam 252 adet p-n içeren TEM için tanımlanan değerler elektriksel çıkış verilerini önemli ölçüde etkiler. Ticari bir ürün olan bu materyallerin Seebeck katsayıları yapılan literatür incelemesi sonucunda materyallere atanmıştır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de fark sıcaklıklarına göre değişen Seebeck katsayıları görülmektedir.



Şekil 2.3. P tipi materyal için tanımlanan Seebeck katsayısı



Şekil 2.4. N tipi materyal için tanımlanan Seebeck katsayısı

Şekil 2.4'te termoelektrik jeneratörün sonlu elemanlar modeli ile değişen sıcaklıklardaki p ve n materyalleri için seçilen Seebeck katsayıları görülmektedir. Ansys Workbench içinde Thermal-Electric seçeneği termoelektrik materyallerin özelliklerini belirleme imkanı sağlamaktadır. Termoelektrik güç üretim modül performansını negatif etkileyen birçok bulunur. Bunları bileşenlerin termal direnci, bileşenler arasındaki termal ve elektrik bağlantı kayıpları ve düzgün olmayan sıcaklık dağılımları şeklinde sıralayabiliriz. Yarı iletken ayaklar için (p ve n) bizmut tellür malzemesi seçilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak kullanılan bizmut tellür materyalinin Seebeck katsayısı, elektrik ve termal iletkenlik değerleri de değişebilmektedir.

## **2.2.Deneysel Analizler**

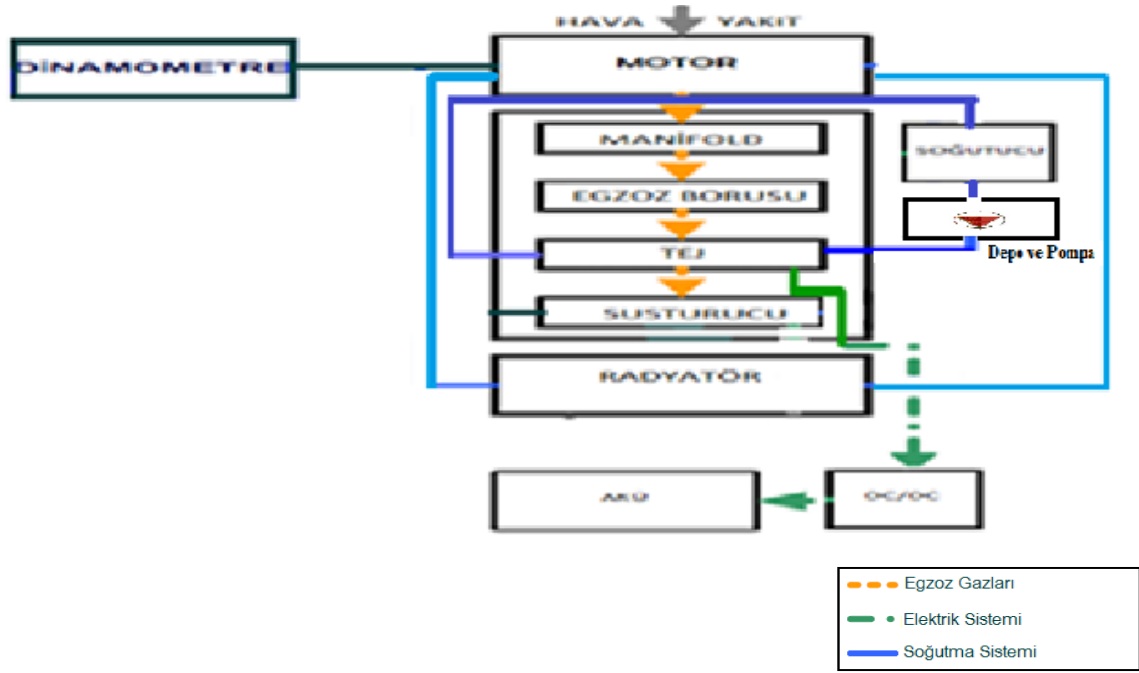
### **2.2.1. Deney Seti**

Deneylerde 4 silindirli, 4 zamanlı Fiat Doblo 1.9 Multijet marka dizel motoru ve Cussons P8602 marka motor dinamometre (bremze) tezgahı kullanılmıştır. Motorun egzoz sistemine bağlanan TEJ sisteminin performans analizlerini elde edebilmek için, motorun hız ve yük değerlerini kontrol edebilen dinamometreye bağlanması gerekir. Çalışmada değişen motor parametrelerinin TEJ sistem üzerindeki etkileri kayıt altına alınarak egzoz gaz sıcaklığı, egzoz gaz hızı, TEM alt ve üst yüzey sıcaklıkları, çıkış voltajı ve akım değerleri alınmıştır.

#### **2.2.1.1. Dinamometre ve Deney Motoru**

Motor dinamometre kontrol ünitesinden, motor hızı ve yük değerleri kontrollü olarak değiştirilebilmektedir. Sabit hız kontrolü seçildiğinde, dinamometre o hızı sabit tutabilecek bir yük uygulamaktadır.

Çalışmada motorun yüklenmesi hidrolik dinamometre ile yapılmıştır. Dinamometre içerisinde bulunan pompa türbin sisteminde motor dönüş yönünün tersine basınçlı su püskürtülerek motor frenlenmektedir. Deneyler Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü atölyesinde bulunan deney seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney seti şematik olarak Şekil 2.5'te ve test düzeneği olarak da Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Test düzeneğinin basit şematik gösterimi



Şekil 2.6. Deney düzeneğinin genel görünümü

Deney seti üzerinde bulunan içten yanmalı dizel motorun teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 2.3'te verilmiştir.

**Tablo 2.3.** Deney motorunun teknik özellikleri

|                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| <b>Motor modeli</b>      | P8602 Fiat Doblo        |
| <b>Motor teknolojisi</b> | Multijet 2,Turbo şarjlı |
| <b>Yakıt sistemi</b>     | Common Rail             |
| <b>Silindir sayısı</b>   | 4                       |
| <b>Silindir hacmi</b>    | 1.91                    |
| <b>Maksimum moment</b>   | 2000 dak-1, 280 Nm      |
| <b>Kullanılan yakıt</b>  | Motorin                 |

#### 2.2.1.2. Motorun yüklenmesi

Farklı devirlerde çalıştırılabilen motorun yüklenmesi hidrolik kavramalı dinamometre yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı devirlerde yani 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> devirde çalıştırılan motor 50, 75 ve 100 Nm olmak üzere 3 farklı yük değerlerinde çalıştırılmıştır. Ayrıca dinamometreye giren su sıkışmaların etkisiyle sistemden çıkar. Sistemden çıkan su depoya geri döner. Sistem ısınan suyu soğutmak için uygun bir soğutma kulesine sahiptir. Bu sayede ısınmış halde bulunan suyun sıcaklığı düşürülmüş olur.

#### 2.2.2. Sistem Tasarımı

Termoelektrik jeneratör sisteminde, Alüminyum 6061 olarak bilinen ve savunma sanayi, uçak sanayi, otomotiv endüstrisi ve uzay uygulamaları gibi birçok alanda etkili olan malzeme kullanılmıştır. İşlenebilir özelliği, hafif olması, korozyon dayanımı, ısı iletim katsayısının yüksek oluşu ve iyi kaynak edilebilme gibi özellikleri nedeniyle alüminyum 6061 tercih nedenleridir. Kimyasal bileşiminde Mn, Mg, Cu ve Ti gibi elementleri barındıran 6061 alüminyum alaşım malzemesi, düşük özgül ağırlık, elektrik ve ısıyı iyi iletebilme, yeterli sayılabilecek mekanik dayanım ve iyi plastik şekillendirilme kabiliyeti gibi avantajlara sahiptir. 6061 T4(temper) malzeme koduna sahip olan bu yapı 2.79E+3 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa, 1.25E+3 J/kg °C özgül ısıya ve 154 W/m-K ısı iletkenliğine sahiptir.

Deneylerde, Alüminyum 6061 T4 malzemesinden oluşan birde silindirik boru kullanılmıştır. 300x480x2 mm ebatlarında kesilen alüminyum levha, iç açısı 135 derece olacak şekilde özel bükme makinesinde bükülerek sekizgen yapı haline getirilmiştir. Oluşturulan sekizgenin her bir yüzeyi, 5.6x5.6x5 mm ölçülerinde olan beşer adet termoelektrik modüllerini yan yana yerleştirme imkanı sağlar. Egzoz gaz akışının sisteme kademeli olarak giriş ve çıkışını sağlamak amacıyla giriş ve çıkış lüleleri oluşturulmuştur. Yatay eksenle 30 derecelik açı yapan bu lülelerin bir yüzeyi sekizgen yapıda olup diğer yüzeyi ise egzoz borusuna monte edilecek ölçülerde ve şekilde yapılmıştır. Eğik uzunluğu 15 cm olan giriş ve çıkış lülelerinin sekizgen yapıya bağlantı işlemi özel bir kaynak türü olan MİG kaynağı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.7. Kaynatma işlemi ve kullanılan MIG kaynağı

Yapılan bu tasarımla hedeflenen bazı önemli hususları şöyle sıralamak mümkündür;

1. Daha düzlemsel bir tasarıma kıyasla termal kuvvetleri daha iyi dağıtma ve yönetme kabiliyetine sahip olması,
2. Egzoz gazlarının kullanılan giriş ve çıkış lüleleri vasıtasıyla kademeli geçişini sağlama,
3. Termal iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık ve su sızdırmazlığı sağlamak için ısı değiştirici soğuk tarafa cidar uygulanması,

4. Egzoz gazlarının geçiş yaptığı yüzey alanını daha fazla arttırmayacak kenar uzunluklarına sahip olunması ve ayrıca daha fazla TEM'den faydalanma imkanı şeklinde sıralayabiliriz.

#### 2.2.2.1. Isı değiştirici, Fan ve Sirkülasyon Pompası

Çalışmada TEJ sisteminin soğutulması amacıyla alüminyum malzemeden imal edilen Kale marka 210x158x43 mm ölçülerinde radyatör kullanılmıştır. Buradaki amaç, TEJ sistemde dolaşarak sıcaklığı yükselen soğutma suyunun sıcaklığını su haznesine girmeden önce bir miktar düşürmektir. Çünkü soğutma suyu sıcaklığının düşürölmesi TEM'lerin elektriksel çıkış gücünü önemli ölçüde etkileyeceği düşünölmektedir. TEJ sisteminden soğutucu radyatöre giriş yapan sıcak suyun 12 Volt ve 0.15 Amper akım çeken soğutucu iki adet fanın devreye girmesiyle soğutulması amaçlanmıştır. Devrede soğutma suyunun dolaşımı 12 Volt ve 1.5 Amper akım çeken şekildeki elektrik pompa yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



a.



b.

şekil 2.8. Radyatör-fan (a) ve elektrikli pompa (b)

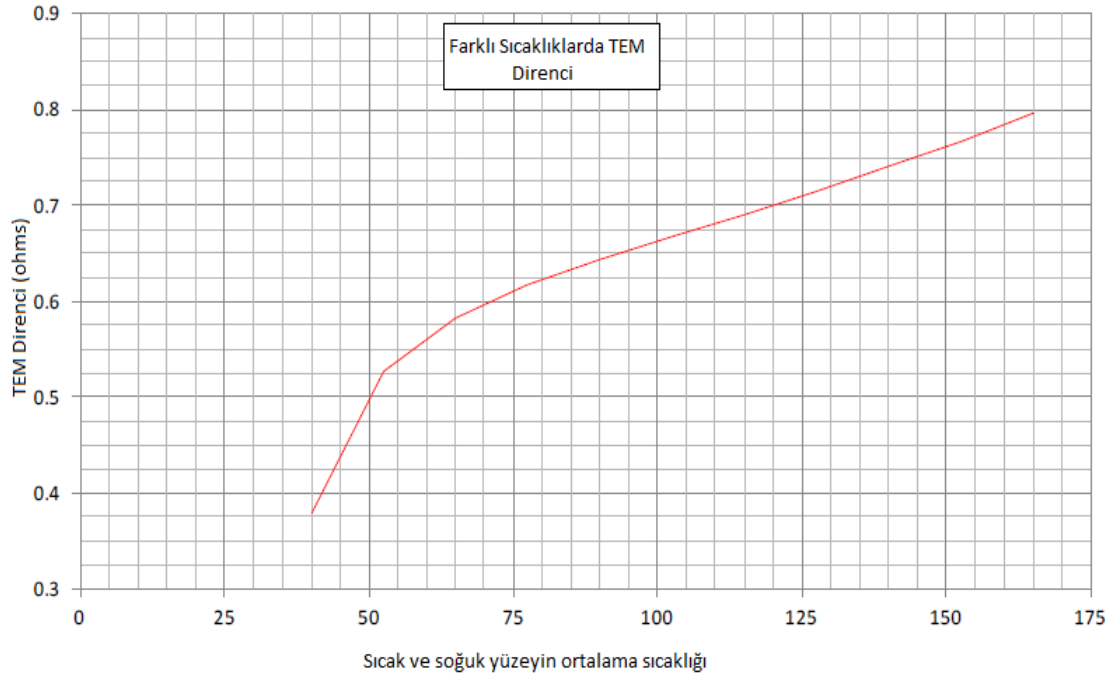
#### 2.2.2.2. Termoelektrik Modöller ve Bağlantı Elemanları

Çalışmada toplam 40 adet termoelektrik jeneratör modöl kullanılmıştır. Sekizgen geometri üzerinde her bir yüzeyde yatay olarak sıralanan bir grup toplam 5 adet modölden oluşmaktadır.



**Şekil 2.9.** Elektriksel olarak seri bağlı modüller

Custom Thermoelectric firmasından temin edilen 1261G-7L31-24CX1 numaralı termoelektrik jeneratör bütün çalışmalar boyunca kullanılan model olmuştur. 56x56x5 mm ölçülerinde 60 gr ağırlığa sahip olan bu modülün maksimum çalışma sıcaklığı 300 °C ve bu sıcaklıktaki termal iletkenliği 2,3 Watt/m<sup>0</sup>K'dir. Şekil 2.10'da TEM'lerin elektriksel çıkış gücünü etkileyen iç direnç değerinin sıcaklığa göre değişimi verilmiştir.



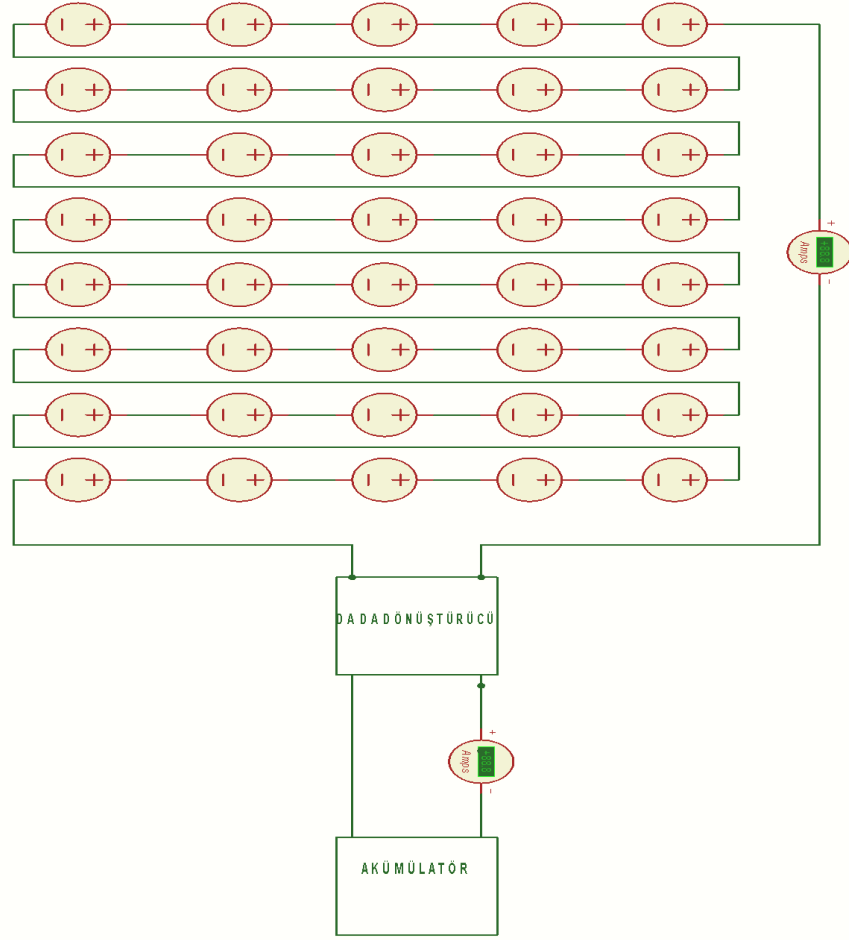
**Şekil 2.10.** Farklı sıcaklardaki TEM için değişen iç direnç değerleri

Enerjinin geri kazanımında son derece önemli olan bu cihazların performansını direk olarak etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar termoelektrik malzemelerin fiziksel özellikleri ile dış etkilere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu amaçla motor egzoz sistemine montajı düşünülen termoelektrik jeneratör sistemi için bazı kriterlerin dikkate alınması gerekir. Bu kriterlerden biri termoelektrik modüllerin çalışma şartlarının göz önünde bulundurulmasıdır. Çünkü modüllerin çalışabileceği belirli bir maksimum sıcaklık değerleri vardır. Motor çalışma şartlarına göre egzoz gazı sıcaklığındaki değişim nedeniyle sistemin montajının yapılacağı konum son derece önemlidir. Toplam 40 adet TEM sekizgen yüzeyin her birine beşerli gruplar halinde dizilmiştir ve aralarında elektriksel olarak seri bağlantı oluşturulmuştur.



**Şekil 2.11.** Sekizgen yapı üzerine seri bağlanan modüller

Şekil 2.12’de Proteus programında çizilen TEJ sisteminin elektriksel devre yapısı görülmektedir.



Şekil 2.12. TEJ sisteminin elektriksel devre yapısı

Düz ve pürüzsüz olmayan yüzeylerden dolayı oluşan mikroskobik hava boşluklarının doldurularak ısı iletkenliğinin artırılmasını sağlayan termal macun, termal bileşen, ısı macunu, soğutucu macun, ısı transfer bileşeni gibi farklı isimlerle anılmaktadır. Normal macuna yakın özelliklere sahip sıvı halde bulunan termal macun havadan daha fazla iletkenliğe sahiptir. Çalışmada kullanılan termal macun, modüller ile alüminyum destekleyici yapı arasında ısı transferinin artmasına katkı sağladığı gibi ısıнын üniform dağılımı sağlamaktadır.

Sekizgen yüzey üzerine montajı gerçekleştirilen modüllerin kablo bağlantıları oldukça önemlidir. Nitekim modüllerin üst kısmında gerçekleştirilen soğutma suyu ile kesinlikle bağlantı kablolarının temas etmemesi gerekir. Bunun önüne geçebilmek için 0,4

mm kalınlığında galvanizli sac kullanılmıştır. Cidar görevi yapan bu yapı sayesinde modüllerin direk su ile temasının önüne geçilmiştir. Sıkı geçebilecek şekilde üretilen cidar ile silindir yapısı arasında soğutma suyu geçirilerek modüllerin soğutulması amaçlanmaktadır. Cidar, sekizgen üzerine yerleştirilen termoelektrik modüllerin soğuk (üst) yüzeyine bakan tarafın tamamını kapsayacak ölçütlerde tasarlanmıştır. Cidar ile modüller arasındaki mikroskobik boşlukların oluşturabileceği olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla bu iki yüzeyin her ikisine de termal macun uygulanmıştır.



**şekil 2.13.** Kullanılan cidarın görünümü

Dış kısımda ise sekizgen yapıyı içinde barındıran ve termoelektrik soğutma sistemine ceket görevi yapan silindirik boru yer almaktadır. 300 mm uzunluğa sahip olan bu silindirik ceket 210 mm dış çap ve 180 mm iç çapa sahiptir. Termoelektrik modüllerin soğutulmasını sağlayan motor soğutma suyu sisteme entegre edilmiştir. İlk olarak silindir boru üzerine giriş ve çıkış kanalı açılmıştır. Açılan kanallara kılavuzla dış açılarak nipel ile bağlantıları gerçekleştirilmiştir.



**şekil 2.14.** Al 6061 Silindir ceket

### 2.2.3. Test Düzenegi

TEJ sisteminde kullanılan modüllerin soğutulmasında su kullanılmıştır. TEJ soğutma sistemi kendi içerisinde ara soğutucu ünite, soğutma hortumları, soğutma deposu ve 12 Volt DC gerilim ile çalışan elektrikli pompadan meydana gelmiştir. Aşağıdaki resimde deney motoruna bağlanan test düzenegi görülmektedir.



Şekil 2.15. Deney motoruna bağlantısı gerçekleştirilen TEJ sistemi

TEJ sistemi egzoz manifoldu ile egzoz susturucu arasındaki yer almaktadır. Egzoz manifoldu ile susturucu arasında yer alan jeneratör sistemimizin genel görünümü Şekil 2.15’de görülmektedir.

#### 2.2.3.1. Ölçüm Cihazları ve DA/DA Dönüştürücü

Çalışmada egzoz gazının sıcaklık değerleri, TEM alt ve üst yüzey sıcaklıkları ile soğutma suyu giriş sıcaklığı 3 adet portatif termometre ve K tipi termokupl kullanılarak ölçülmüştür. TEJ sistemimiz tarafından üretilen elektrikselsel değerler ise 2 adet multimetre yardımıyla ölçülmüştür. Egzoz gaz hızı ölçümleri TEJ girişinde Testo Marka anemometre probunun yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 2.16. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm aletleri

Egzoz gazlarında meydana gelebilecek sıcaklık farkları mutlaka üretilen elektrik akım ve voltaj değerlerini de motorun devir sayısına bağlı olarak değiştirecektir. Bu kısımda devreye girecek olan DA/DA dönüştürücü, üretilen elektrik akım ve voltaj değerlerini kontrol altına alacaktır. Bilindiği gibi alternatörler enerjisini kayış yardımıyla motordan almaktadır. Alternatörün motora getirmiş olduğu ekstra yükler yakıt tüketimini ve egzoz emisyon miktarlarını mutlaka arttırmaktadır. Ancak çalışmada sistemin ihtiyacı olan enerji egzoz gazlarının ısı enerjisinin geri kazanımı ile sağlanacağından motora ek yük gelmeyecektir. Termoelektrik jeneratörlerinin geliştirilmesi, egzoz gazlarıyla motordan atılan ısının değerlendirilmesi, taşıtın elektrik ihtiyacının karşılanması amaçlanmaktadır. Dönüştürücü yardımıyla atık ısıdan üretilen elektriğin taşıt sistemleri üzerinde depo edilmesi ve taşıtlarda kullanılması hedeflenmektedir.

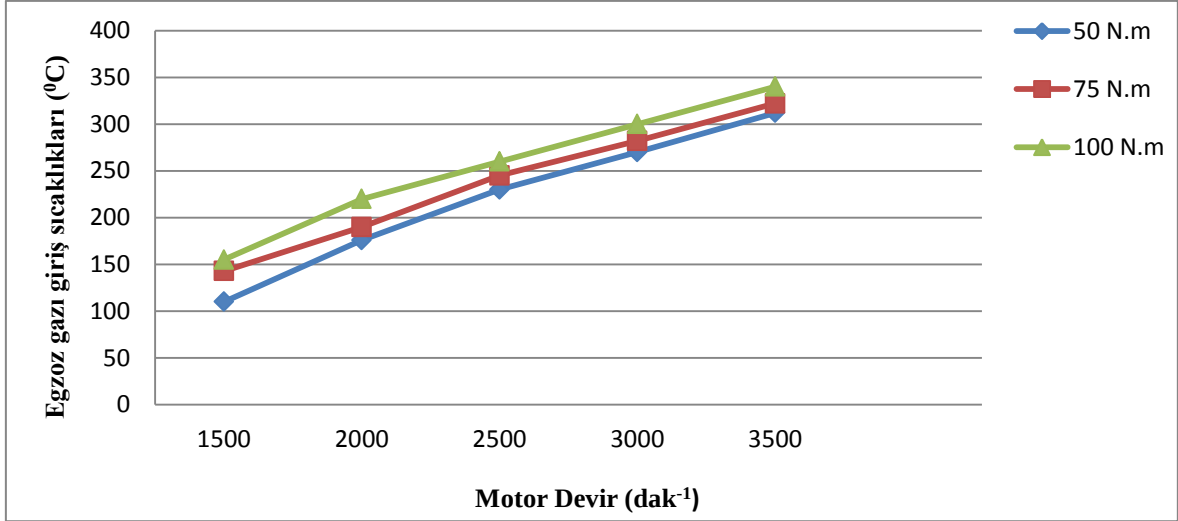
Sistemde kullanılan bir başka yapı ise DA/DA dönüştürücülerdir. Bu dönüştürücüler, güç dönüştürücülerinin bir sınıfı olup voltaj seviyelerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadırlar. Modern elektronik sistemlerde bu dönüştürücülere güç kaynaklarından belirli bir voltajı dönüştürmek için ihtiyaç duyulmuştur. Aynı zamanda bu dönüştürücüler çıkış gerilimlerini de düzenlemiş olurlar. Otomotiv uygulamalarında TEJ kullanımları için, bu dönüştürücüler TEJ tarafından beslenen gerilimin artırılması ya da azaltılması amacıyla kullanılabilir. Bu amaçla araç elektroniğinde farklı elektrik seviyelerine ulaşılmış olunur. SD 1000 -12 serisi modeline sahip konvertör için giriş voltaj sınırları 19-72 V değerleri arasındadır. Maksimum çıkış voltajı 0-60 A arasında çalışır. Kısa devre, yüksek voltaj ve sıcaklık korumasına sahip olan devrede çıkış voltajını 11 ile

15 V değerleri arasında değiştirilebilme özelliğine de sahiptir. Bu sayede şarjı gerçekleştirilecek batarya için uygun voltaj ayarlaması yapmak da mümkündür.

### 3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

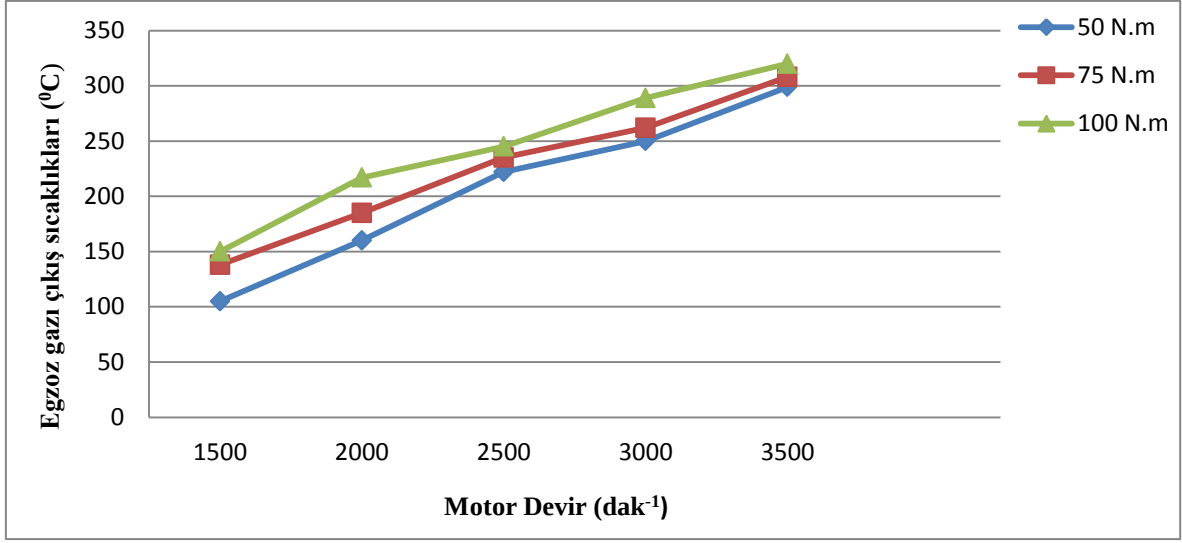
Egzoz sistemine ve ölçüm cihazlarına bağlantısı gerçekleştirilen TEJ sistemi çalışmaya hazır hale getirildikten sonra ilk olarak motor 15 dakika boşta yüksüz çalıştırılarak motorun çalışma sıcaklığına ulaşması amaçlanmıştır. Bu süre sonunda sistem gözden geçirilerek herhangi bir arızanın olmadığı tespit edilmiştir. Düşük devirde motor çalıştırıldıktan sonra ölçümler sırasıyla motorun 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> devirlerinde yapılmıştır. Her bir devir için motor 50 Nm, 75 Nm ve 100 Nm yük altında çalıştırılarak değişen motor yüklerinin TEJ sistemi üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Motorlarda birim zamanda silindir içerisine alınan dolgu miktarı ve buna bağlı olarak üretilen ısı enerjisi miktarı da artmaktadır. Bunun bir sonucu olarak egzoz gazı sıcaklıklarında artan motor devri ve yükü ile birlikte artışlar meydana gelmiştir. Çalışmamızda egzoz gazı sıcaklıkları iki farklı noktada ölçülmüştür. Bunlar, egzoz manifoldu ile susturucu arasına yerleştirilen TEJ sisteminin giriş ve çıkış bölümündeki egzoz gazı sıcaklığı ölçümleridir. İlk ölçümlere motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devrinde çalıştırılmasıyla başlanılmış daha sonra sırasıyla devir sayısı arttırılarak motor 3500 dak<sup>-1</sup> değerlerine ulaşılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde TEM'in yüzeyleri arasında maksimum fark sıcaklığı 3500 dak<sup>-1</sup> devir motor şartlarında 100Nm yükte elde edilmiştir. Bu beklenen bir sonuç olup, yanma sırasında açığa çıkan ısı miktarının reaksiyona girmiş yakıt miktarı ile doğru orantılı olduğunu ve bunun da egzoz gazı sıcaklığını arttırdığı düşünülmektedir. Oluşan maksimum egzoz gaz sıcaklığı motorun 100 Nm yük altında çalıştırılmasıyla 3500 dak<sup>-1</sup> motor devrinde elde edilmiştir. TEJ girişindeki egzoz gaz sıcaklıkları 50 Nm motorun yük durumunda 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirleri için sırasıyla 110, 176, 230, 270 ve 312 °C olarak ölçülmüştür. Bu değer 75 Nm motor yükünde 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 motor devirleri için sırasıyla 143, 190, 245, 282 ve 322 °C olmuştur. Motorun 100 Nm yük altında çalıştırılması durumunda ise 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 devirleri için egzoz gaz sıcaklıkları sırasıyla 155, 220, 260, 300 ve 340 °C olarak ölçülmüştür. Şekil 3.1'de TEJ girişinde meydana gelen bu sıcaklık değerleri grafik halinde sunulmuştur.



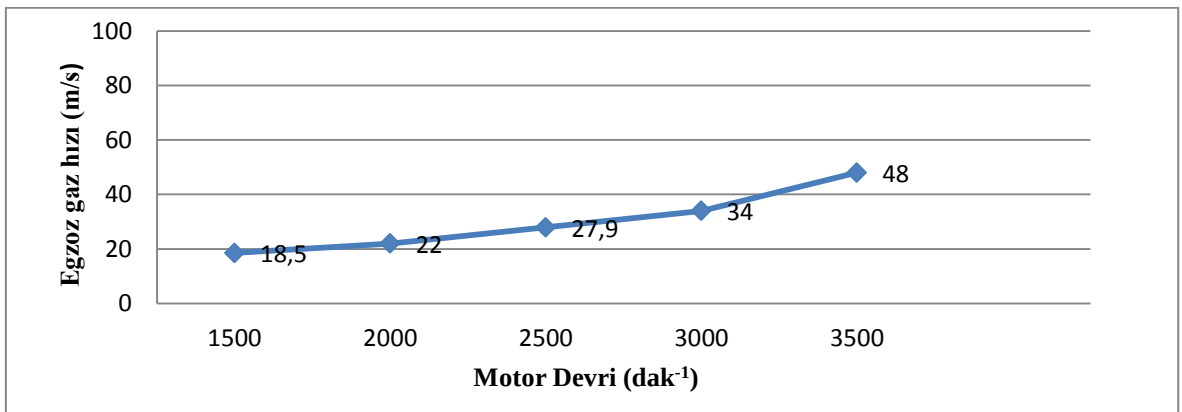
Şekil 3.1. TEJ giriş bölümünde ölçülen egzoz gazı sıcaklıkları

Düşük motor devirlerinde tutuşma gecikmesi süresince, daha az yakıt silindir içerisine alınacağından iş zamanı sonunda yakıtın yanması ile basınç artış hızı düşük olmaktadır. Bu olay yanma sonucunda oluşan egzoz gaz sıcaklıklarının düşük olmasının nedenleri arasındadır. Ayrıca, TEJ sistemine giriş yapan egzoz gaz sıcaklığı sistemde kullanılan soğutma sıvısı ve egzoz gazlarından çevreye olan ısı transferi sonucunda bir miktar azalmaktadır. Egzoz sisteminde oluşabilecek ısı kayıpları elbette TEM performanslarını doğrudan etkileyecektir. Bu ısı kayıpları neticesinde egzoz gazı için oluşan çıkış sıcaklıkları Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Her ne kadar sistemin giriş kısmında oluşan sıcaklıklara kıyasla çıkış sıcaklıklarında doğal olarak azalma gözlenirse de motor devir ve yükünün artmasıyla birlikte TEJ sistemindeki egzoz gazı çıkış sıcaklıkları kendi içerisinde artışlar göstermiştir. Oluşan egzoz gaz sıcaklıkları 50 Nm motor yükü altında 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirlerinde sırasıyla 105, 160, 222, 250 ve 299 °C olarak ölçülmüştür. Bu değer 75 Nm motor yükünde 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 motor devri için sırasıyla 138,185, 235, 262 ve 308 °C olmuştur. Motorun 100 Nm yük altında çalıştırılması durumunda 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 devirleri için ise oluşan egzoz gaz sıcaklıkları 150, 217, 245, 289 ve 320 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.2. TEJ çıkış bölümünde ölçülen egzoz gazı sıcaklıkları

Motorda artan devir sayısı ile birlikte hava hareketleri de artış göstermektedir. Bu artış beraberinde motor güç değerlerinde artışlara sebep olur. Artan motor devri ve güç ihtiyacı egzoz gazı hareketlerini de artırır ve bunun sonucunda yanma hızı artar ve yanma iyileşir. Artış gösteren yanma hızının oluşan egzoz gaz hızını etkilediği düşünülmektedir. Bu nedenle motor devrinin artmasıyla birlikte egzoz gaz hızlarında artışlar gözlemlenmiştir. TEJ sisteminin egzoz giriş uçunda ölçülen egzoz gaz hızları her bir motor devri için 50, 75 ve 100 Nm olmak üzere üç farklı yükte ölçülmüştür. Yük değişimi altında egzoz gazları akış hızının stabil olmadığı ve aynı devirde farklı yükte fazla bir değişim gözlemlenmesi nedeniyle üç yük şartı için ortalama hız değerleri kaydedilmiştir. Egzoz gaz hızındaki oluşan bu sonuçlar akış analizlerimizde ki giriş sınır koşullarını oluşturacaktır.



Şekil 3.3. TEJ girişinde ölçülen egzoz gaz hızı

Yanma sonucunda oluşan gazlarının silindiri terk edişi üç temel evreden oluşmaktadır. İlk safha egzoz supabının açılmasından AÖN'ye kadar geçen zaman dilimidir. Gazların büyük bir kısmı bu safhada dışarı atılır. Bu safhada dışarı atılan egzoz gazlarının hız değerleri ise dizel motorlarda özellikle turboşarj kullanımına göre değişiklik göstermektedir. İkinci safha ise piston AÖN'den ÜÖN'ye doğru hareket ederken silindirlerde kalan gaz piston tarafından dışarıya atılmaktadır. En son safhada ise silindire emilen taze dolgunun etkisi ile gazların silindirleri terk etmesi şeklinde oluşmaktadır. Yüksek yanma sıcaklığı ve hız değerlerine sahip olan yanmış gazlar egzoz manifoldu ve borularında birtakım kayıplara maruz kalırlar. Özellikle egzoz manifoldunda sürtünme ve ısı kayıplarının etkisiyle egzoz gazlarının sahip oldukları kinetik enerjisi düşer ve dolayısıyla hız değerleri de azalmaktadır.

Isı kaynağı olarak egzoz gazlarının ısı enerjisi kullanılan bu sistemde önemli bir başka parametre ise soğuk kenarın sıcaklığıdır. Çünkü sıcaklık farkının artmasıyla birlikte üretilen elektrik enerjisi de artış eğilimindedir. Bu nedenle elektrikli pompa yardımıyla sistemde dolaştırılan su modüllerin soğuk yüzey sıcaklıklarının azaltılmasına yardımcı olmuştur. İçten yanmalı motorun soğutma sisteminden harici bir döngüye sahip soğutma sisteminde soğutma suyu maksimum 60 °C ile TEJ sistemine giriş yapmıştır. Soğutucu fan ve ısı değiştirici yardımıyla soğutma suyu giriş sıcaklığının yükselmesinin önüne geçilmiştir. Motorun farklı çalışma şartları için değişkenlik gösterebilen soğutma suyu sıcaklıkları Tablo 3.1'de göstermektedir.

**Tablo 3.1.** Soğutma suyunun TEJ sistemine giriş sıcaklıkları

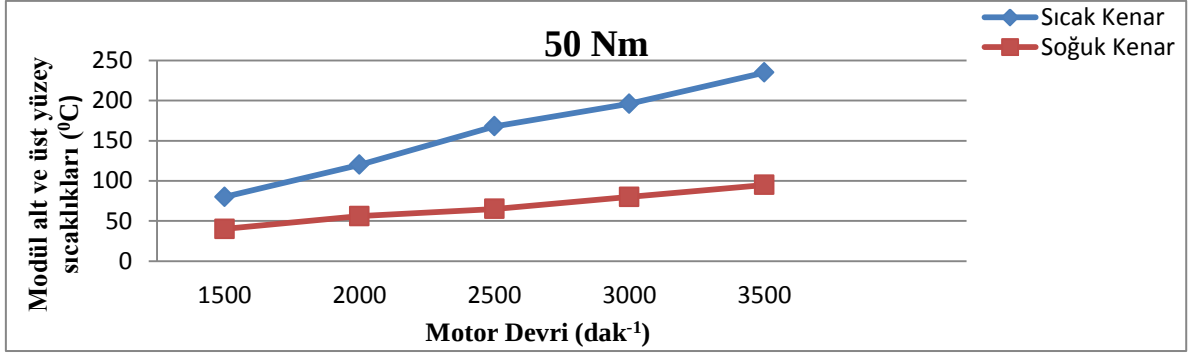
| <b>Motor Devir Sayısı<br/>(dak<sup>-1</sup>)</b> | <b>50 Nm</b> | <b>75 Nm</b> | <b>100 Nm</b> |
|--------------------------------------------------|--------------|--------------|---------------|
| <b>1500</b>                                      | 23,5 °C      | 26 °C        | 30 °C         |
| <b>2000</b>                                      | 33 °C        | 36,8 °C      | 40 °C         |
| <b>2500</b>                                      | 43,2 °C      | 45 °C        | 48 °C         |
| <b>3000</b>                                      | 50,4 °C      | 52 °C        | 53,1 °C       |
| <b>3500</b>                                      | 55 °C        | 57,2 °C      | 60 °C         |

Motorun artan devir ve yük sayısı ile paralel artış gösteren egzoz gaz sıcaklıkları soğutma suyunun sıcaklığında artışlara neden olmuştur. Soğutucu akışkanda gözlenen bu artış aslında TEJ sistemi için istenilen bir durum değildir. TEJ sisteminin sahip olduğu soğutma çevriminin bu noktada önemi büyüktür. Soğutma etkinliğinde, TEM soğuk yüzey

sıcaklıklarının azaltılmasının amaçlandığı soğutma sisteminde bir başka etken ise soğutucu akışkanın akış hızıdır. Bütün çalışma koşullarında soğutma amaçlı kullanılan su, belirli bir güce sahip olan elektrikli pompa yardımıyla 2 m/sn sabit hızla sisteme giriş yapmıştır.

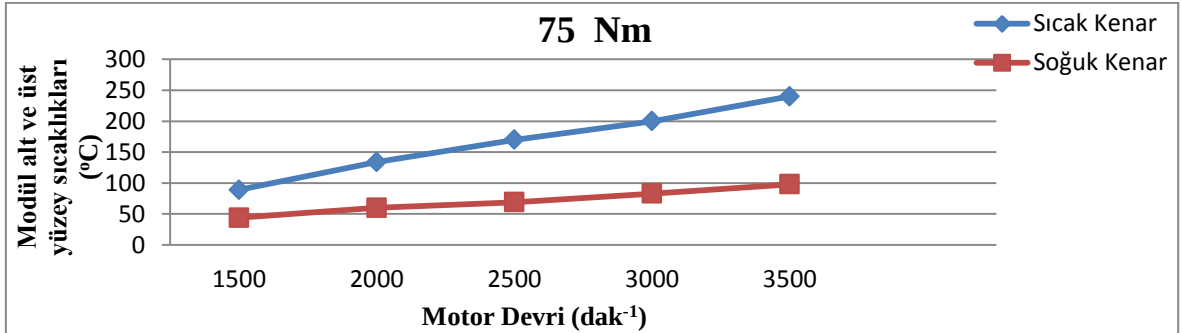
Bizmut Tellür temelli iki seramik yapı arasında bulunan p ve n malzemeleri içerisinde kullanılan katkı maddelerinin yapılarına göre belirli çalışma sıcaklıklarına sahiptirler. Bu çalışmada kullanılan modüllerin üretici firma tarafından belirlenen maksimum çalışma sıcaklığı sıcak yüzey için 320 °C, soğuk yüzey için ise bu değer 180 °C'dir. Bu nedenle TEJ sisteminin egzoz sistemi üzerindeki yerleştirildiği konum oldukça büyük önem arz etmektedir. Çünkü egzoz gazları lokal olarak farklı sıcaklıklara sahiptirler ve egzoz sistemi boyunca farklı çalışma sıcaklıklarına maruz kalabilirler. Bu nedenle modüller yerleştirilmeden önce alüminyum sekizgen yapı üzerinden sıcaklık ölçümleri yapılarak sistemin yerleştirileceği bölüm tespit edilmiştir.

Motorda devir ve yük artışı ile beraber oluşan egzoz gaz sıcaklıklarındaki artışlar, modüllerin her iki yüzeyinde farklı sıcaklıkların oluşmasına neden olmuştur. En yüksek modül sıcaklığı motorun 100 Nm yükte ve 3500 dak<sup>-1</sup> devrinde ortalama sıcak yüzeyde 258 °C, soğuk yüzeyde ise 105 °C olarak kaydedilmiştir. TEM çıkış değerleri için son derece önemli olan sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları anlık olarak değişkenlik gösterse de belirli bir hal yapısından sonra sürekli rejim durumuna geçmiştir. Soğutma etkisinin en yüksek görüldüğü bölümden TEM'in soğuk ve sıcak yüzeyine yerleştirilen termokupllar yardımıyla sıcaklık ölçümleri yapılabilmiştir. Sekizgen yapı etrafına dizilen TEM'lerin soğutucu cidar yüzeyine temas etme zorunluluğu ve sistem tasarımından kaynaklanan termokupl yerleştirme problemleri nedeniyle bütün TEM yüzey sıcaklıkları kayıt altına alınamamıştır. TEM yüzey sıcaklıkları sadece egzoz ve su akışkanlarının giriş yaptığı kısımda dışarıdan yapılmıştır. Bu durum Fluent programında sistemin modellenmesi ihtiyacını oluşturan birkaç nedenden biri olmuştur. Giriş kısmında ölçülen yüzey sıcaklıkları, 50 Nm motor yükü ve 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirleri için sıcak yüzey sırasıyla 80 °C, 120 °C, 168 °C, 196 °C ve 235 °C olmuştur. Soğuk yüzey sıcaklığı ise 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirlerinde sırasıyla 40 °C, 56 °C, 65 °C, 80 °C ve 90 °C olarak ölçülmüştür.



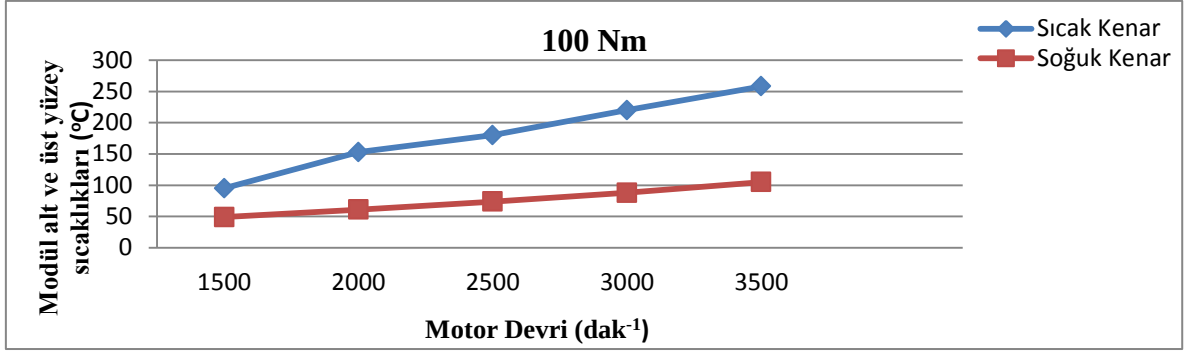
Şekil 3.4. 50 Nm motor yükü altında modüllerin sıcak ve soğuk kenar sıcaklıkları

Motorda artan devir ve yük ile beraber artış gösteren egzoz gaz sıcaklıkları modüllerin alt ve üst yüzey sıcaklıklarını da arttırmıştır. 75 Nm motor yükü için 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirlerinde sıcak yüzey sırasıyla 89 °C, 134 °C, 170 °C, 200 °C ve 240 °C kaydedilmiştir. Soğuk yüzey sıcaklık değerleri ise 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirleri için sırasıyla 44 °C, 60 °C, 69 °C, 83 °C ve 95 °C'dir.



Şekil 3.5. 75 Nm motor yükü altında modüllerin sıcak ve soğuk kenar sıcaklıkları

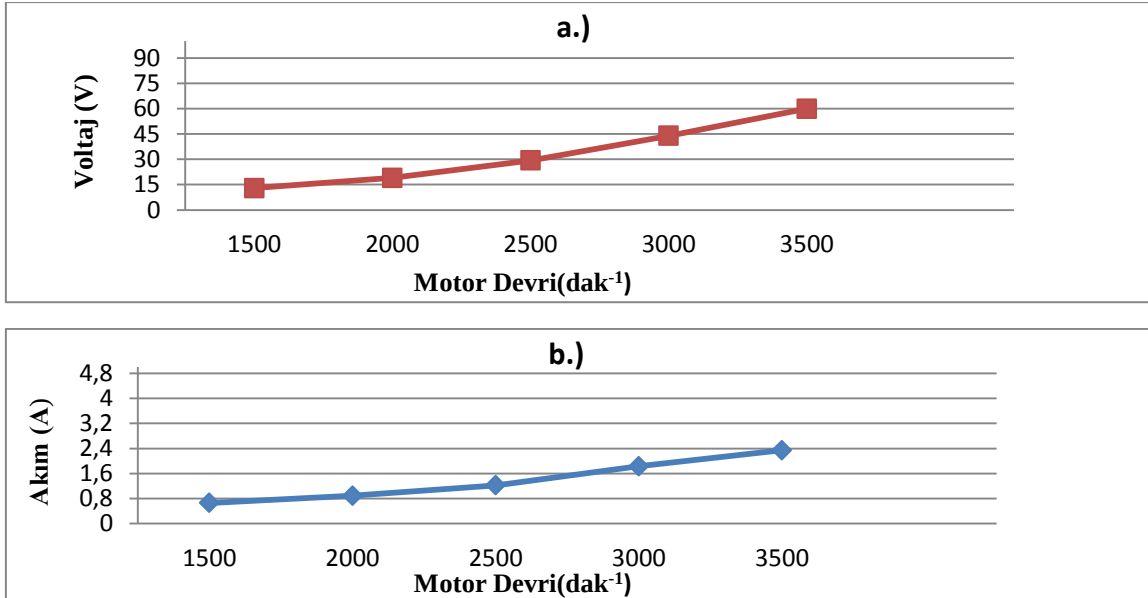
Egzoz gaz sıcaklıklarında meydana gelen bu artışlar doğal olarak modül sıcak yüzey sıcaklıklarını da arttırmıştır. Son olarak motorun 100 Nm yükü altında çalışması durumunda 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirleri için sıcak yüzey sırasıyla 95 °C, 153 °C, 180 °C, 220 °C ve 258 °C değerleri kaydedilmiştir. Soğuk yüzey sıcaklıkları ise 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirlerinde sırasıyla 49 °C, 61 °C, 74 °C, 88 °C ve 105 °C'dir.

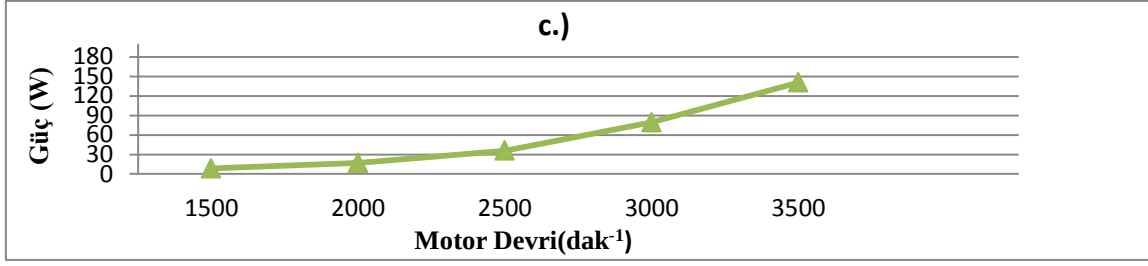


Şekil 3.6. 100 Nm motor yükü altında modüllerin sıcak ve soğuk kenar sıcaklıkları

### 3.1.TEJ Sistemde Üretilen Akımı, Gerilim ve Güç Değerleri

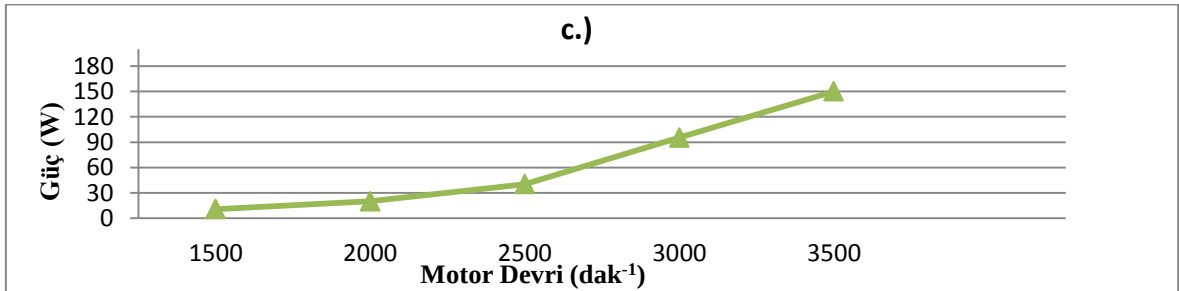
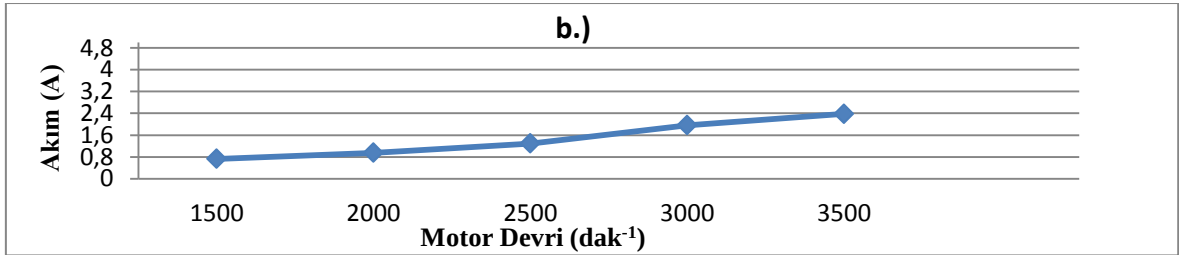
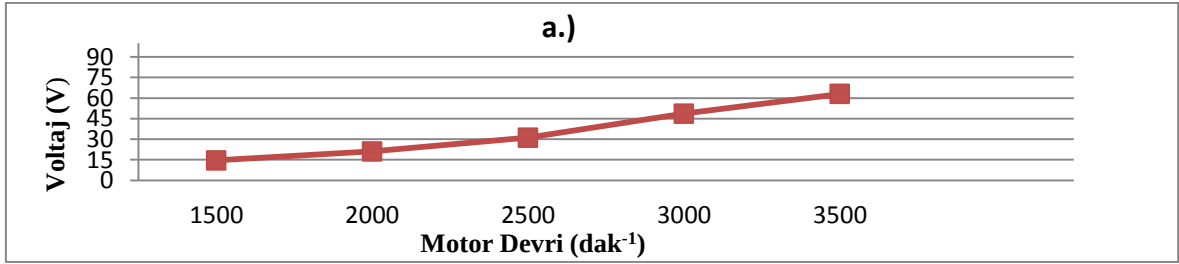
Deney sonuçları incelendiğinde motor devir ve yükü ile üretilen voltaj değeri paralel bir artış eğilimi dikkat çekmiştir. 50 Nm motor yükü ve 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirlerinde 40 adet modülden üretilen toplam voltaj değeri sırasıyla 13, 19, 29.33, 44 ve 60 V olarak kaydedilmiştir. Aynı motor devirlerinde DA/DA konvertör ile TEJ arasında ölçülen maksimum devre akımı ise sırasıyla 0.66, 0.89, 1.22, 1.83 ve 2.34 A olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla motor 50 Nm yük altında çalıştığında çıkış da oluşan net elektriksel güç değeri 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirlerinde sırasıyla 8.58, 16.91, 35.78, 79.33 ve 140,6 W olarak hesaplanmıştır.





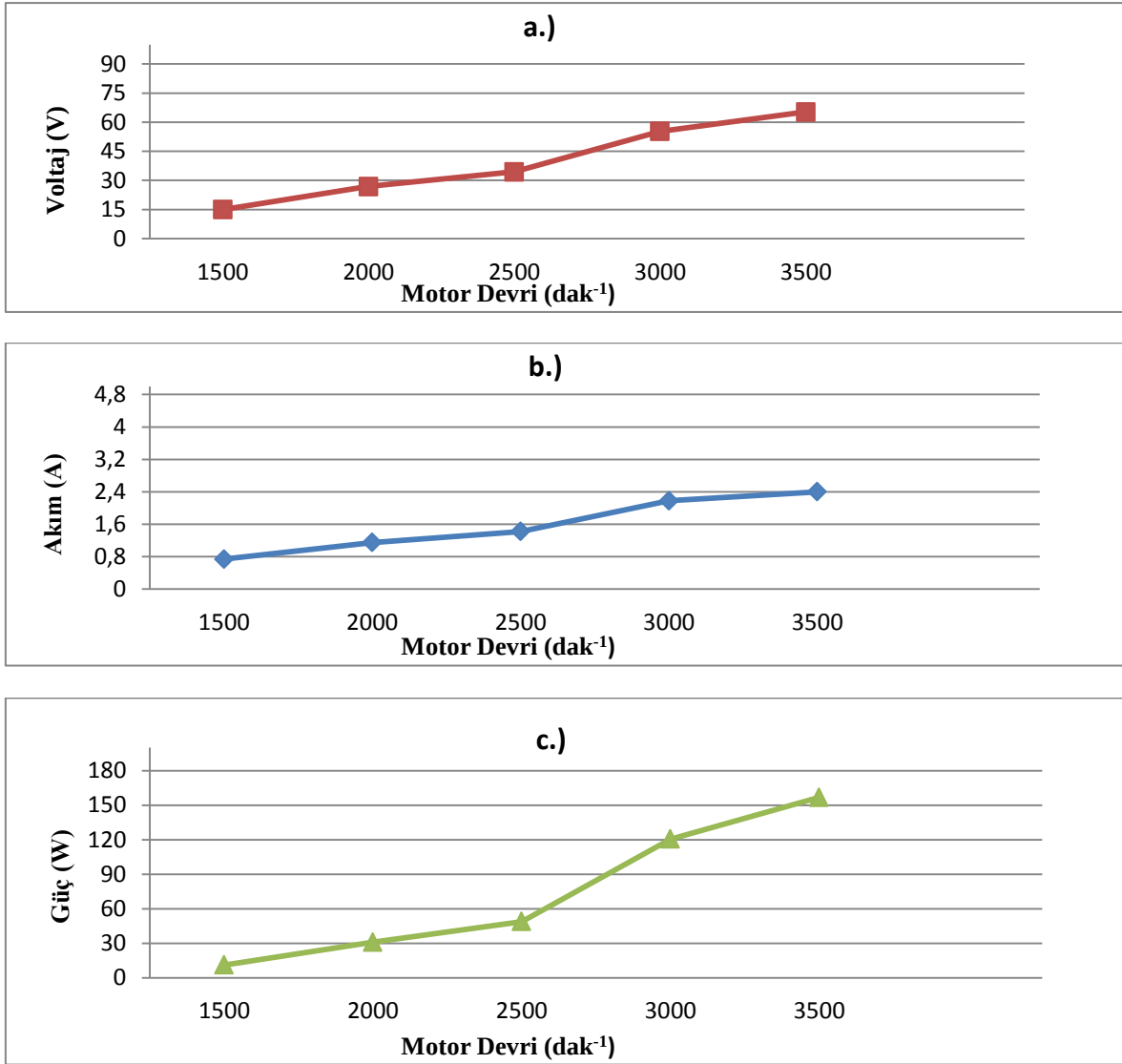
**Şekil 3.7.** 50 Nm motor yükü için farklı motor devirlerinde oluşan Voltaj (a), Akım(b) ve Elektriksel Güç(c) değerleri

75 Nm yükte çalışan motorda 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 dak<sup>-1</sup> motor devirleri için 40 adet modülden üretilen toplam voltaj değeri sırasıyla ise 14.6, 21.06, 31.2, 48.66 ve 63 V değerlerinde kaydedilmiştir. Aynı motor devirlerinde DA/DA konvertör ile TEJ arasında ölçülen maksimum devre akımı ise sırasıyla 0.73, 0.95, 1.29, 1.96 ve 2.38 A olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla TEJ çıkışında oluşan net elektriksel güç değeri 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500 motor devirleri için sırasıyla 10.65, 20, 40.2, 95.37 ve 150,3 W olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3.8.** 75 Nm motor yükü için farklı motor devirlerinde oluşan Voltaj (a), Akım (b) ve Elektriksel Güç (c) değerleri

Son olarak 100 Nm motor yükünde 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500  $\text{dak}^{-1}$  motor devrinde 40 adet modülden üretilen toplam voltaj değeri sırasıyla 15, 26.9, 34.4, 55.3 ve 65.3 V değerlerinde kaydedilmiştir. Aynı motor devirlerinde DA/DA konvertör ile TEJ arasında ölçülen maksimum devre akımı ise sırasıyla 0.74, 1.15, 1.42, 2.18 ve 2.4 A olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla TEJ çıkışında 40 adet modülden ölçülen elektriksel güç değeri 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500  $\text{dak}^{-1}$  için sırasıyla 11.1, 30.9, 48.8, 120.5 156.7 W olarak hesaplanmıştır.

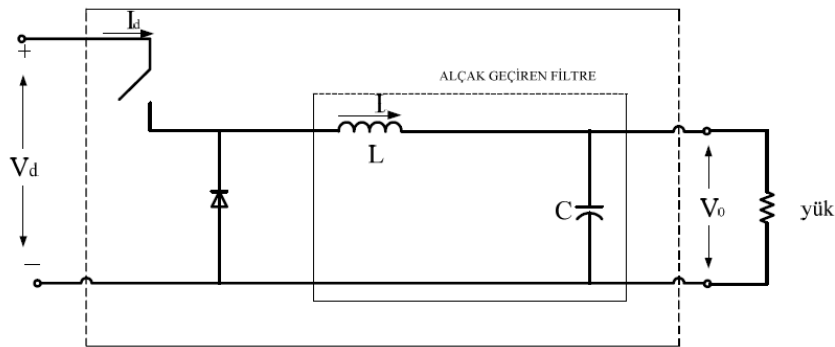


**Şekil 3.9.** 100 Nm motor yükü için farklı motor devirlerinde oluşan TEJ çıkış Voltaj (a), Akım (b) ve Elektriksel Güç (c) değerleri

### 3.2. Üretilen Elektrik Enerjisi ile Akü Şarjı

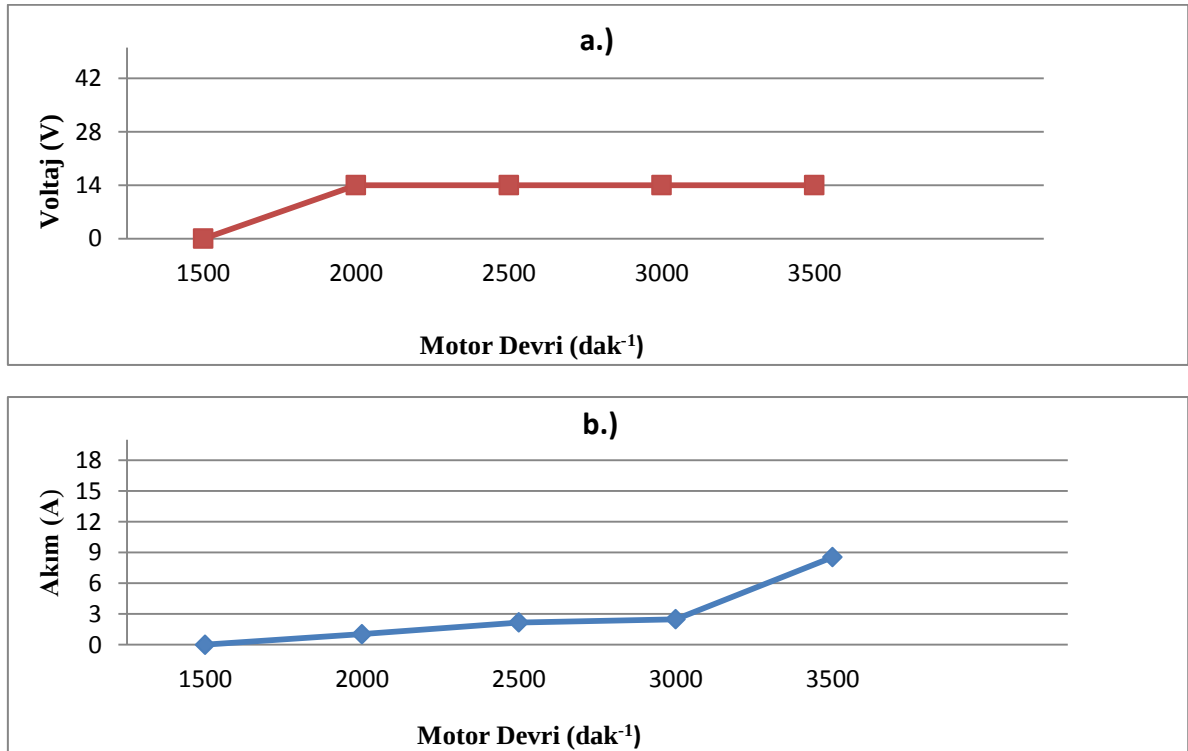
TEJ sisteminde üretilen elektrik enerjisinin maksimum güç ile bataryada depolanması önemli bir husustur. Tıpkı alternatör sistemlerinde olduğu gibi deneysel çalışmada akü şarj işlemi için bir takım elektriksel devrelere ihtiyaç duyulmuştur. Maksimum güç koşulunda akü şarjı DA-DA konvertör yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

TEJ çıkışındaki dalgalı DA gerilimi düşürmek ve üretilen elektrik enerjisini kararlı hale getirmek için dönüştürücü (konvertör) kullanılmaktadır. Düşürücü tip (buck) dönüştürücü yalıtımsız DA-DA dönüştürücüler arasında çok kullanılan yapılardan bir tanesidir. Güç kaynağı tasarımcılarının düşürücü tip dönüştürücü yapılarını kullanmalarının sebebi istenilen çıkış geriliminin her zaman giriş geriliminden düşük olmasıdır. Yarı iletken anahtarın kaynak ve bobin arasına seri olarak bağlanmasından dolayı giriş akımı süreksizdir. Bunun dışında, bobinin ve kapasitenin her durumda yükü beslemesinden dolayı çıkış akımı da sürekli. DA-DA buck konvertör DA mevcut kaynak gerilimini düşürülerek kontrol edilmesinde kullanılır. Girişinden gelen gerilim değerini işlemciden aldığı PWM dalgalarıyla devreye uygulayarak gerilim değerinin etkin değerini küçültür ve böylece gerilim kontrolü yapılmış olur. Şekil 3.10'daki devrede  $I_d$  akımının anahtar ile iletimi sağlanarak bobin üzerinden geçen  $I_L$  akımı hem yük üzerinden akar hem de kondansatörü şarj eder anahtar kesime gittiği anda bobin üzerinde depo edilen enerji diyot üzerinden devresini tamamlar ve boşalınca kadar yük üzerinden akım geçirmeye devam eder. Bu arada kondansatör de yük üzerinden akımını geçirmeye devam eder. Anahtar kesintili iletim modunda çalıştırıldığında kondansatör tam dolmayacağından etkin değeri daha küçük bir gerilimle depolanır bu şekilde azaltan dönüştürücü devresi tamamlanmış olur.

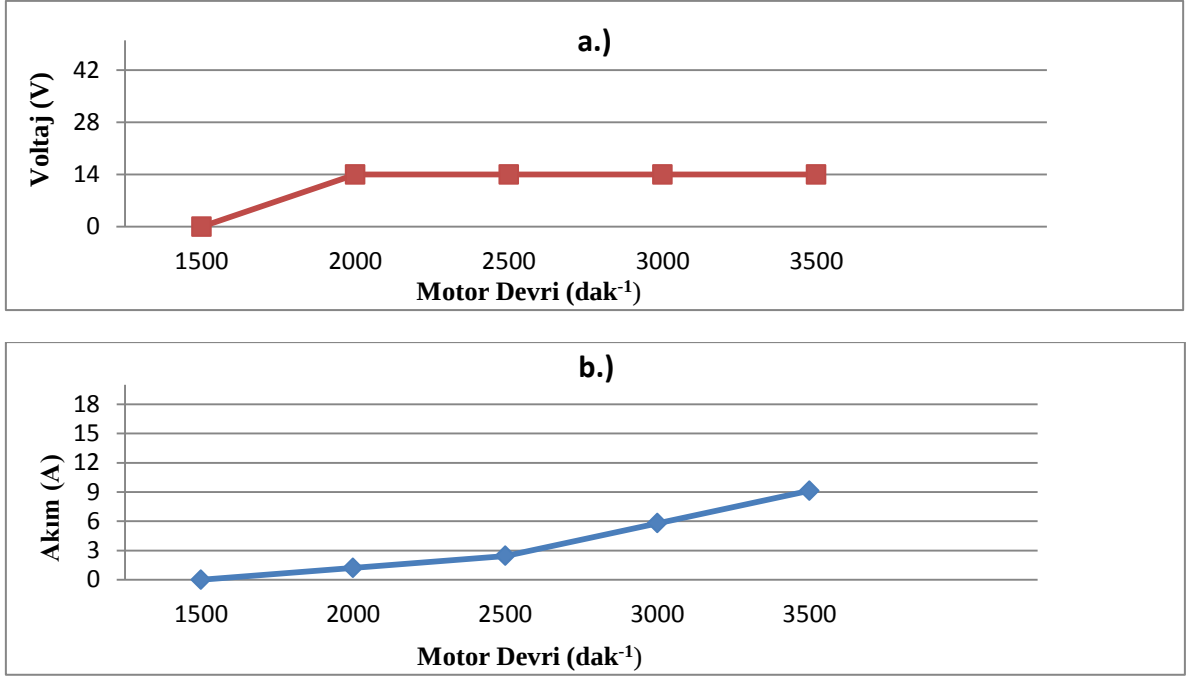


Şekil 3.10. DA/DA Konvertörün basit işlem şeması

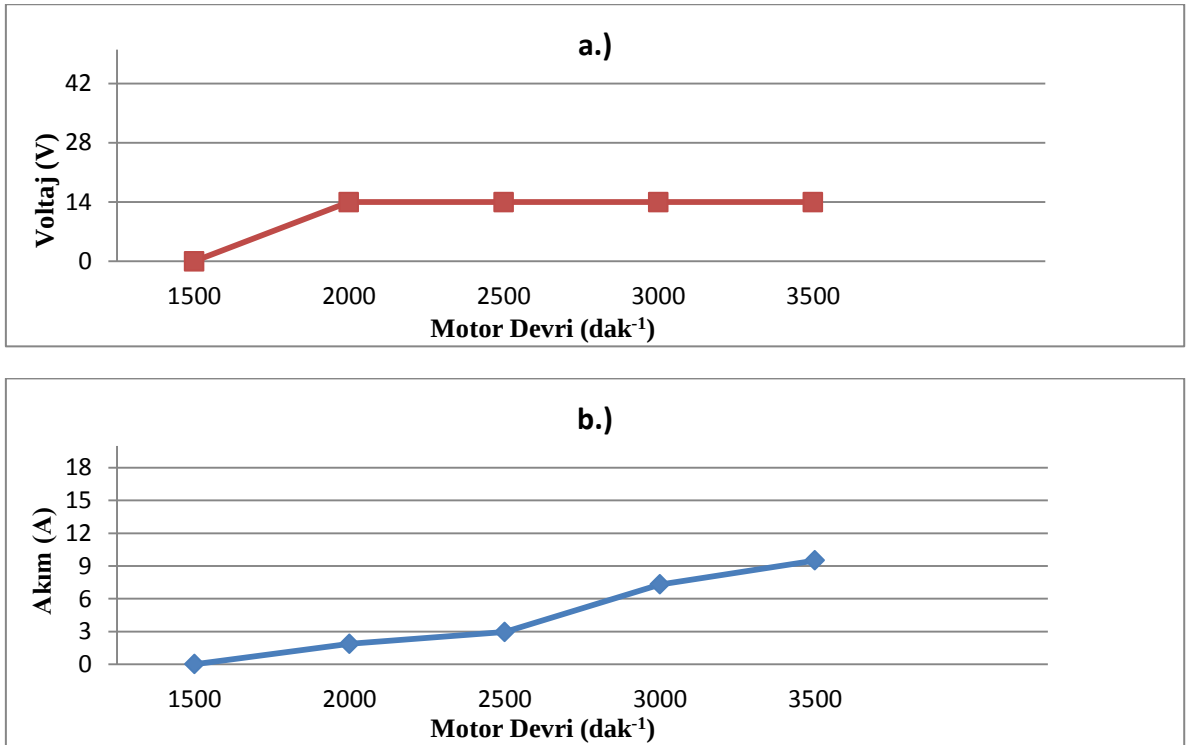
Bütün motor yük ve devir sayıları için konvertörün çıkış gerilimi 14 V değerine ayarlanmıştır. Çünkü 12 V araç aküsünün şarj işleminin gerçekleştirilmesi için bu değer üzerinde bir voltajla şarj işleminin başlatılması gerekir. 12 V- 60 A kapasiteli boş bir araç aküsü konvertör çıkışına bağlanmıştır. Devreye seri bağlanan ampermetre yardımıyla devreden geçen akü şarj akımı tespit edilmiştir. Ancak şarj işleminin gerçekleştirilmesi için TEJ sistemi tarafından üretilen voltajın konvertör çalışma voltajı aralığında olması gerekmektedir. Nitekim deney sonuçlarına bakıldığında tüm yükler için konvertörün en düşük çalışma voltajı olan 19 V değerinin motorun 1500  $\text{dak}^{-1}$  devirlerinde gerçekleşmediği görülmektedir. Bu olay tamamen seçilen konvertörün özellikleriyle ilgili bir durumdur. Motorun 50 Nm yükte ve 2000, 2500, 3000, 3500  $\text{dak}^{-1}$  devirlerinde şarj akımı sırasıyla 1.02, 2.17, 4.81 ve 8.53 A olarak kaydedilmiştir. 75 Nm yükte bu değerler 2000, 2500, 3000 ve 3500  $\text{dak}^{-1}$  motor devirlerinde sırasıyla 1.21, 2.44, 5.79 ve 9.12 A olarak kaydedilmiştir. Motorun 100 Nm yükte çalıştırılması ile bu değerler 2000, 2500, 3000 ve 3500  $\text{dak}^{-1}$  motor devirlerinde sırasıyla 1.87, 2.96, 7.31 ve 9.51 A olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.11. Motorun 50 Nm yükte çalışması durumunda oluşan şarj voltajı (a) ve akımı (b)



Şekil 3.12. Motorun 75 Nm yükte çalışması durumunda oluşan şarj voltajı (a) ve akımı (b)



Şekil 3.13. Motorun 100 Nm yükte çalışması durumunda oluşan şarj voltajı (a) ve akımı (b)

Sistemde konvertör kullanımı ile bataryada maksimum güç depolanması hedeflenmiştir. Burada konvertör kullanımı ile aynı zamanda TEJ ile batarya arasında güç

dengelenmesinde sağlanmıştır. Ancak konvertör devrelerde oluşan kayıplar nedeniyle bir miktar güç düşümü yaşanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde DA/DA konvertörün %85 verim ile çalıştığını söylenebilir. Bu güç kaybı beklenen bir sonuç olarak açıklanabilir.

Atık ısı enerjinin geri kazanımında büyük öneme sahip olan TEJ sistemi ile araç akü şarjı işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sistem yardımıyla atık ısının meydana geldiği süre boyunca sürekli elektrik enerjinin üretilmesi ve bunun taşıt sistemlerinde kullanılması mümkündür. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda Ansys analizleri ile bu sistemlerde meydana gelen değişimler daha detaylı bir biçimde incelenmiştir.

### **3.3. Isı ve Akış Analizi**

İçten yanmalı motorlarda artan devir sayısı ile birlikte birim zamanda meydana gelen çevrim sayısı ve piston hızlarında artışlar meydana gelmektedir. Bu artışlar beraberinde egzoz gaz sıcaklıklarının ve egzoz gaz hızlarının artmasına neden olmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda alınan verilere göre, egzoz gazı akış hızı ile sıcaklığı, motor devir sayısının artmasıyla beraber belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Ayrıca motorda egzoz gazlarının çıkış sıcaklığını arttıran bir diğer unsur ise yük artışıdır. Motorda oluşan bu şartlar altında TEJ sisteminde meydana gelen ısı ve akış analizleri Fluent programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin ısı ve akış analizinde, aynı anda paralel akış sergileyen iki akışkan söz konusudur. Gerçekleştirilen akış analizlerinde egzoz gazlarının ve soğutma suyunun termodinamik özellikleri değişen deneysel çalışma şartlarına göre sürekli güncellenmiştir. Burada ki temel amaç gerçek çalışma şartlarına ulaşarak sistemin modellenmesidir. Farklı sıcaklıklara sahip olan egzoz gazları ve soğutma suyunun TEJ sistemi üzerinde oluşturduğu sıcaklık dağılımları da bu analizlerde ele alınmıştır. Sıcaklık ölçümlerinde tıpkı deneysel çalışmada olduğu gibi giriş kısmında yer alan TEM'in her iki yüzeyinin sıcaklık değerleri sayısal olarak ifade edilmiştir. Diğer taraftan egzoz gaz giriş ve çıkış sıcaklığı değerleri de deneysel çalışma ile sağlıklı kıyaslamalar yapmak için ölçülmüştür. Programda ölçülen TEM'in yüzey sıcaklıkları noktasal olarak sıcaklık bilgisi veren prob yardımıyla alınmıştır.

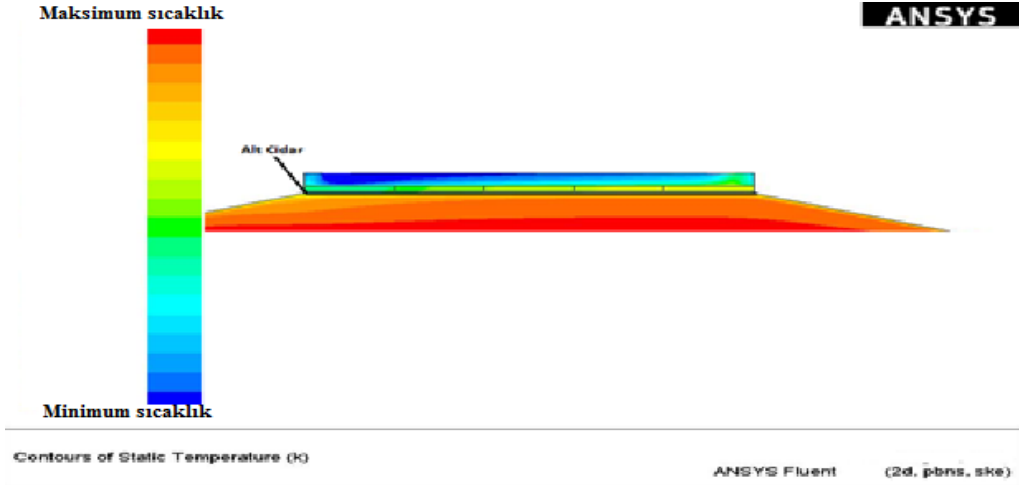
Ansys 12.0 Fluent yazılımı kullanılarak motorun 1500, 2000, 2500, 3000, 3500  $\text{dak}^{-1}$  devirler ve her bir devir için 50, 75 ve 100 Nm yüklerde çalıştırılması sonucu elde edilen deneysel verileri sınır giriş şartı olarak bu analizlerde kullanılmıştır. Gerçekleştirilen

egzoz analizlerinde sistemde oluşan sıcaklık, hız, basınç ve enerji dağılımları incelenmiştir. Motorun değişen bütün devir-yük şartlarına göre egzoz gazının sisteme giriş hızı, giriş sıcaklığı, soğutma suyunun giriş hızı ve sıcaklığı sınır giriş şartlarını oluşturmuştur.

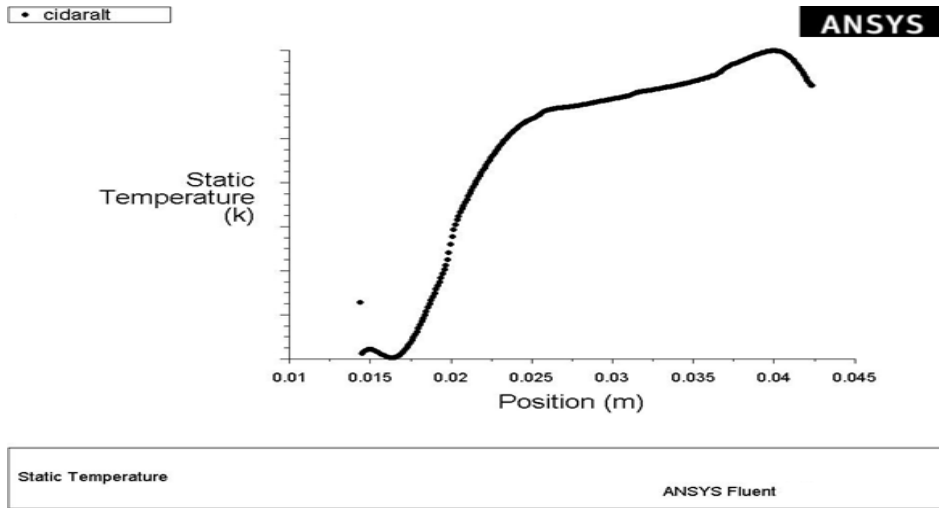
Analiz sonuçları incelendiğinde sürekli rejimde soğutma suyunun etkisiyle egzoz gazlarının bir miktar soğuduğu ve çıkış sıcaklığının bir miktar azaldığı, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ise doğal olarak giriş sıcaklığına kıyasla bir miktar arttığı görülmektedir. Cidar alt sıcaklık dağılımlarına bakıldığında, yine soğutmanın başlangıç noktasındaki sıcaklığın düştüğü ancak yüzey boyunca sıcaklığın gittikçe arttığı görülmektedir. TEM sıcaklık dağılımlarına bakıldığında bütün modüllerin aynı şartlar altında çalışmadığı ve özellikle sıcaklık dağılımlarının homojen olmadığı görülmektedir. Bu faktör termoelektrik modüllerin paralel bağlanmasının sistem için yanlış olacağı sonucunu doğurmaktadır. Çünkü paralel bağlantıda sıcaklık farkından oluşabilecek voltaj farklılıkları modüllerin zarar görmesine neden olurlar. Ayrıca bütün çalışma şartları altında sıcaklığın 180 °C'yi geçmemesi de önemli bir durum olarak dikkat çekmiştir. Çünkü TEM'lerin soğuk yüzeyi için maksimum çalışma sıcaklığı 180 °C'dir.

Egzoz gazların önce lüle daha sonra sekizgen kanal içerisinden geçirilerek akışın ısı olarak gelişimi sağlanmıştır. Çözümler kararlı rejim ve türbülanslı akış şartlarında yapılmıştır. Lüle girişinde akışın maksimum olduğu ve orta bölümlere doğru alan genişlemesinden dolayı hızın düştüğü, çıkış lülesindeki daralmadan dolayı da hızın yeniden arttığı görülmektedir. Özellikle ısı transferinin olduğu ara yüzey bölgesindeki hızların da oldukça düşük olduğu görülmüştür.

Değişen bütün motor yükü ve devir şartlarında TEM ile egzoz gazları arasındaki cidarda oluşan sıcaklık eğrisi benzer eğilimi göstermiştir. Burada elde edilen tek değişkenlik statik sıcaklık değeridir. Soğutma suyunun sisteme giriş yaptığı bölümde cidar sıcaklığının önce azaldığı, x eksenı boyunca arttığı görülmüştür. Soğutma suyu sıcaklığının yüzey boyunca artması soğutma etkinliğinin düşmesine neden olmuştur. Homojen olmayan alt cidardaki bu sıcaklık dağılımı birbirine elektriksel olarak seri bağlı olan modüllerin ürettiği enerjinde farklı olmasına neden olabilir. Farklı sıcaklık dağılımlarının neden olduğu bu durum nedeniyle modüllerin elektriksel bağlantı şekli büyük önem arz eder. Şekil 3.14'de egzoz gazlarını modüllerden ayıran cidarın görünümünü, Şekil 3.15 ise bütün motor çalışma şartları için ortak olan cidar sıcaklık dağılım eğrisini yansıtmaktadır.



Şekil 3.14. Alt cidar görünümü

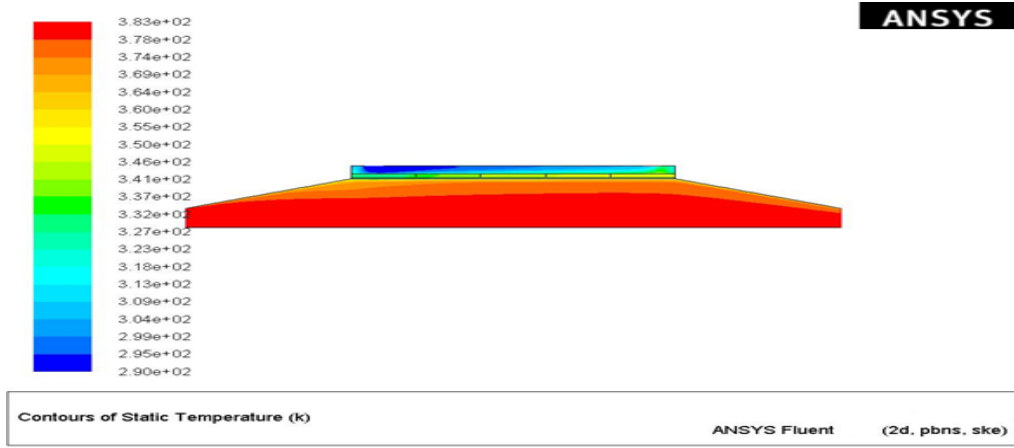


Şekil 3.15. Egzoz gaz tarafına bakan alt cidarda oluşan sıcaklık eğrisi

### 3.3.1. Motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devrinde çalışma şartlarında oluşan analiz sonuçları

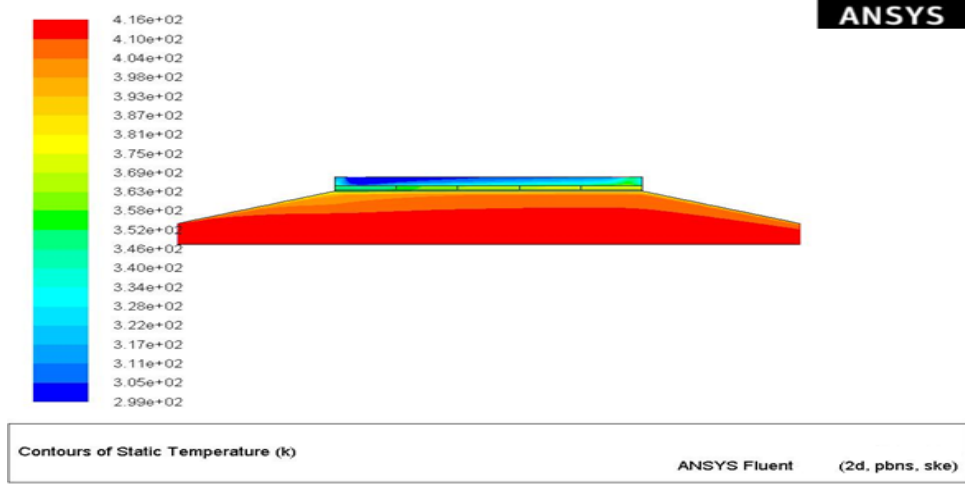
Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devrinde 50, 75 ve 100 Nm yüklerde çalıştırılması sonucunda TEJ sistemde oluşan sıcaklık dağılımları yer almaktadır. Motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devirde 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sistemi girişinde ölçülen egzoz gazı giriş sıcaklığı 110 °C, egzoz gaz hızı 18,5 m/sn, soğutma suyu giriş sıcaklığı 23 °C ve su giriş hızı 2 m/sn olan deneysel çalışma sonuçları bu analizin giriş şartlarını oluşturmuştur. Sistemde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 105-107 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığının yaklaşık

30-35 °C değerlerinde olduğu görülmektedir. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında soğuk yüzey sıcaklıkları 40 °C ile 44 °C aralığında, sıcak yüzeyin ise 67 °C ile 77 °C aralığında olduğunu söylenebilir. Soğutma suyu ile çevreye olan ısı transferi nedeniyle egzoz gaz sıcaklık değerlerinde azda olsa bir düşüş yaşanmıştır. Bu sonuç deneysel çalışmada da kanıtlanmıştır.



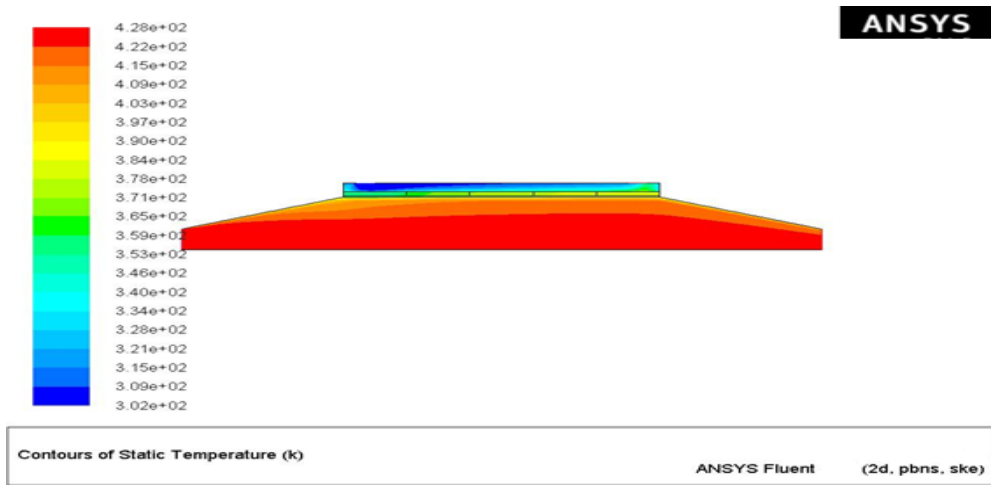
**Şekil 3.16.** Motorun 1500 dak<sup>-1</sup>devir ve 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

Motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devrinde 75 Nm yükte çalıştırılması sonucunda egzoz gazı giriş sıcaklığı 143 °C, egzoz gaz hızı 18,5 m/sn, soğutma suyu giriş sıcaklığı 26 °C ve su giriş hızı 2 m/sn'dir. Bu verilerin çalışma şartlarına göre sistemin analiz sonuçları incelendiğinde egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 137-143 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ise yaklaşık 37-43 °C değerlerinde olduğu görülmektedir. Motor yükünün artışı ile beraber artan egzoz gazı çıkış sıcaklıkları bu çalışmada sonucunda da bir önceki motor devrine kıyasla yükselmiştir. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde ise soğuk yüzeylerin sıcaklıklarının 45 °C ile 52 °C aralığında, sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 84 °C ile 95 °C aralığında değiştiği görülmektedir.



**Şekil 3.17.** Motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devrinde 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

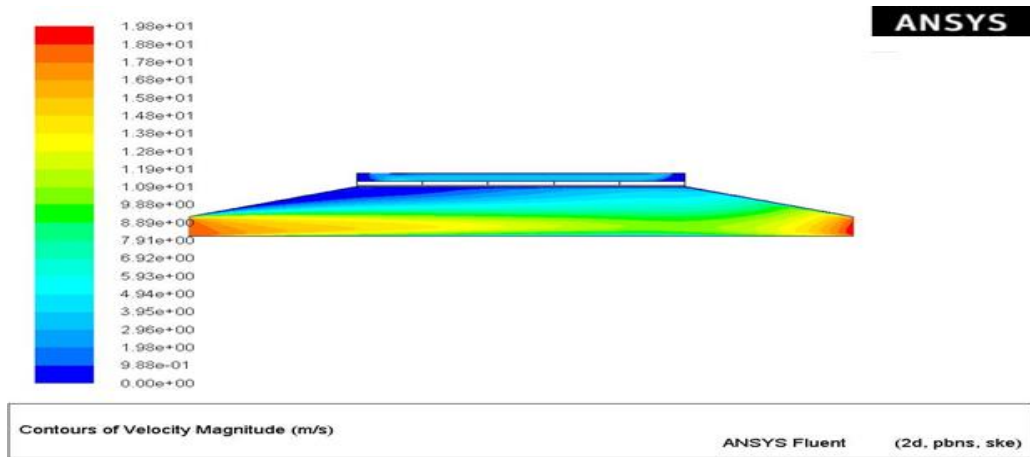
Motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devrinde 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu oluşan veriler ışığında sisteme giriş şartları olarak egzoz gazı giriş sıcaklığı 155 °C, egzoz gaz hızı 18,5 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 30 °C ve su giriş hızı 2 m/sn değerleri kullanılmıştır. İlk olarak sistemde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 148-155 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ise yaklaşık 41-50 °C değerlerinde olduğu görülmektedir. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında soğuk yüzer sıcaklıkları 47 °C ile 54 °C aralığında, sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 87 °C ile 102 °C aralığında olduğunu söylenebilir.



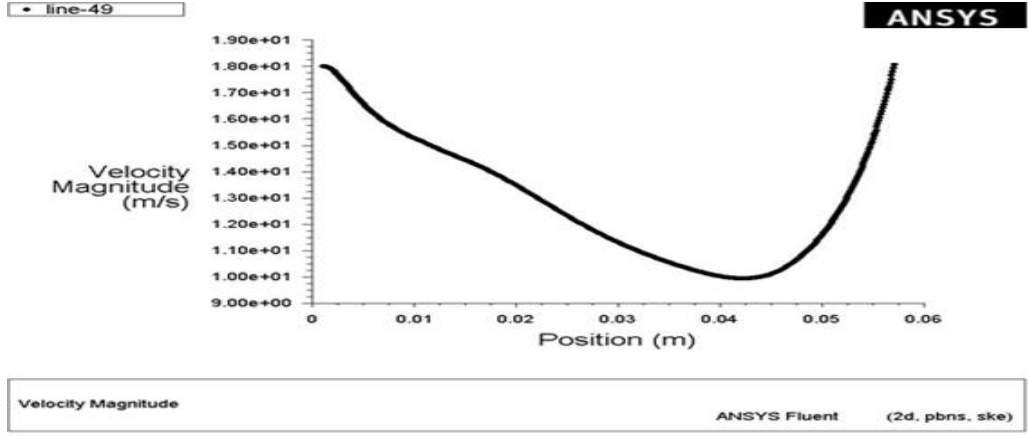
**Şekil 3.18.** Motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devirde 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

Hız ve statik basınç parametreleri incelendiğinde bu değerlerin birbirlerine bağımlı geliştiğini söylemek mümkündür. Bütün hız ve basınç analizleri incelendiğinde TEJ sistem içerisinde oluşan farklı basınç dalgalanmalarının olduğu söylenebilir. Motorun  $1500 \text{ dak}^{-1}$  devirde çalıştırılması sonucunda egzoz gazları TEJ sistemi içinde maksimum 191 Pascal statik basınç oluşturmuştur. Şekil 3.21’de statik basınç dağılımları görülmektedir. Aynı devir farklı yük şartlarında girilen egzoz gaz akış hızının sabit kabul edildiğinden yük şartlarına göre basınç miktarlarında değişme olmamıştır. Bu nedenle aynı yük şartlarında benzer sonuçların elde edildiği söylenebilir.

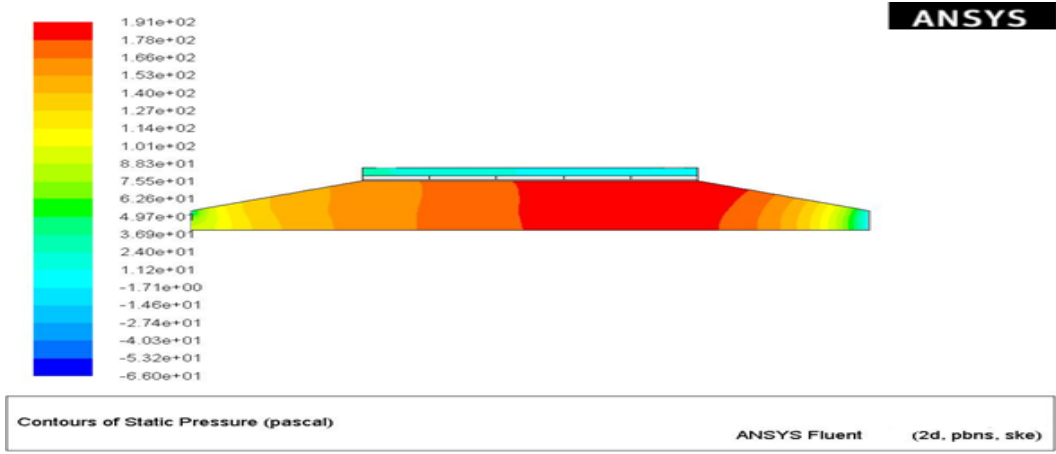
Bütün analiz sonuçları için özellikle köşe noktalarında egzoz gaz hızının etkisini kaybettiği, yine aynı şekilde yatay eksen boyunca önce azaldığı, daha sonra daralan kesit yapısıyla birlikte kademeli bir şekilde hızın tekrardan arttığını söylemek mümkündür. Yanma sonucunda belirli bir hız ve sıcaklığa sahip olan egzoz gazlarının iç cidar bölgelerinde soğuması ve alan ile birlikte hızın düşmesi maksimum basıncı doğurmuştur. Hızın TEJ sistemin orta bölümlerde yavaş olmasından dolayı yüksek basınç egzoz gaz moleküllerini hızlı bölgedeki düşük basınç bölgesine itmiştir. Hızla daralan bölgeyi geçen egzoz gazları geniş bir bölüme geldiğinde önünde yer alan yüksek basınç nedeniyle yavaşlamışlardır. Hızın yüksek olduğu bölgelerde basıncın düştüğü, hızın azaldığı bölgelerde ise basıncın arttığı görülmektedir. Egzoz gazlarının TEJ sisteme giriş bölgesi ile çıkış bölgesi arasında da statik basınç farkının olduğu görülmektedir. Düzensiz gelişen hız dağılımı ve sıcaklık azalmaları beraberinde basınç düşüşlerini oluşturmaktadır.



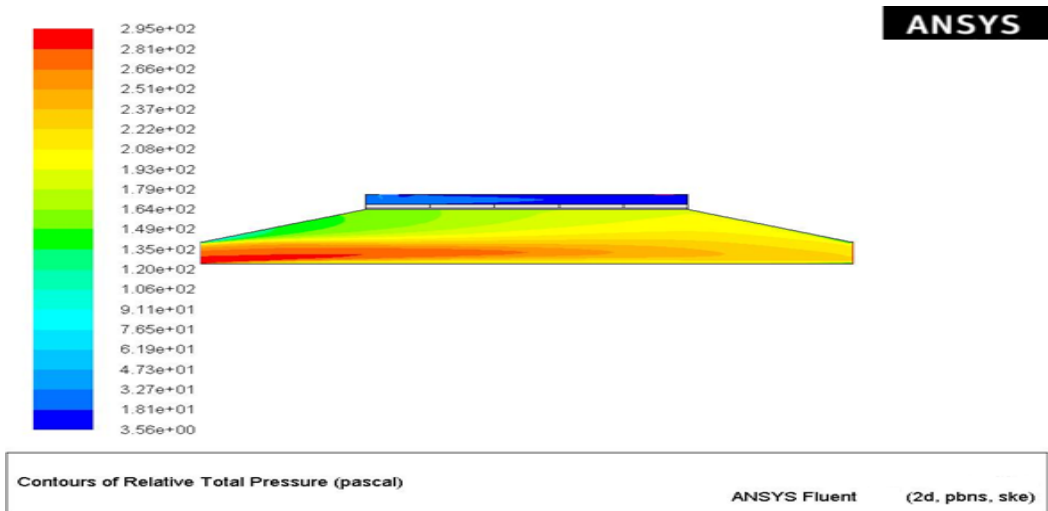
Şekil 3.19. Motorun  $1500 \text{ dak}^{-1}$  devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı



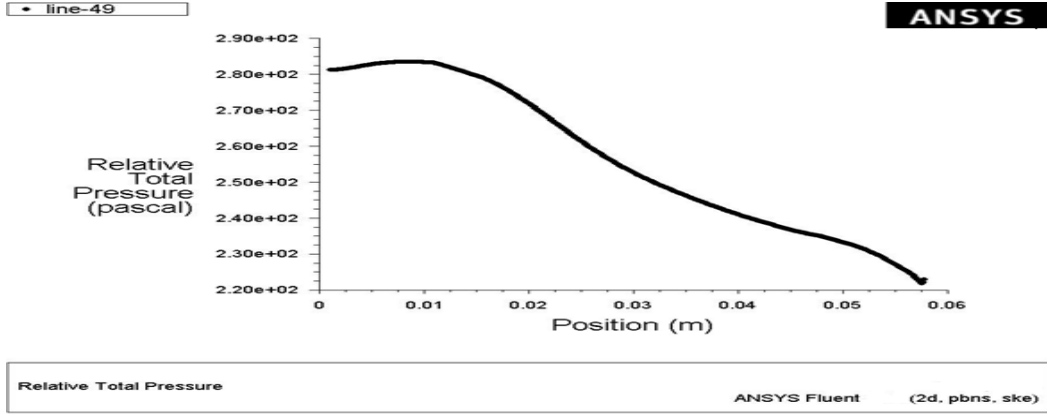
Şekil 3.20. x eksenı boyunca değışen hız değeri



Şekil 3.21. Motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı



Şekil 3.22. Motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan toplam basınç dağılımı



Şekil 3.23. x eksenı boyunca değışen toplam basınç değeri

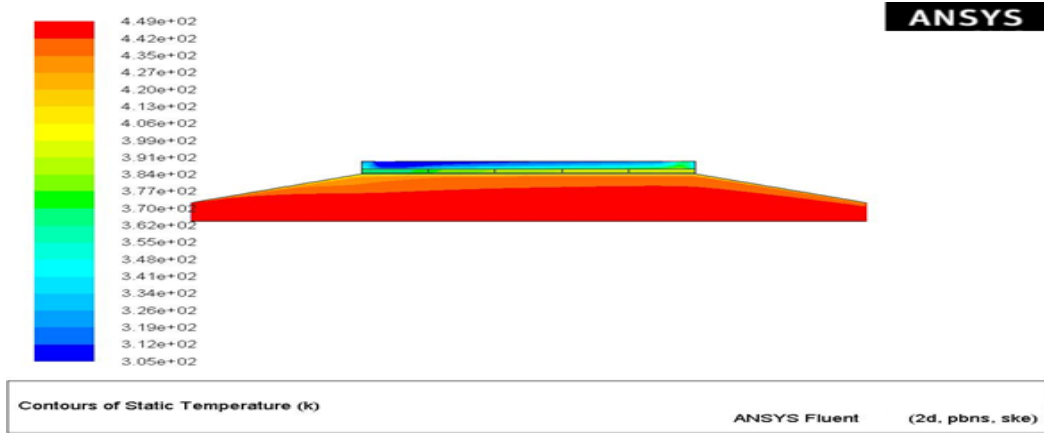
Özellikle TEJ sistemine giriş yapan egzoz gazlarının hız değeri belirli bir mesafe boyunca düşüş eğilimi göstermiştir. Ancak egzoz gazlarının TEJ sistemi çıkışında sahip oldukları hız değeri incelendiğinde çok fazla bir kayba uğramadığı ve girişe kıyasla fazla bir değişimin olmadığı görülmektedir. Toplam basınç değeri incelendiğinde egzoz gaz hızıyla paralel geliştiğini söylenebilir. Çıkış bölümüne doğru gaz hızındaki düşüş toplam basıncın azalmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Bilindiği gibi, boru hatlarındaki basınç kaybı viskoz etkilerin sebep olduğu sürtünmeden dolayı meydana gelen sürekli kayıplar ile farklı boru ve tesisat elemanlarının sebep olduğu direncin meydana getirdiği yerel kayıpların toplamıdır. Egzoz sistemlerinde akışın geçtiği borulara genişleme ve daralmalar oluşturabilecek ek yapılar kullanılabilir. Gerek borular gerekse bu ek yapılar düzgün akış yapısını kesintiye uğratar ve yerel kayıplara neden olur. Bu çalışma kapsamında egzoz sistemine ek olarak ilave edilen ve sayısal çalışma kısmında analizleri gerçekleştirilen model de düz borunun yanında bir adet yavaş genişleme (giriş) ve bir adet yavaş daralma (çıkış) görülmektedir. Yapılan çalışmalarda yavaş genişleme için belirlenen kayıp katsayısı 0.1 ile 0.3 arasında, yavaş daralma ise 0.02 ile 0.07 arasında değişim göstermekle birlikte bu değerler daralma ve genişleme açısı ve çapların oranına göre netleşmektedir. Bu kayıp katsayıları akış enerji denkleminde eklenip basınç ve hızlarda yerine yazıldığı zaman çıkış basıncında düşme meydana getirir. Bu etki gerçek akış sistemlerinin tamamında mevcut olup, özellikle bu çalışmada olduğu gibi yüksek akış hızlarına sahip sistemlerde daha belirgin bir hal almaktadır. Dolayısıyla sonuçlarda toplam basıncın çıkışa doğru düşüş göstermesi yerel

kayıpların doğal bir sonucudur. Ayrıca hızda ciddi bir değişim olmaması çıkış da kesit daralmasına bağlı olarak hızın tekrar artmasının bir fonksiyonudur. Fluent yardımıyla elde edilen bütün deney sonuçları incelendiğinde, motorun değişen bütün yük ve devir şartları için termoelektrik sistemin de bu sonuçlar geçerli olmuştur.

### 3.3.2. Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devirde çalışma şartlarında oluşan analiz sonuçları

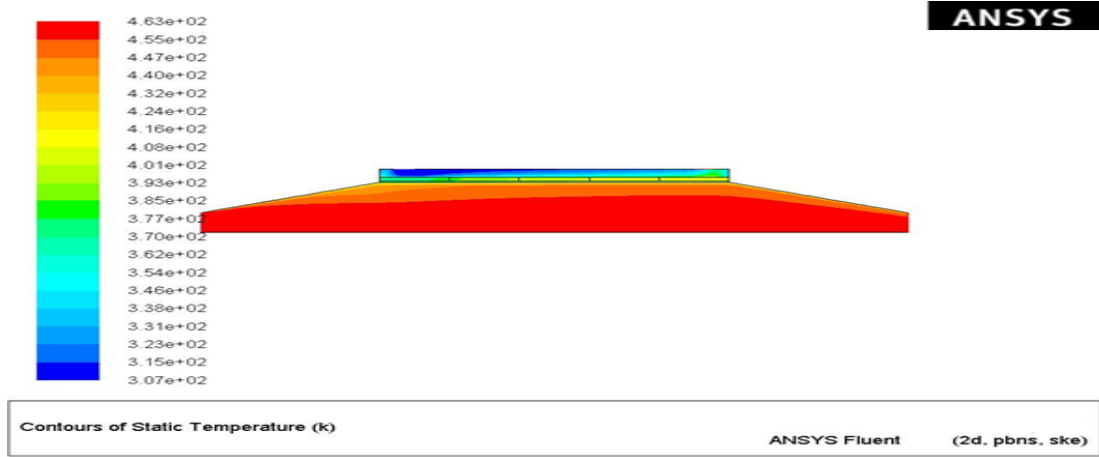
Motorda maksimum tork devri olan 2000 dak<sup>-1</sup> devir için 50, 75, 100 Nm olmak üzere 3 farklı yükte yapılan ölçüm verileri Fluent çalışmamızda giriş sınır şartlarını oluşturmuştur. Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devirde 50 Nm yükte çalışan motorda ölçülen egzoz gazı giriş sıcaklığı 176 °C, egzoz gaz hızı 22 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 33 °C ve su giriş hızı 2 m/sn'dir. Bu verilerin programa yüklenmesi ile beraber sürekli rejim altında yapılan çözümlemeye göre egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 168 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığı ise yaklaşık 46-55 °C aralığında olmuştur. Sistem içerisinde egzoz gazları ile dış duvarlar arasında gerçekleşen ısı transfer oranına bağlı olarak egzoz gaz sıcaklıklarında bir miktar azalma olması beklenen bir durum olmuştur. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde soğuk yüzey sıcaklıkları 53 °C ile 63 °C aralığında, sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 105 °C ile 118 °C aralığında değişkenlik göstermiştir.



Şekil 3.24. Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devrinde 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

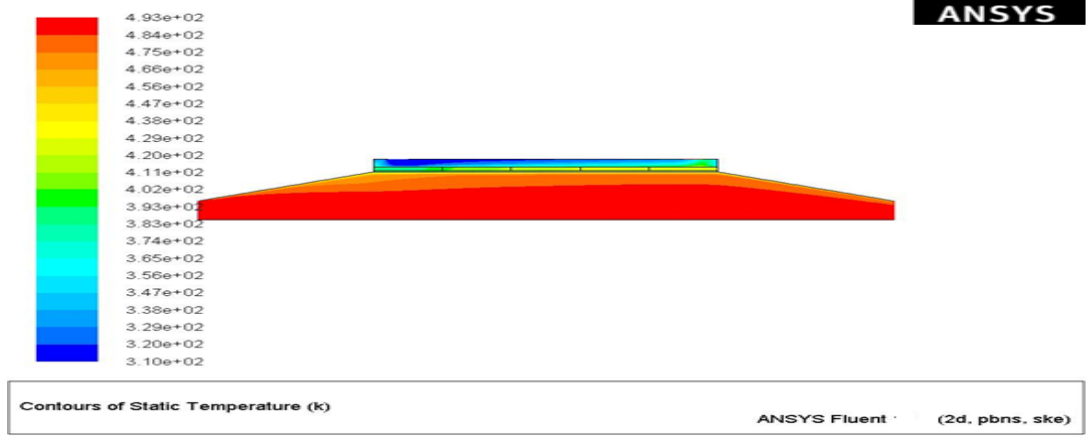
Benzer şekilde motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devrinde 75 Nm yükte çalışmasıyla oluşan veriler kullanılarak bu devir için ikinci analiz gerçekleştirilmiştir. Egzoz gazı giriş sıcaklığı 190 °C, egzoz gaz hızı 22 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 36 °C ve su giriş hızı 2 m/sn olan veriler sınır şartı olarak girilmiştir. Bu verilerin programa girilmesi ile beraber

sürekli rejim altında yapılan çözümlemeye göre egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 182 °C-187 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığı yaklaşık 50–65 °C olmuştur. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde soğuk yüzey sıcaklıkları 60 °C ile 76 °C aralığında, sıcak yüzeyin ise 120 °C ile 129 °C aralığında değişkenlik göstermiştir.



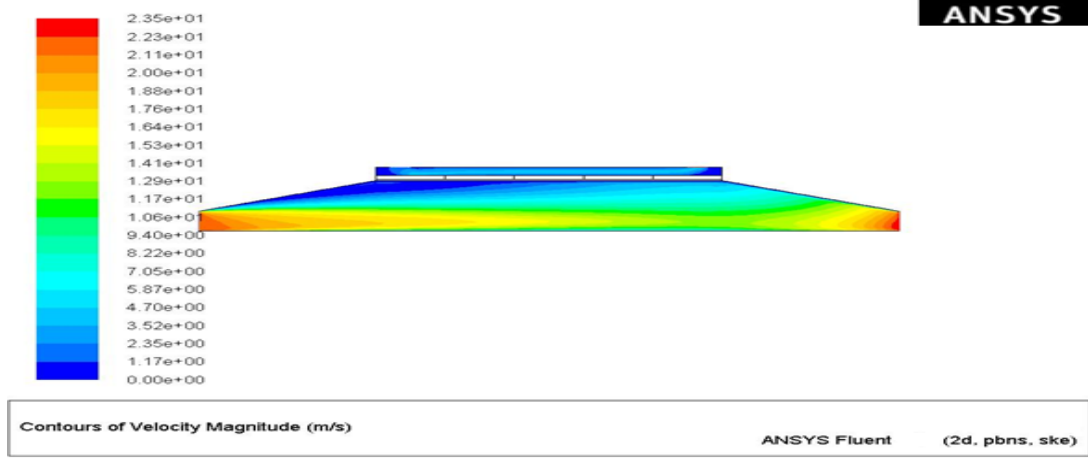
**Şekil 3.25.** Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devrinde 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

Son olarak motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devrinde 100 Nm yükte çalışması sonucu oluşan egzoz gazı giriş sıcaklığı 220 °C, egzoz gaz hızı 22 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 40 °C ve su giriş hızı 2 m/sn olan verileri sınır şartı olarak girilmiştir. Bu verilerin programa girilmesi ile beraber sürekli rejim altında yapılan çözümlemeye göre egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 210 °C-217 °C aralığında değiştiği, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ise yaklaşık 54-73 °C aralığında olduğu görülmektedir. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde soğuk yüzey sıcaklıkları 67 °C ile 80 °C aralığında, sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 137 °C ile 147 °C aralığında değişkenlik göstermiştir.

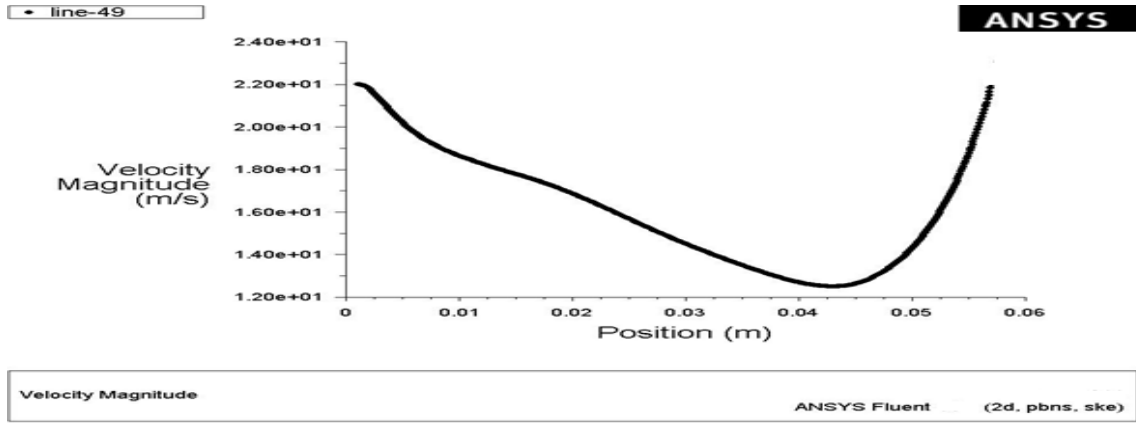


**Şekil 3.26.** Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devrinde 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

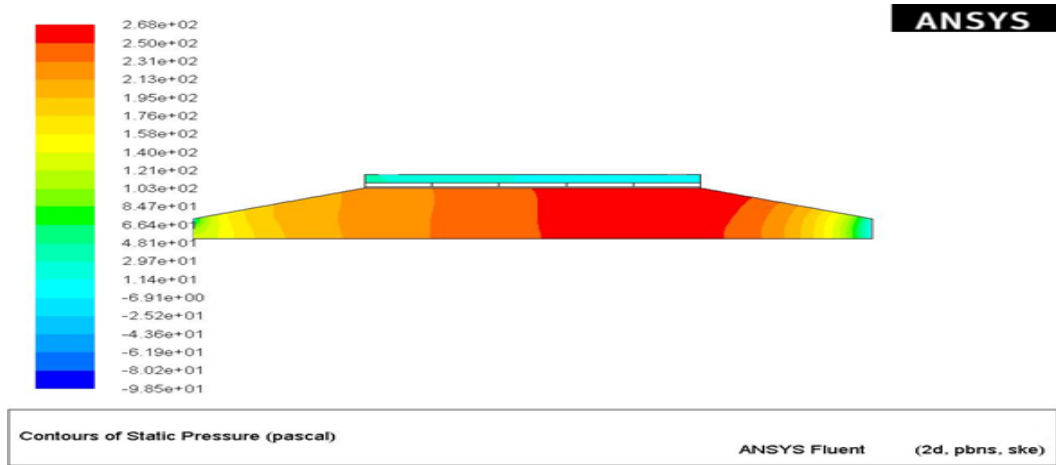
Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devir çalışma şartlarında TEJ sisteminde oluşan hız ve statik basınç dağılımları sırasıyla Şekil 3.27 ve Şekil 3.29'da görülmektedir. Basınç analizleri incelendiğinde egzoz gazlarının TEJ sistem içerisinde oluşturdukları maksimum basınç değeri 267 Pascal'dır. 22 m/sn hıza sahip olan egzoz gazları kademeli bir şekilde basıncı arttırdığı görülmektedir. Aynı devir farklı yük şartlarında girilen egzoz gaz akış hızının sabit kabul edildiğinden yük şartlarına göre basınç miktarlarında değişme olmamıştır. Hız analizi sonuçları incelendiğinde özellikle egzoz gazlarının giriş yaptığı köşe noktasında hız sıfıra yakın çıkmıştır. Egzoz gazlarının geçtiği alanın artmasıyla paralel olarak egzoz gaz hızının etkisini kaybettiği ve daha sonra daralan kesit yapısıyla birlikte kademeli şekilde hızın tekrar arttığını söylemek mümkündür. Yanma sonucunda belirli bir hız ve sıcaklığa sahip olan egzoz gazlarının iç cidar bölgelerinde soğuması ve alan ile birlikte hızın düşmesi maksimum basıncı doğurmuştur. Hızın TEJ sistemin orta bölümlerde yavaş olmasından dolayı yüksek basınç egzoz gaz moleküllerini hızlı bölgedeki düşük basınç bölgesine itmiştir. Hızla daralan bölgeyi geçen egzoz gazları geniş bir bölüme geldiğinde önünde yer alan yüksek basınç nedeniyle yavaşlamışlardır. Hızın yüksek olduğu bölgelerde statik basıncın düştüğü, hızın azaldığı bölgelerde ise statik basıncın arttığı görülmektedir. Motor devrinin artmasıyla birlikte egzoz gazı giriş basıncıda artmıştır. Ancak egzoz gaz hızında meydana gelen artış daha fazla basınç kaybının oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



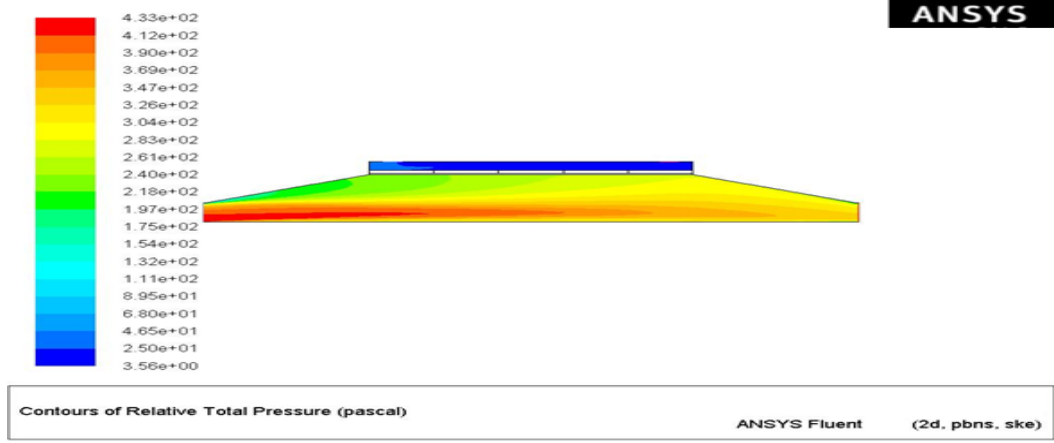
Şekil 3.27. Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı



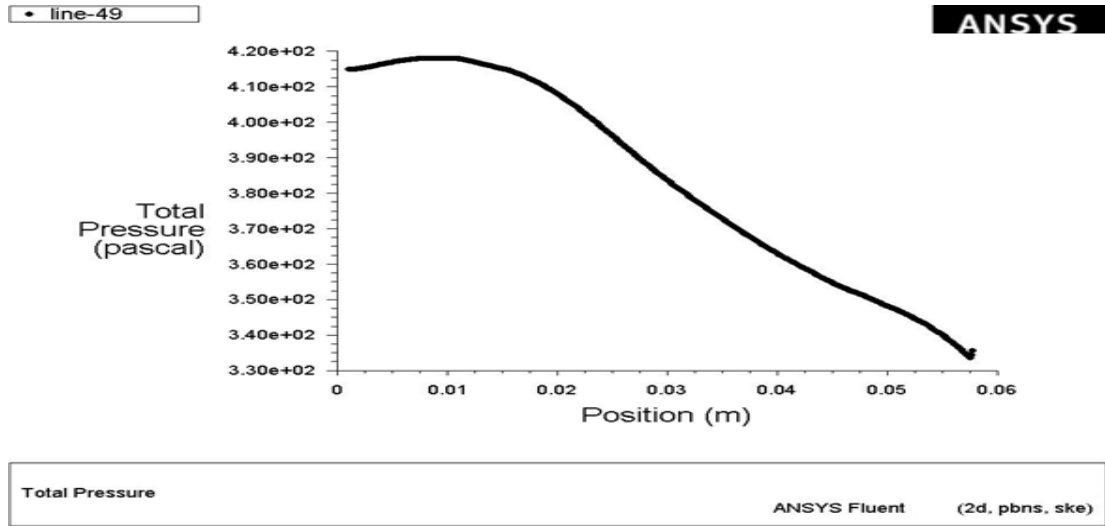
Şekil 3.28. x eksenı boyunca TEJ sisteminde oluşan hız değeri



Şekil 3.29. Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devirde çalışmasıyla TEJ sistemde oluşan statik basınç dağılımı



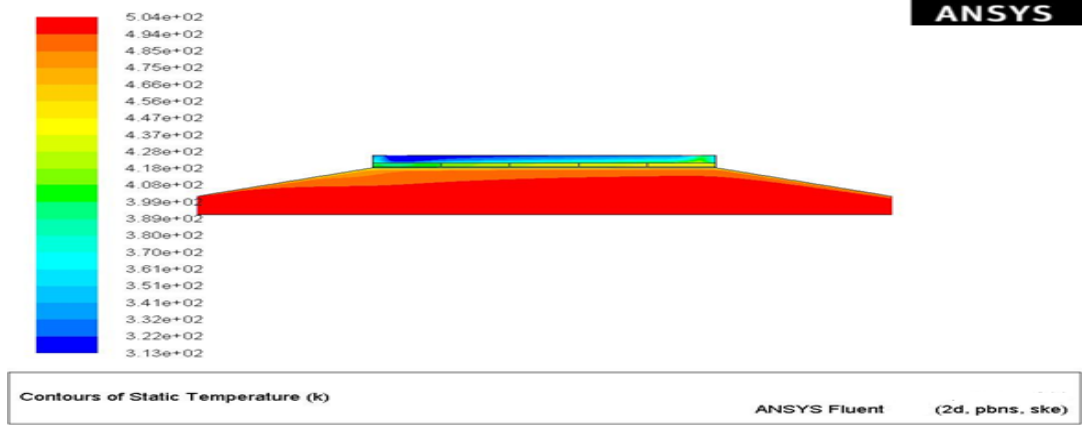
Şekil 3.30. Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devirde çalışmasıyla TEJ sistemde oluşan toplam basınç dağılımı



Şekil 3.31. x eksenı boyunca değışen toplam basınç değeri

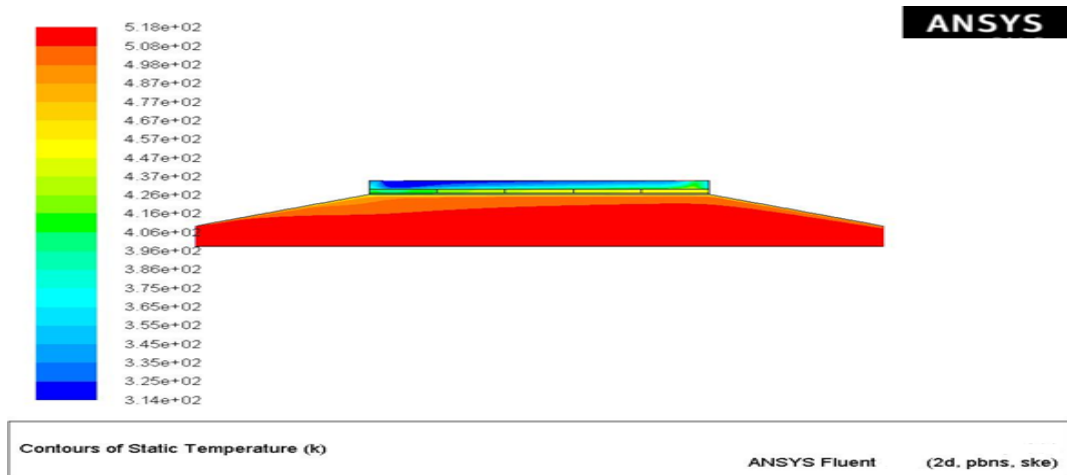
### 3.3.3. Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devirde çalışma şartlarında oluşan analiz sonuçları

Bu bölümde motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devir ve 50, 75, 100 Nm yük altında çalışması sonucunda elde edilen verilerin kullanılmasıyla TEJ sisteminde oluşan sonuçlar incelenmiştir. Sınır şartları olarak 2500 dak<sup>-1</sup> devir ve 50 Nm yükte çalışan motor da ölçülen egzoz gazı giriş sıcaklığı 230 °C, egzoz gaz hızı 27,9 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 43 °C ve su giriş hızı 2 m/sn olan deneysel veriler kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 221-230 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığı yaklaşık 57-70 °C aralığında olduğu görülmektedir. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında soğuk yüzey sıcaklıklarının 73 °C ile 87 °C aralığında, sıcak yüzeyin ise 144 °C ile 160 °C aralığında olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.32.** Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devir 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

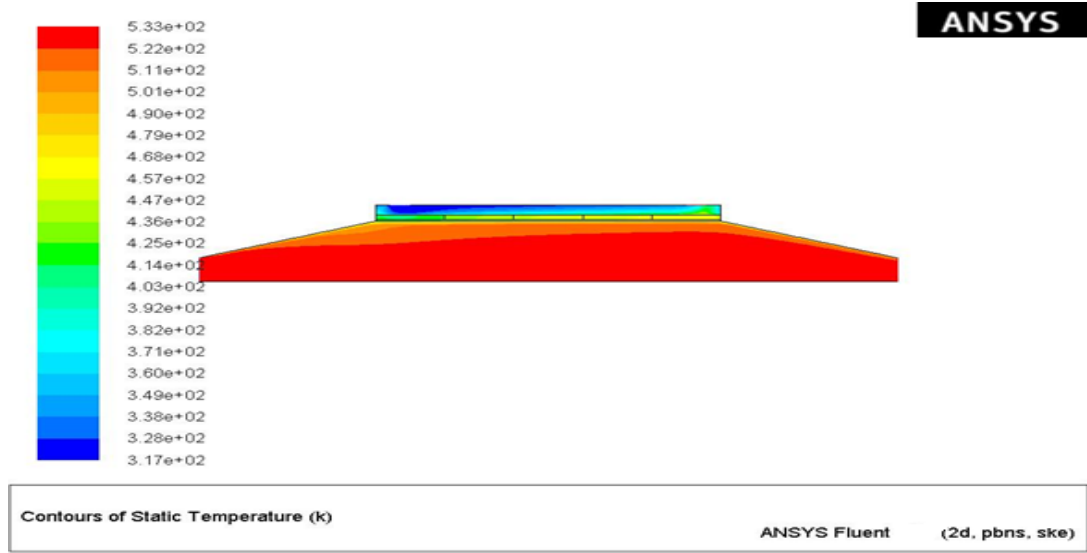
Benzer şekilde motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devirde 75 Nm yükte çalıştırılmasıyla elde edilen egzoz gazı giriş sıcaklığı 245 °C, egzoz gaz hızı 27,9 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 45°C ve su giriş hızı 2 m/sn olan verileri sınır şartı olarak girilmiştir. Bu verilerin programa girilmesi ile beraber sürekli rejim altında yapılan çözümlemeye göre egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 234 °C-245 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığı yaklaşık 61-76 °C olmuştur. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde soğuk yüzey sıcaklıkları 75 °C ile 92 °C aralığında, sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 160 °C ile 173 °C aralığında değişkenlik göstermiştir.



**Şekil 3.33.** Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devir 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

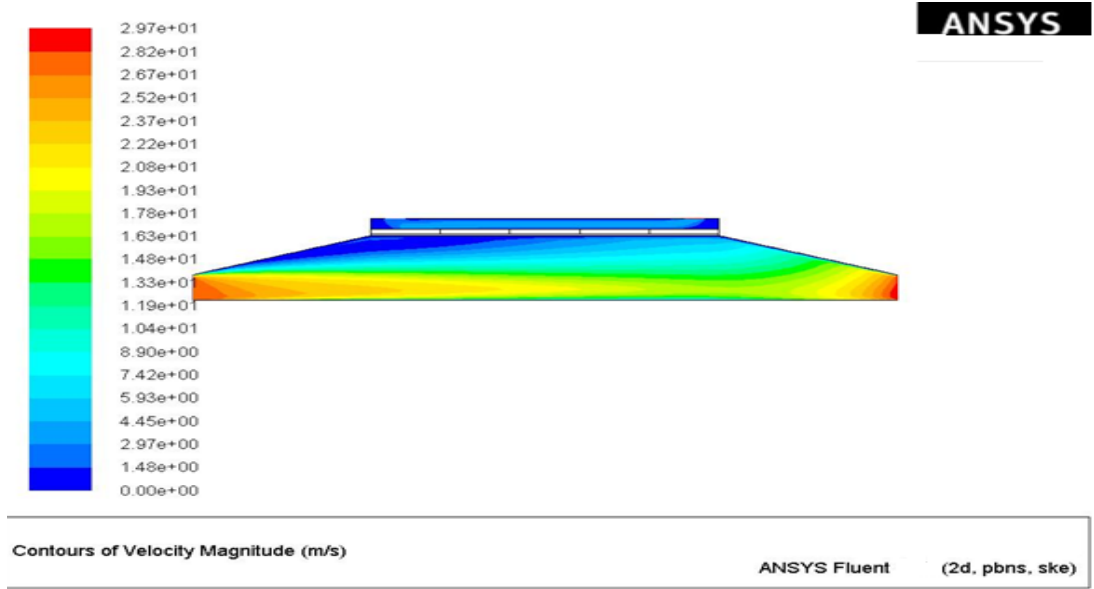
Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devir 100 Nm yükte çalışmasıyla oluşan verileri kullanılmış ve egzoz gazı giriş sıcaklığı 260 °C, egzoz gaz hızı 27,9 m/sn, soğutma suyu giriş sıcaklığı yaklaşık olarak 48 °C ve su giriş hızı 2 m/sn olan değerleri sınır şartı olarak sisteme

girilmiştir. Bu verilerin programa girilmesi ile beraber sürekli rejim altında yapılan çözümlmeye göre egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 249 °C-260 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığı ise yaklaşık 66-76 °C olmuştur. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde soğuk yüzey sıcaklıkları 85 °C ile 92 °C aralığında, sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 182 °C ile 193 °C aralığında değişkenlik göstermiştir.

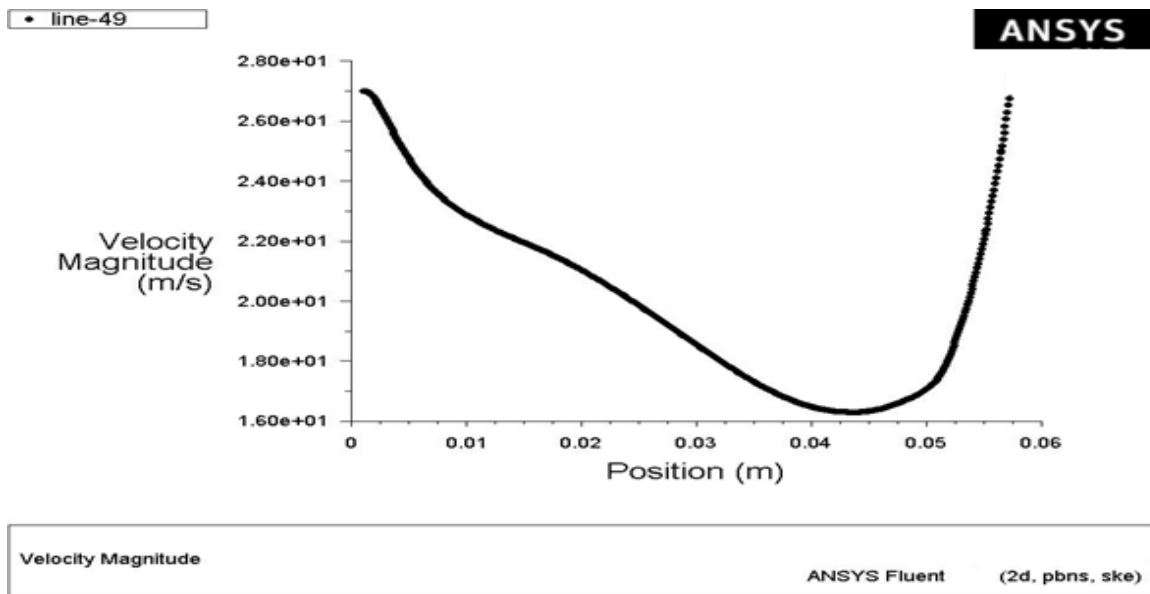


**Şekil 3.34.** Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devir 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

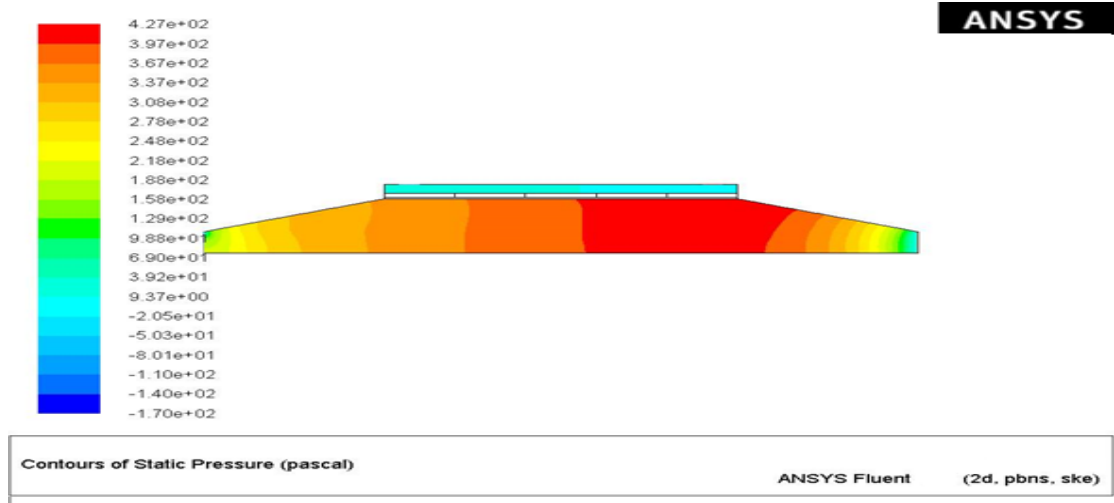
Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devirde çalışması sonucunda TEJ sisteminde oluşan hız ve basınç değerleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Hız- basınç şekilleri incelendiğinde maksimum statik basınç değerinin 426 Pascal toplam basıncı 638 Pascal'dır. Egzoz sistemi boyunca belirli bir hıza ve akış şekline sahip olan egzoz gazları TEJ sistemine girişinde hız dağılımını koruma eğiliminde olup alanın artması ile bu etkisi azalmıştır.



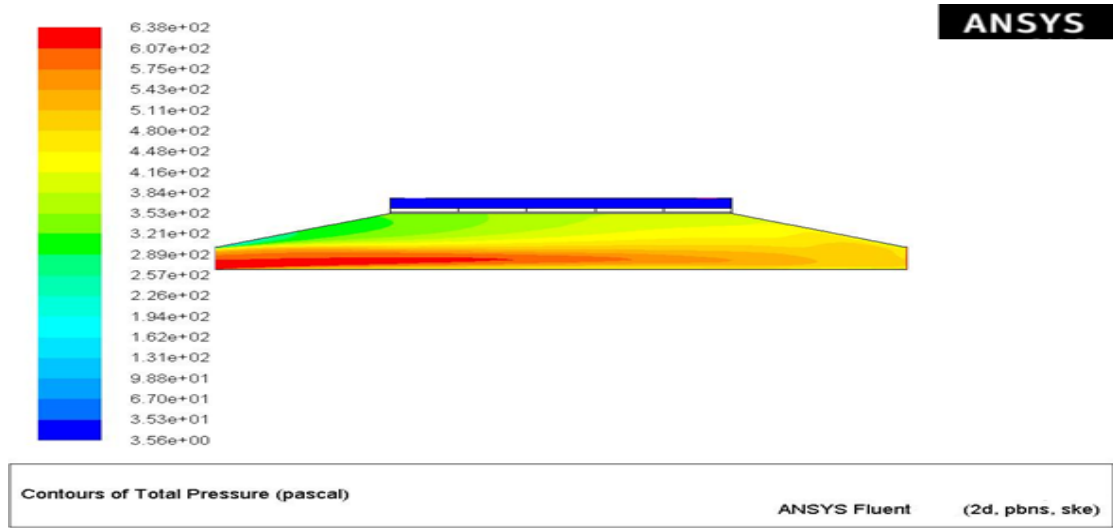
Şekil 3.35. Motorun 2500  $\text{dak}^{-1}$  devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı



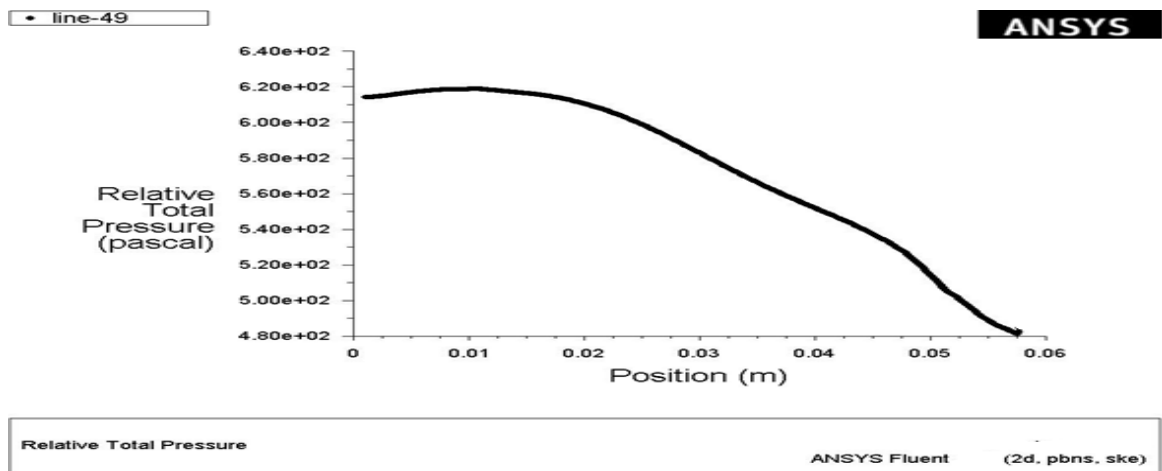
Şekil 3.36. x eksenı boyunca değışen hız değeri



Şekil 3.37. Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı



Şekil 3.38. Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan toplam basınç dağılımı

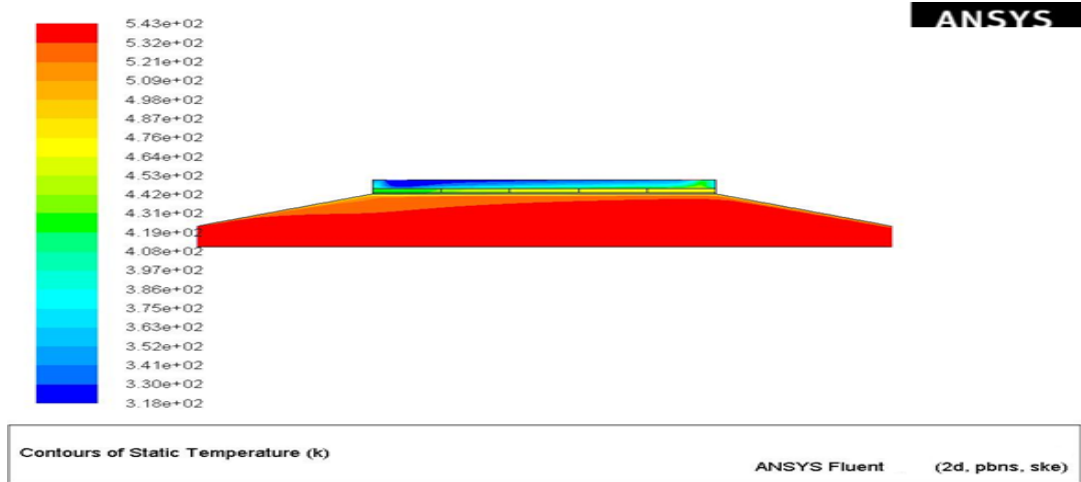


Şekil 3.39. x eksenı boyunca değışen toplam basınç değeri

Bir önceki motor devri ile kıyaslandığında basınç düşüş oranı bu çalışma şartlarında daha fazla görülmektedir. Bu olay ani genleşme ve ani daralmanın sistemde meydana getirdiği kayıp olarak bilinir. Bu kayıp katsayıları sistemin çıkış basıncında düşmeyi meydana getirir. Bu etki gerçek akış sistemlerinin tamamında mevcut olup, özellikle bu çalışmada olduğu gibi yüksek akış hızlarına sahip sistemlerde daha belirgin bir hal almıştır. Dolayısıyla önceki sonuçlara benzer şekilde toplam basıncın çıkışa doğru düşüş göstermesi yerel kayıpların doğal bir sonudur.

### 3.3.4. Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devirde çalışma şartlarında oluşan analiz sonuçları

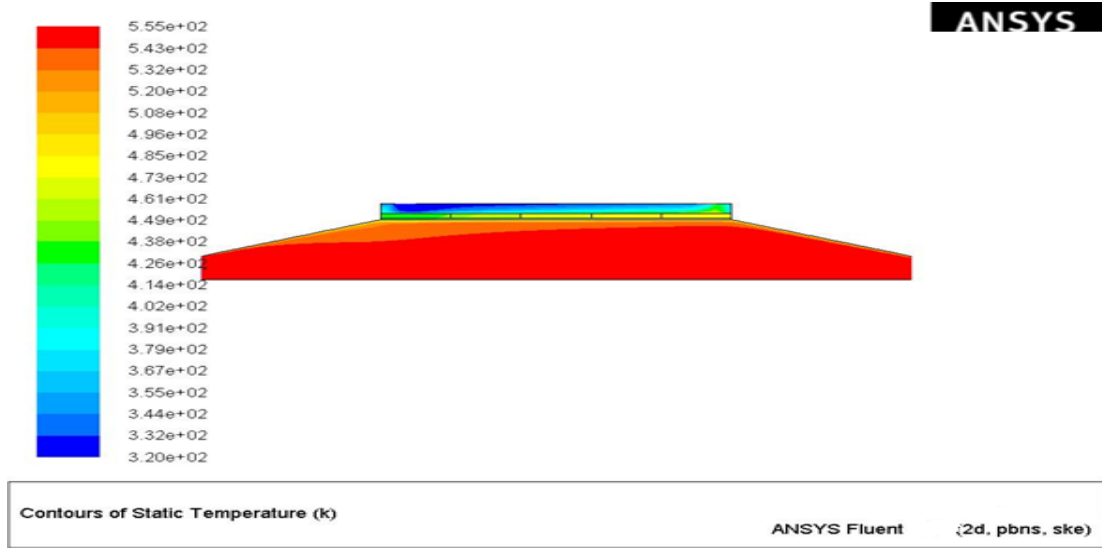
Bu bölümde motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devirde ve 50, 75, 100 Nm yüklerde çalışması sonucunda elde edilen verilerin kullanılmasıyla TEJ sistem incelenmiştir. 3000 dak<sup>-1</sup> devirde 50 Nm yükte çalışan motor da ölçülen egzoz gazı giriş sıcaklığı 270 °C, egzoz gaz hızı 34 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 50 °C ve su giriş hızı 2 m/sn olan deneysel çalışma değerleri bu analizde sınır şartı olarak girilmiştir. Elde edilen bulgulara göre egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 258 - 267 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığı yaklaşık 65 - 80 °C olmuştur. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında soğuk yüzey sıcaklıkları 90 °C ile 101 °C aralığında, sıcak yüzeyin ise 182 °C ile 193 °C aralığında olduğu söylenebilir.



**Şekil 3.40.** Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devirde 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

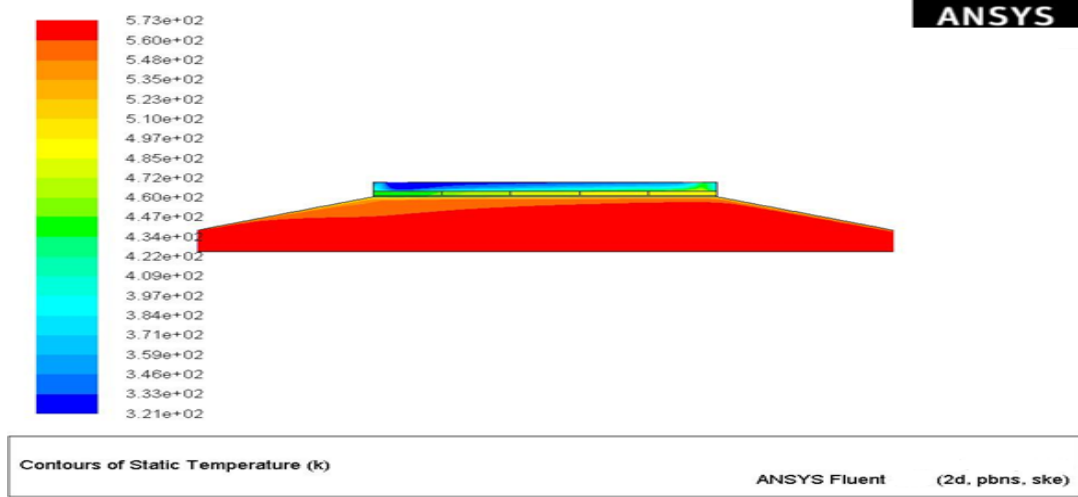
Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devir 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sistemi girişinde ölçülen egzoz gazı giriş sıcaklığı 282 °C, egzoz gaz hızı 34 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 52 °C ve su giriş hızı 2 m/sn olan deneysel çalışma değerleri bu analizin sınır

şartlarını oluşturmuştur. İlk olarak sistemde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelenmiş ve egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 270-277 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ise yaklaşık 67-80 °C değerlerinde olduğu görülmektedir. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında soğuk yüzey sıcaklıkları 85 °C ile 102 °C aralığında, sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 192 °C ile 199 °C aralığında olduğu görülmektedir.



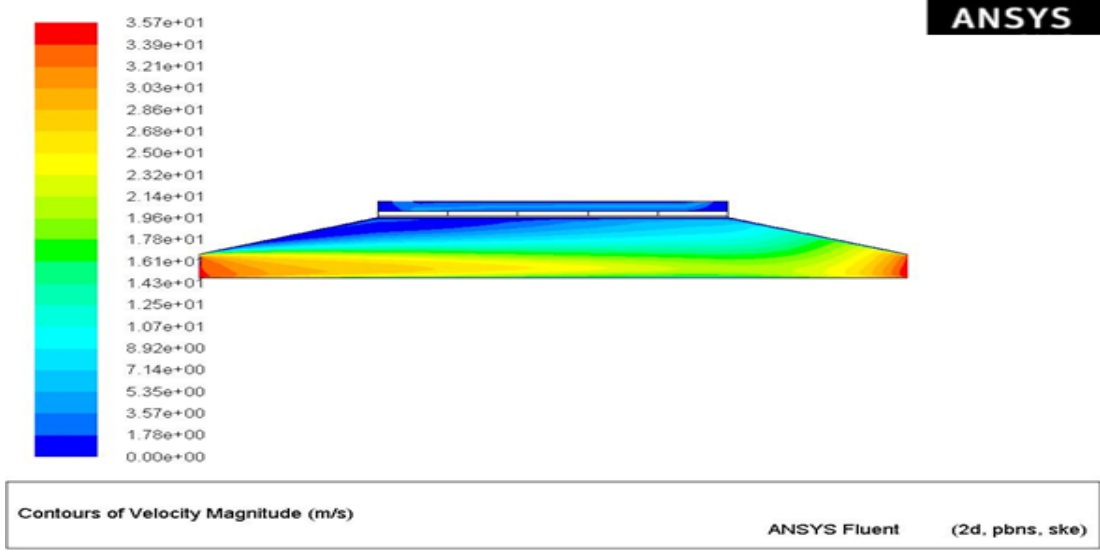
**Şekil 3.41.** Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devir 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devirde 100 Nm yükte çalıştırılması sonucunda ise TEJ sistemi girişinde ölçülen egzoz gazı giriş sıcaklığı 300 °C, egzoz gaz hızı 34 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 53 °C ve su giriş hızı 2 m/sn olmuştur. Bu sonuçlar kullanılarak oluşturulan giriş şartlarına göre sistemde meydana gelen sıcaklık dağılımları incelenmiş ve egzoz gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 287 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ise yaklaşık 70-80 °C aralığında olduğu görülmektedir. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında soğuk yüzey sıcaklıkları 90 °C ile 107 °C aralığında, sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 212 °C ile 222 °C aralığında değiştiği söylenebilir.

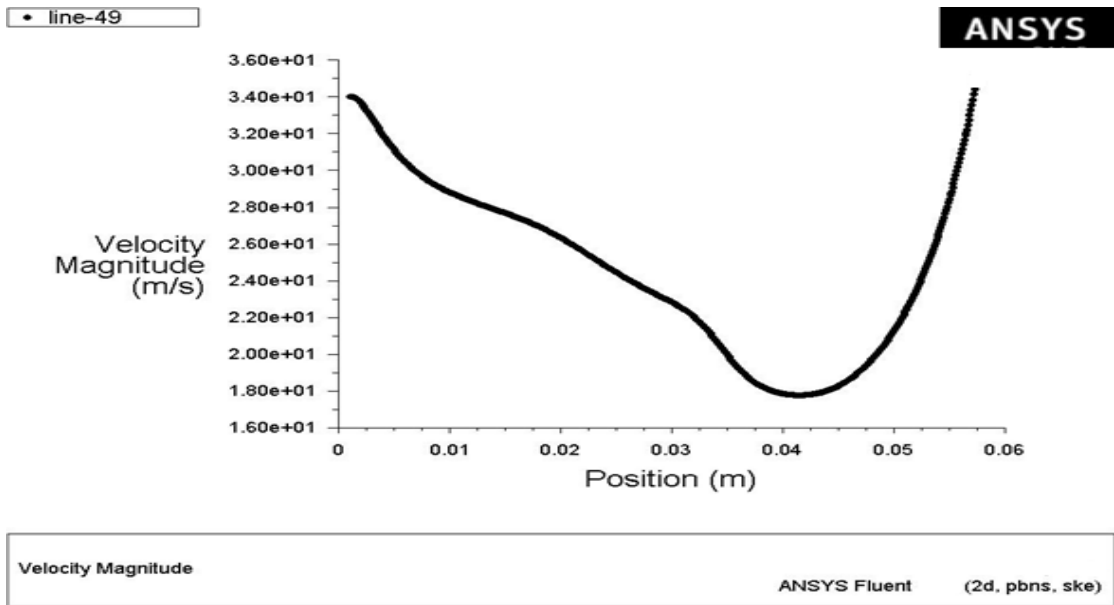


**Şekil 3.42.** Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devirde 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

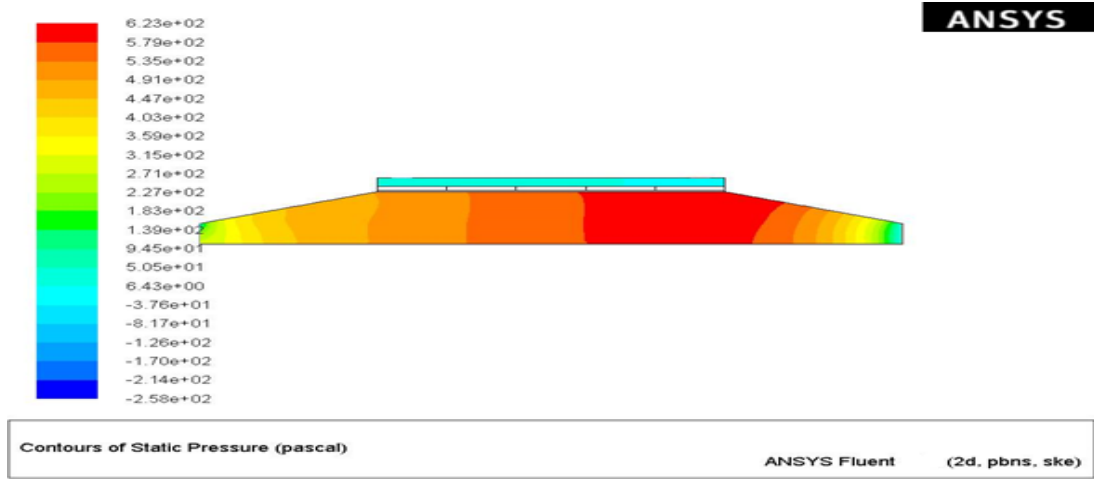
Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devirde çalışması sonucunda TEJ sisteminde oluşan hız, statik basınç ve toplam basınç dağılımları Şekil 3.43, Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'da gösterilmiştir. Hız - basınç şekilleri incelendiğinde maksimum basınç değerinin bu motor devrinde 623 Pascal olduğu söylenebilir. Sistem içerisinde egzoz gaz hızı ile statik basıncın ters orantılı geliştiğini ve toplam basıncın x ekseni boyunca azaldığını görmekteyiz. Sekizgen prizmanın sahip olduğu yüzey alanının büyük seçilmesi kuşkusuz ani genişleme ve ani daralma katsayılarını değiştirecektir. Bu nedenle sistem tasarımında egzoz gazlarının geçtiği alanın büyüklüğü büyük önem arz eder. Çok daha yüksek alan büyüklükleri akış şeklini bozarak sistemde motora geri basınç oluşturabilir. Bu durum motor performansını olumsuz yönde etkiler.



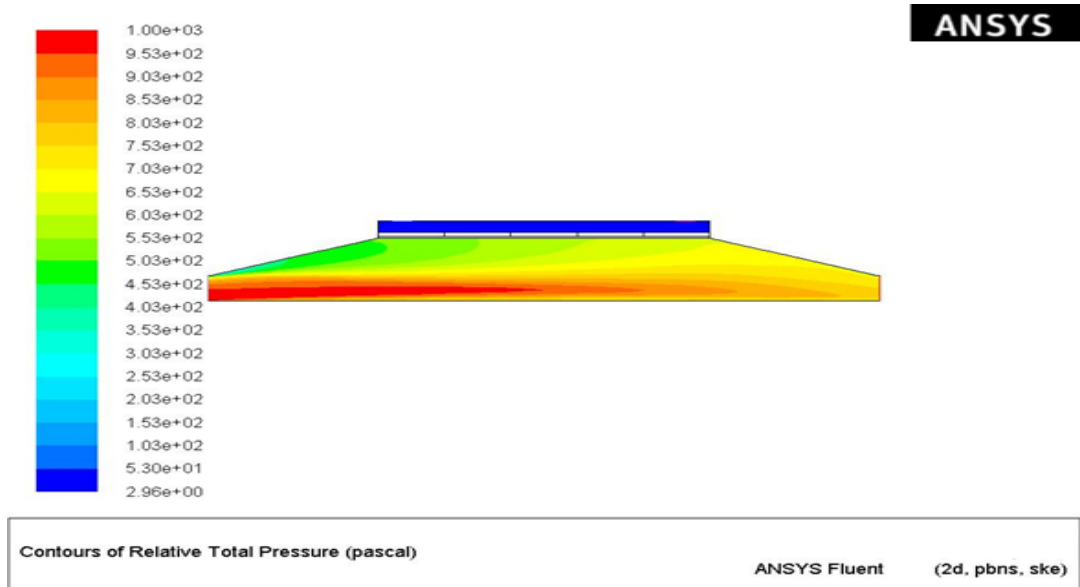
Şekil 3.43. Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı



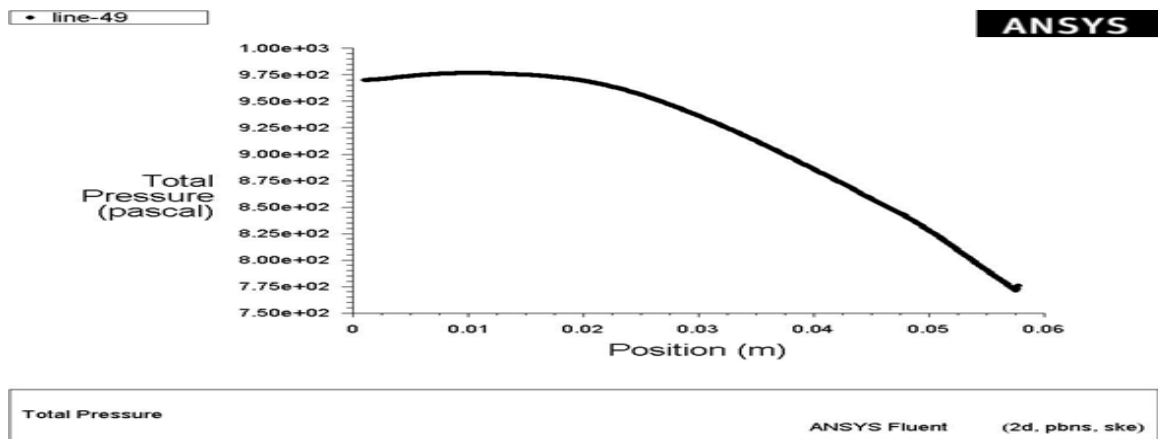
Şekil 3.44. x eksenini boyunca değişen hız değerleri



Şekil 3.45. Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı



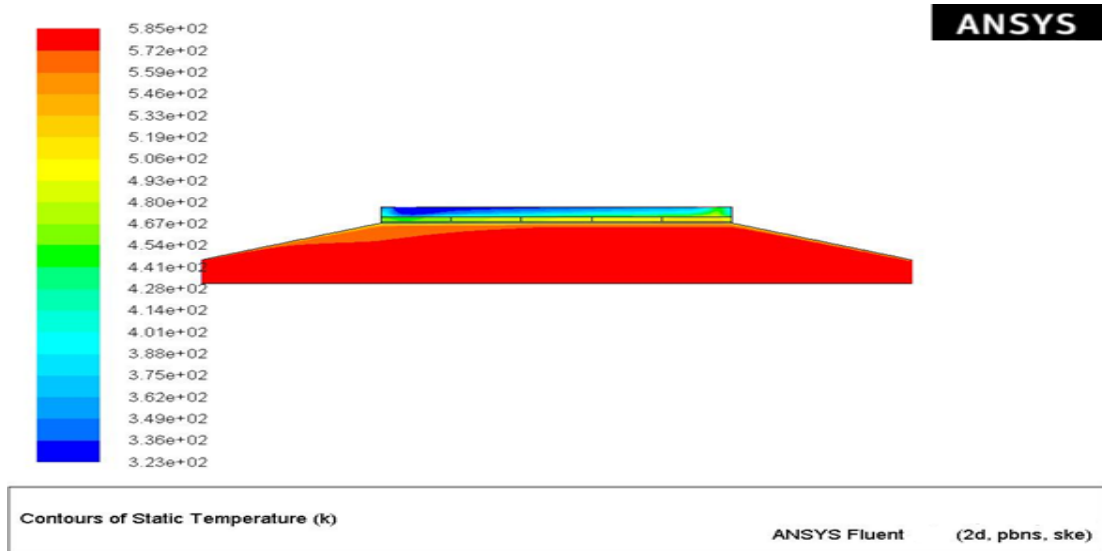
Şekil 3.46. Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı



Şekil 3.47. x eksenı boyunca değışen toplam basınç değeri

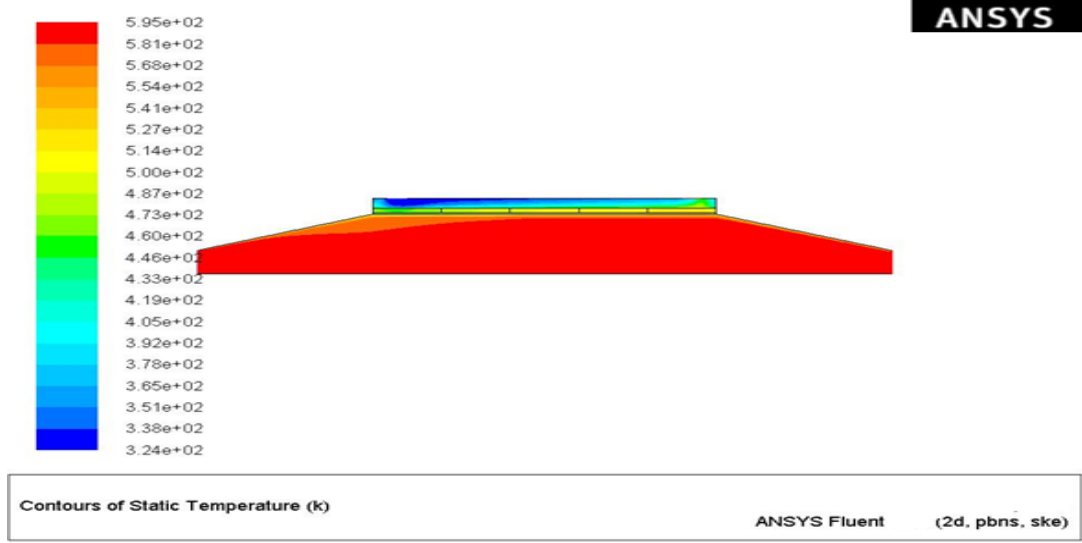
### 3.3.5. Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devir çalışma şartlarında oluşan analiz sonuçları

Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devir ve 50, 75, 100 Nm yükler altında çalışması durumunda TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı sonuçları incelenmiştir. 3500 dak<sup>-1</sup> devirde 50 Nm yükte çalışan motor da ölçülen egzoz gazı giriş sıcaklığı 312 °C, egzoz gaz hızı 48 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 55 °C ve su giriş hızı 2 m/sn olan deneysel çalışma değerleri bu analizin sınır şartlarını oluşturmuştur. Egzoz gazlarının çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 298 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ise 75-80 °C aralığında olduğu görülmektedir. Modüllerde meydana gelen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında soğuk yüzey sıcaklıkları 100 °C ile 105 °C aralığında, sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 210 °C ile 225 °C aralığında değiştiği söylenebilir.



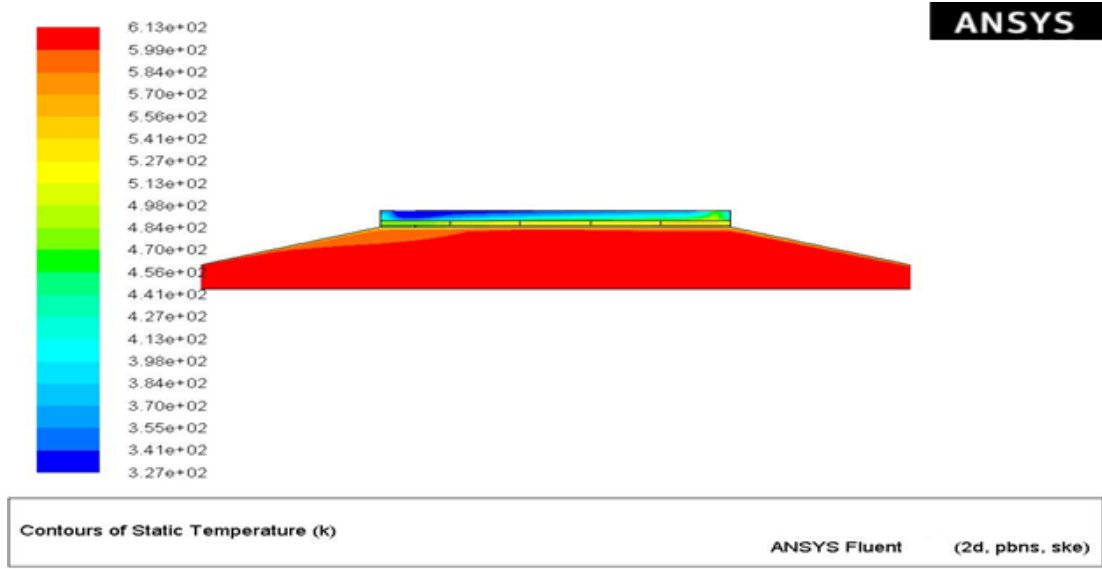
**Şekil 3.48.** Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devirde 50 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

Deneysel ölçümlerde 3500 dak<sup>-1</sup> devir 75 Nm yükte çalışan motor da ölçülen egzoz gazı giriş sıcaklığı 322 °C, egzoz gaz hızı 48 m/sn, soğutma suyu sıcaklığı giriş sıcaklığı 57 °C ve giriş hızı 2 m/sn'dir. Bu değerler analizin giriş sınır şartları olarak sisteme yüklenmiştir. Analiz sonucunda oluşan sıcaklık dağılımları incelendiğinde egzoz gazlarının çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 308 °C, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ise 78–85 °C aralığında olmuştur. TEM'de meydana gelen sıcaklık dağılımlarına bakıldığında soğuk yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak 105 °C ,sıcak yüzey sıcaklıklarının ise 217 °C ile 232 °C aralığında değiştiği söylenebilir.



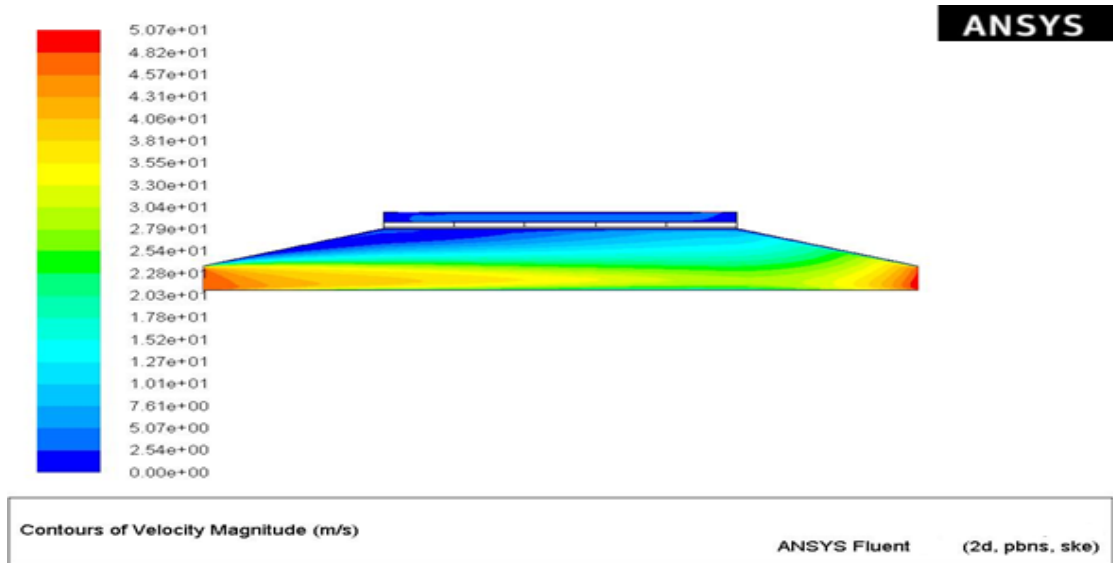
**Şekil 3.49.** Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devirde 75 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devirde ve 100 Nm yükte çalıştırılması sonucunda elde edilen verilerin sınır şartı olarak kullanılması sonucu oluşan analiz sonuçlarında sistemde oluşan sıcaklık dağılımı Şekil 3.50’de gösterilmektedir. Egzoz gaz hızı 48 m/sn, TEJ sisteminde egzoz gazı giriş sıcaklığı 340 °C, soğutma suyu giriş hızı 2 m/sn, sıcaklığı ise 60 °C sınır şartını taşımaktadır. Genel sıcaklık dağılımları incelendiğinde sürekli rejimde soğutma suyunun etkisiyle egzoz gazlarının bir miktar soğuduğu ve bu soğumanın yüzey boyunca devam ettiği görülmüştür. Egzoz gazlarının çıkış sıcaklığının 315-325 °C aralığında, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ise 80-85 °C aralığında olduğu görülmektedir. TEM sıcaklık dağılımları incelendiğinde bütün modüllerde homojen bir sıcaklık dağılımının olmadığı ve dolayısıyla aynı şartlar altında çalışmadığı görülmektedir. Örneğin sistemde yer alan ilk modül için soğuk ve sıcak yüzey sıcaklıkları sırasıyla yaklaşık olarak 110 °C ve 250 °C iken, 5. TEM modülün soğuk ve sıcak yüzey sıcaklıkları sırasıyla yaklaşık 170-180 °C ve 270 °C’dir. Bu çalışma şartları altında TEM’lerde ciddi bir risk faktöründe ortaya çıkmıştır. TEM’lerin sahip oldukları çalışma sıcaklığı aralıkları çalışmada kullanılan modüllerde soğuk yüzey için 180 °C olarak üretici tarafından belirlenmiştir. Sistemde 5. sırada yer alan TEM’in soğuk yüzeyi için bu sıcaklık şartı sınır değerlerde olmuştur.

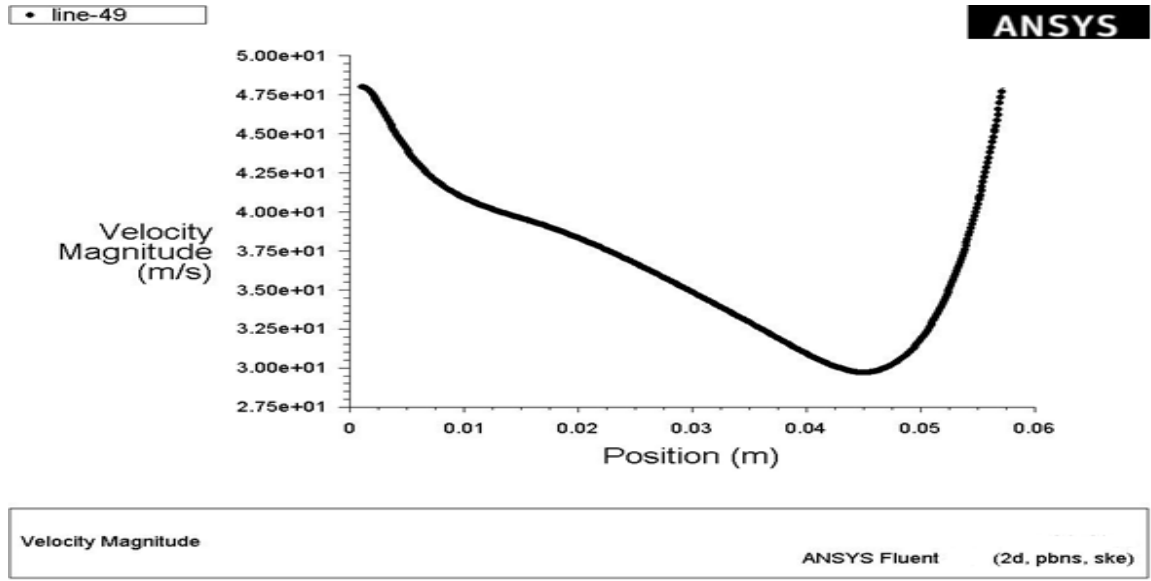


**Şekil 3.50.** Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devirde 100 Nm yükte çalıştırılması sonucu TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımı

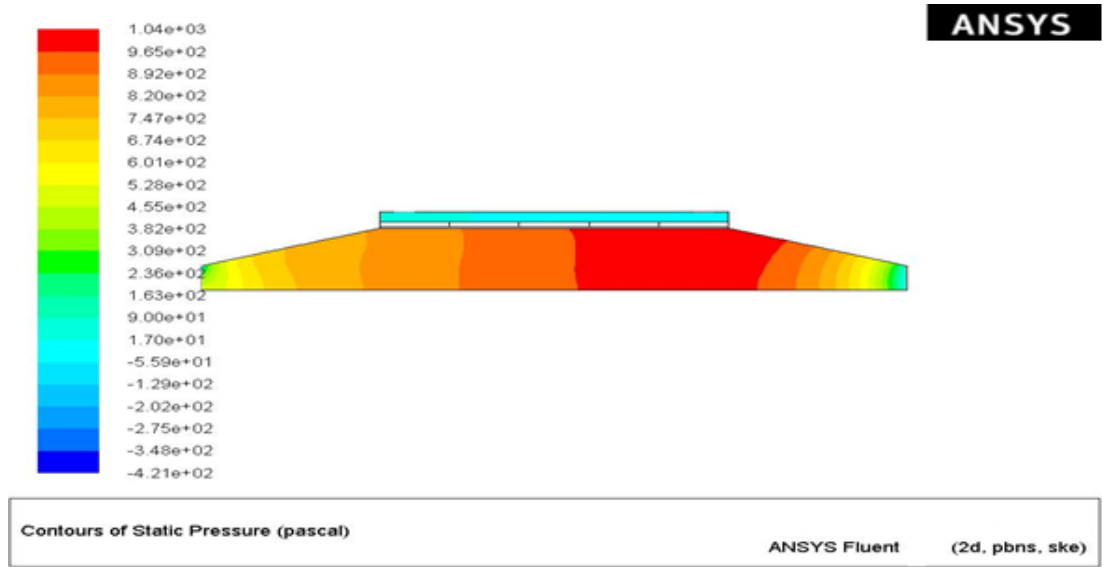
Hız, statik basınç ve toplam basınç dağılımları sırasıyla Şekil 3.51, Şekil 3.53 ve Şekil 54’de görülmektedir. Maksimum statik hız dağılımı beklenildiği gibi modüllerin dar kesitlerinde elde edilmiştir. Daralan modül kesitleri arasındaki hız büyüklükleri arasındaki farklılıklar eşit kütleli debiden dolayı kesit çapı ile orantılı olarak değişmiştir. Benzer şekilde merkezden dış cidara doğru hızın azaldığı görülmektedir. Bu olay Şekil 3.52’de grafik halinde sunulmuştur. Hızın azaldığı bölgelerde statik basınç değeri maksimum 1045 Pascal olmuştur.



**Şekil 3.51.** Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan hız dağılımı



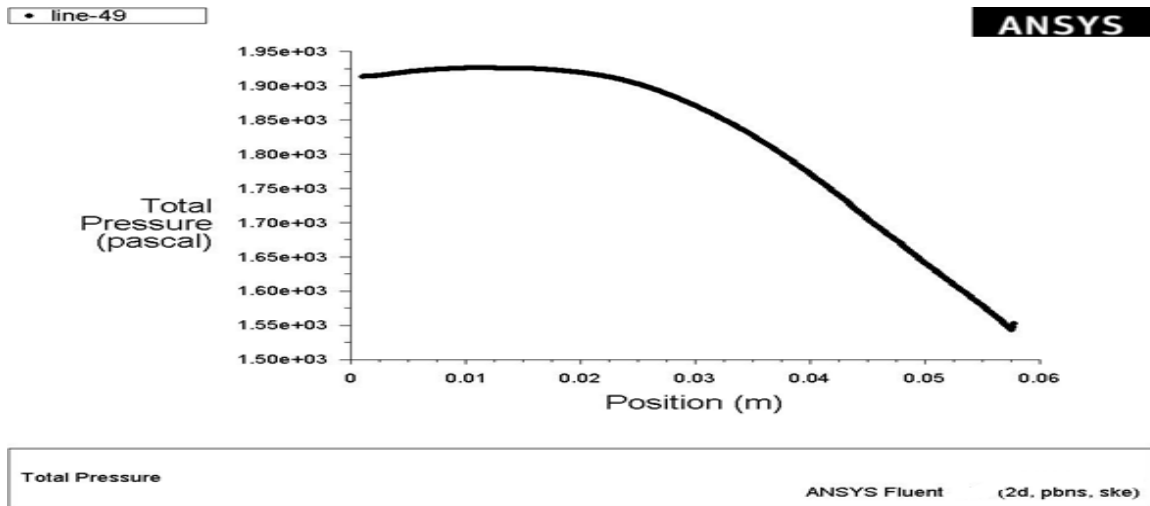
Şekil 3.52. x eksenı boyunca değışen hız değęerlerı



Şekil 3.53. Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan statik basınç dağılımı



Şekil 3.54. Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devrinde TEJ sisteminde oluşan toplam basınç dağılımı



Şekil 3.55. x eksenı boyunca değışen toplam basınç değeri

Hız, statik basınç ve toplam basınç parametreleri incelendiğinde bu değeriğin birbirlerine bağımlı geliştiğini söylemek mümkündür. Bütün hız ve basınç analizleri incelendiğinde TEJ sistem içerisinde oluşan farklı basınç dalgalanmalarının TEJ geometri ve egzoz gazı akış hızının etkin olduğu söylenebilir. Sistem içerisinde oluşan maksimum basınç, hızın değıştiği devir aralıklarında değışkenlik göstermiştir. Aynı devir farklı yük şartlarında girilen egzoz gaz akış hızının sabit kabul edildiğinden bu devirlerde basınç miktarlarında değışme olmamıştır. Akışkan modüllerin daralan kesit bölgelerinde hızlı, orta bölümlere doğru daha yavaş olduğu için yüksek basınç egzoz gaz moleküllerini hızlı bölgedeki düşük basınç bölgesine itmiştir. Hızla daralan bölgeyi geçen egzoz gazları geniş

bir bölüme geldiğinde önünde yer alan yüksek basınç nedeniyle yavaşlamışlardır. Bütün analiz sonuçları için köşe noktalarında şekil faktöründen dolayı egzoz gaz hızının azaldığı yine aynı şekilde yatay eksen boyunca önce azaldığı, daha sonra daralan kesit yapısıyla birlikte kademeli şekilde hızın yeniden arttığını söylemek mümkündür. Hızın yüksek olduğu bölgelerde statik basıncın düştüğü, hızın azaldığı bölgelerde ise statik basıncın arttığı görülmektedir.

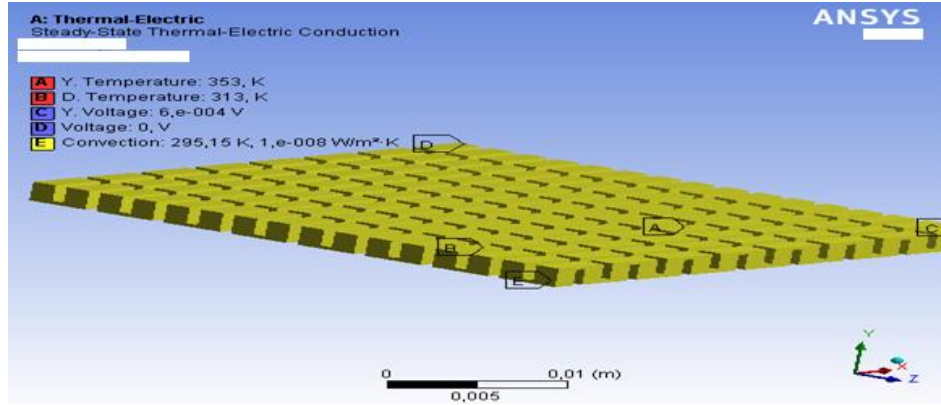
Atık ısı enerjisinin kullanılabilir enerjiye dönüşümünü gerçekleştiren TEM'lerin performansı birçok etkene bağlı olarak değişmektedir. Elektriksel çıkış gücünü doğrudan ilgilendiren en önemli dış etken ise TEM yüzeylerinin sahip oldukları sıcaklık değerleridir. Sistem üzerinde deneysel çalışma sonucunda oluşan sıcaklık dağılımları ile paket programı yardımıyla ısı analizleri gerçekleştirilen sistemin verileri karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca sisteme farklı değerlerde giriş yapan egzoz gaz hızları ve sıcaklık parametrelerinin TEM'ler üzerinde farklı sıcaklıkların oluşmasına neden olduğu görülmektedir. Oluşan bu sıcaklık değerlerinin kaynağı elbette egzoz gazlarının sahip olduğu ısı enerjisidir. Deney sonuçları gösteriyor ki egzoz gazlarının sahip olduğu bu enerji motor devir sayısı ve yükü birlikte artış göstermiştir. Üretilen bu ısı enerjisinin ne kadarının kullanılabilir olduğu gösteren Tablo 3.2'de yer alan değerler Ansys Fluent programı yardımıyla gerçekleştirilen ısı ve akış analizleri sonucunda elde edilmiştir. Egzoz gazlarının sahip olduğu hız, sıcaklık ve buna bağlı olarak değişen termodinamik özellikler bütün motor devir ve yük durumları için ayrı ayrı hesaplanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Egzoz gazlarının sahip olduğu ısı enerjisinin bir kısmı sistemde tutulmuş ancak büyük bir kısmı ise sistemden atık enerji halinde atmosfere atılmıştır. Bütün motor devir ve yük şartlarında TEJ sistem tarafından absorbe edilen ısı enerjisinin yaklaşık %50-%60'ı lüle ve cidarlardan dış ortama ısı transferi edilmiştir. Kalan ısı enerjisinin TEM'ler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştüğü sistemde en yüksek TEM verimi motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devrinde 75 Nm ve 100 Nm yüklerinde elde edilmiştir.

**Tablo 3.2.** Enerji hesaplamaları

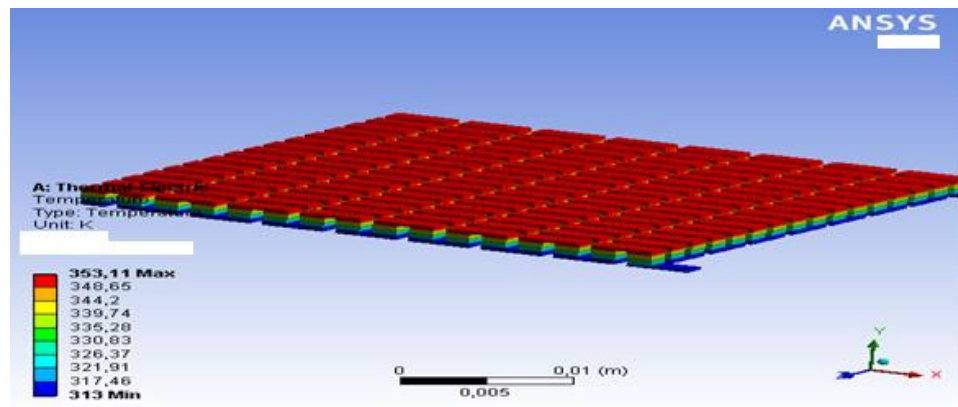
| <b>Devir<br/>(dak<sup>-1</sup>)</b> | <b>Yük<br/>(Nm)</b> | <b>Egzoz<br/>gazı giriş<br/>Isısı<br/>(kW)</b> | <b>Egzoz<br/>gazı çıkış<br/>Isısı<br/>(kW)</b> | <b>Transfer<br/>edilen<br/>Isı<br/>(kW)</b> | <b>Kalan<br/>Net Isı<br/>(kW)</b> | <b>Üretilen<br/>Elektrik<br/>Enerjisi<br/>(W/8)</b> | <b>Enerjinin<br/>Dönüşümü<br/>(%)</b> |
|-------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>1500</b>                         | <b>50</b>           | 5.51                                           | 5.31                                           | 0.203                                       | 0.119                             | 8.5                                                 | 0.89                                  |
|                                     | <b>75</b>           | 7.66                                           | 7.38                                           | 0.28                                        | 0.161                             | 10.6                                                | 0.82                                  |
|                                     | <b>100</b>          | 8.44                                           | 8.13                                           | 0.304                                       | 0.168                             | 11.1                                                | 0.82                                  |
| <b>2000</b>                         | <b>50</b>           | 11.92                                          | 11.56                                          | 0.364                                       | 0.204                             | 16.9                                                | 1.03                                  |
|                                     | <b>75</b>           | 12.7                                           | 12.34                                          | 0.395                                       | 0.218                             | 20.4                                                | 1.16                                  |
|                                     | <b>100</b>          | 15.06                                          | 14.59                                          | 0.466                                       | 0.257                             | 30.9                                                | 1.50                                  |
| <b>2500</b>                         | <b>50</b>           | 19.43                                          | 18.93                                          | 0.495                                       | 0.268                             | 35.7                                                | 1.66                                  |
|                                     | <b>75</b>           | 20.85                                          | 20.29                                          | 0.558                                       | 0.287                             | 40.2                                                | 1.75                                  |
|                                     | <b>100</b>          | 23                                             | 22.46                                          | 0.561                                       | 0.305                             | 48.8                                                | 2                                     |
| <b>3000</b>                         | <b>50</b>           | 29.25                                          | 28.64                                          | 0.607                                       | 0.334                             | 79.3                                                | 2.9                                   |
|                                     | <b>75</b>           | 30.68                                          | 30.04                                          | 0.636                                       | 0.350                             | 95.3                                                | 3.4                                   |
|                                     | <b>100</b>          | 32.83                                          | 32.15                                          | 0.682                                       | 0.377                             | 120.5                                               | 4.2                                   |
| <b>3500</b>                         | <b>50</b>           | 48.3                                           | 47.6                                           | 0.731                                       | 0.418                             | 140.6                                               | 4.1                                   |
|                                     | <b>75</b>           | 50                                             | 49.3                                           | 0.755                                       | 0.431                             | 150.3                                               | 4.3                                   |
|                                     | <b>100</b>          | 53,1                                           | 52.3                                           | 0.8                                         | 0.455                             | 156.7                                               | 4.3                                   |

### Termal-Elektrik Analizler

Çalışmanın bu bölümünde Ansys Workbench 12.0 Thermal-Electric programı yardımıyla, TEM'lerin ısı-elektriksel simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Termal- elektrik ve çoklu fizik yasalarına dayanan sonlu elemanlar temelli bu programda elektriksel çıkış akımı, çıkış gücü ve ısı transfer hesaplamaları yapılmıştır. Sıcaklığın modül yüzeyleri boyunca homojen dağılım yaptığı kabul edilmiştir. Bu şekilde deneysel çalışma sonuçları baz alınarak motor yükü ve devri ile birlikte değişen TEM'in verileri, sınır şartı olarak girilmiştir. İlk olarak motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devir ve 50 Nm yük şartlarında çalışmasıyla TEM yüzeylerinde oluşan fark sıcaklıkları model üzerine uygulanmıştır.



Şekil.3.56. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.57. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
| Scope                  |                    |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 313, K             | -0,23151 V       |
| Maximum                | 353, K             | 3,5223e-002 V    |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

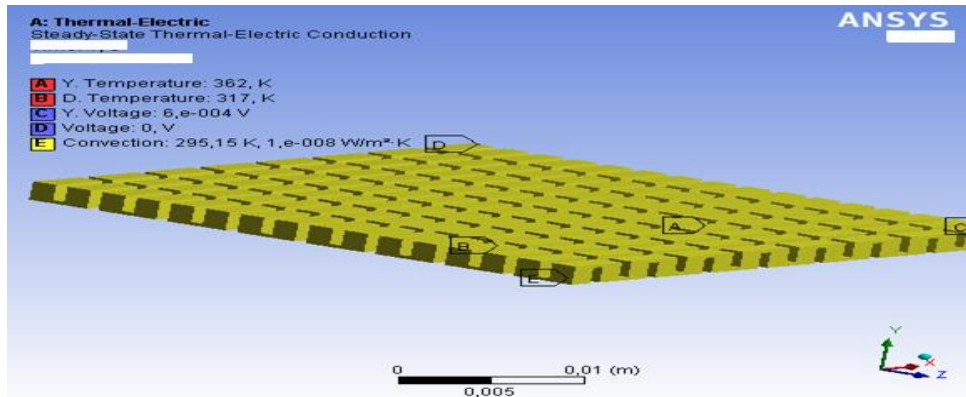
Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes

|             |                |                  |
|-------------|----------------|------------------|
| Object Name | Reaction Probe | Reaction Probe 2 |
|-------------|----------------|------------------|

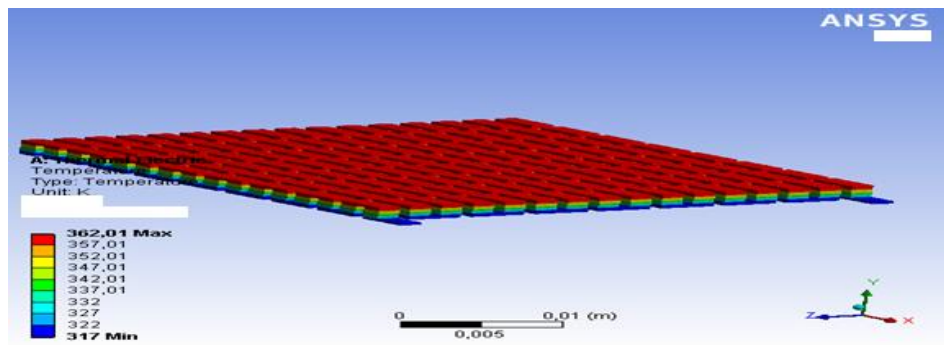
|                    |                    |                |
|--------------------|--------------------|----------------|
| State              | Solved             |                |
| Definition         |                    |                |
| Type               | Reaction           |                |
| Location Method    | Boundary Condition |                |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |
| Suppressed         | No                 |                |
| Options            |                    |                |
| Display Time       | End Time           |                |
| Results            |                    |                |
| Current            | 1,4485 A           |                |

Şekil 3.58. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Şekil 3.56 fark sıcaklığına maruz kalan TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.57 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.58 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. TEM yüzeylerine uygulanan sıcaklık sonucunda TEM uçları arasında 0.23 V açık devre gerilimi oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim sonucunda iç yüke eşit bir alıcı bağlanması durumunda üretebileceği maksimum akım değeri 1.44 A'dır. Bu fark sıcaklıklarında bir tek TEM'in üretebileceği maksimum elektrik gücü 0.33 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil.3.59. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.60. TEM'de meydana gelen sıcaklık dağılımı

**Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results**

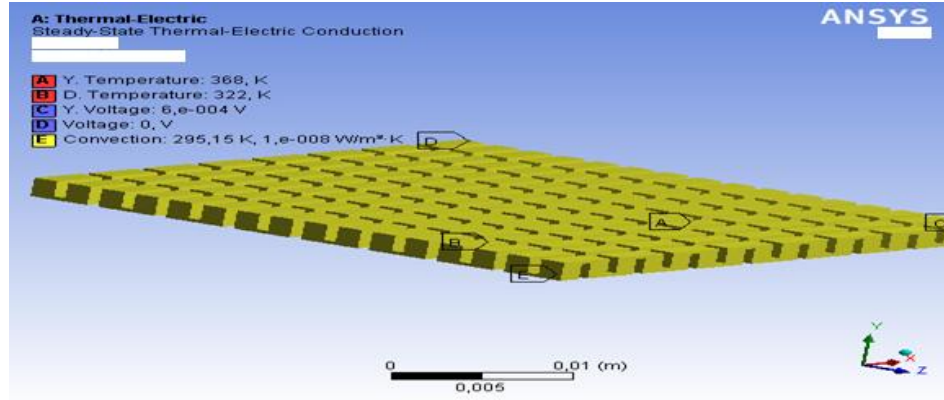
|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
|                        | Scope              |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 317, K             | -0,26149 V       |
| Maximum                | 362,01 K           | 3,9704e-002 V    |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

**Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes**

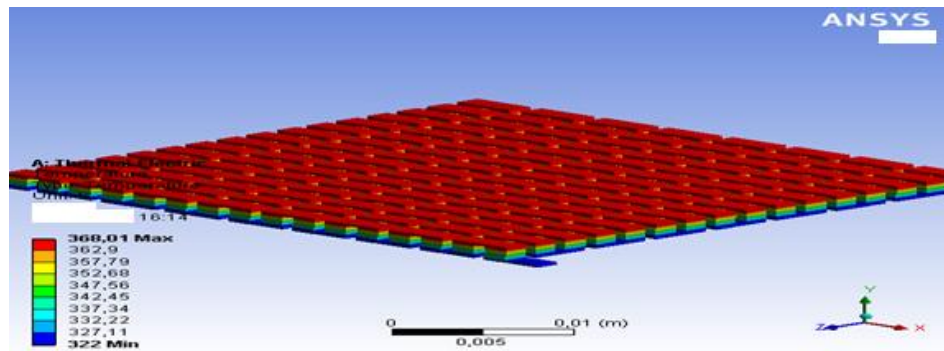
|                    |                    |                  |
|--------------------|--------------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                  |
| Definition         |                    |                  |
| Type               | Reaction           |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature   |
| Suppressed         | No                 |                  |
| Options            |                    |                  |
| Display Time       | End Time           |                  |
| Results            |                    |                  |
| Current            | 1,6349 A           |                  |

**Şekil 3.61.** Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorda  $1500\text{dak}^{-1}$  devirde yükün 50 Nm'den 75Nm'ye artmasıyla beraber TEJ sisteminde oluşan sıcaklık dağılımları da değişiklik göstermiştir. Şekil 3.59 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.60 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.61 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. TEM yüzeylerine uygulanan fark sıcaklığı sonucunda TEM uçları arasında 0.26 V açık devre gerilimi oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim sonucunda bir alıcı bağlanması durumunda üretebileceği maksimum akım değeri 1.63 A olmaktadır. Bu fark sıcaklıklarında TEM'in maksimum elektrik gücü 0.42 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil.3.62. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.63. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
| Scope                  |                    |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 322, K             | -0,26776 V       |
| Maximum                | 368,01 K           | 4,0641e-002 V    |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

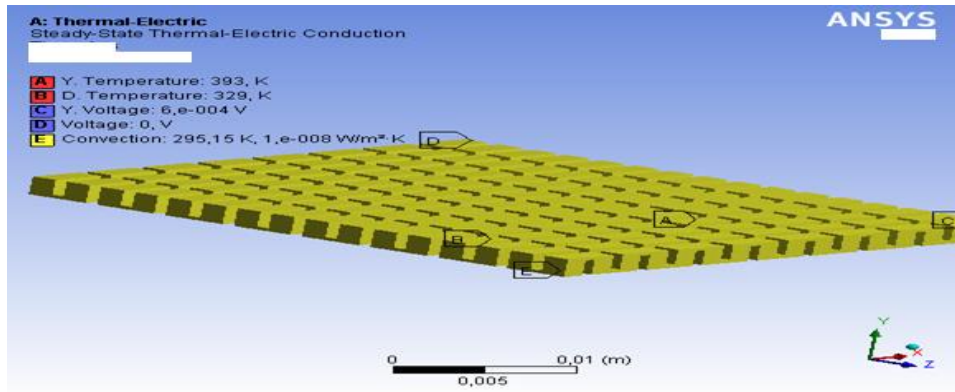
Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes

| Object Name | Reaction Probe | Reaction Probe 2 |
|-------------|----------------|------------------|
| State       | Solved         |                  |

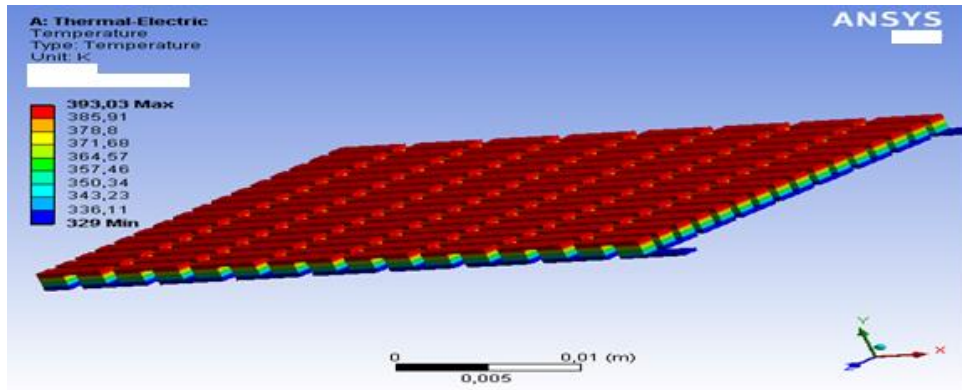
| Definition         |                    |                |
|--------------------|--------------------|----------------|
| Type               | Reaction           |                |
| Location Method    | Boundary Condition |                |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |
| Suppressed         | No                 |                |
| Options            |                    |                |
| Display Time       | End Time           |                |
| Results            |                    |                |
| Current            | 1,6736 A           |                |

Şekil 3.64. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun 1500 dak<sup>-1</sup> devir 100 Nm yükte çalışması sonucunda TEM'in performansı incelenmiştir. Şekil 3.62 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.63 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.64 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. Bu çalışma şartlarında TEM yüzeylerine uygulanan sıcaklık sonucunda TEM uçları arasında 0.267 V açık devre gerilimi oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim sonucunda alıcı bağlanması durumunda maksimum akım değeri 1.67 A olur. Bu çalışma sıcaklıklarında bir tek TEM'in ürettiği maksimum elektrik gücü 0.44 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.65. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.66. TEM'de meydana gelen sıcaklık dağılımı

**Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results**

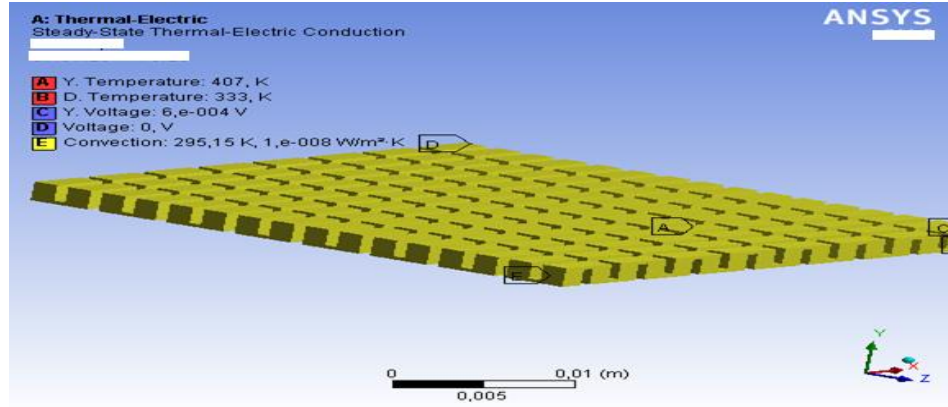
|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
|                        | Scope              |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 329, K             | -0,37416 V       |
| Maximum                | 393,02 K           | 5,6552e-002 V    |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

**Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes**

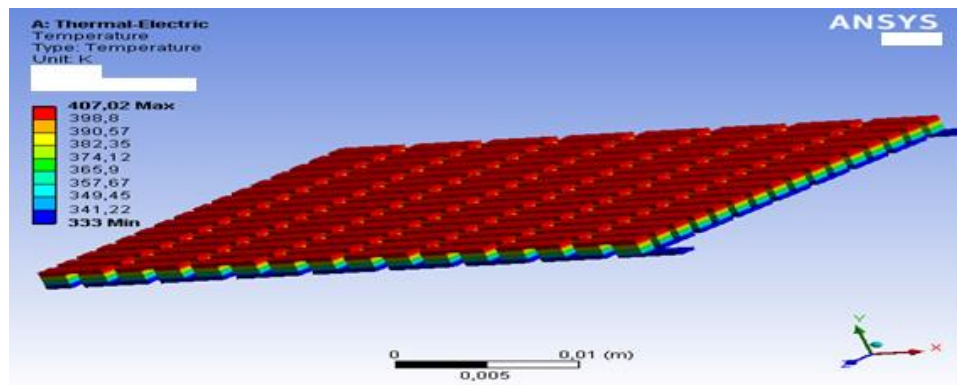
|                    |                    |                  |
|--------------------|--------------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                  |
| Definition         |                    |                  |
| Type               | Reaction           |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature   |
| Suppressed         | No                 |                  |
| Options            |                    |                  |
| Display Time       | End Time           |                  |
| Results            |                    |                  |
| Current            | 2,3363 A           |                  |

**Şekil 3.67.** Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devirde değişen üç farklı motor yükü için TEM'in performansı incelenmiştir. Şekil 3.65 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.66 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.67 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devirde 50 Nm yükte çalışması durumunda TEM yüzeylerinde oluşan fark sıcaklığı, analizlerde TEM uçları arasında 0.37 V açık devre gerilimi oluşturmuştur. Oluşan bu gerilim sonucunda üretebileceği maksimum akım değeri 2.33 A olmuştur. Bu fark sıcaklıklarında TEM'in oluşturduğu maksimum elektrik gücü 0.86 Watt olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.68. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.69. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
| Scope                  |                    |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 333, K             | -0,43327 V       |
| Maximum                | 407,02 K           | 6,5392e-002 V    |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

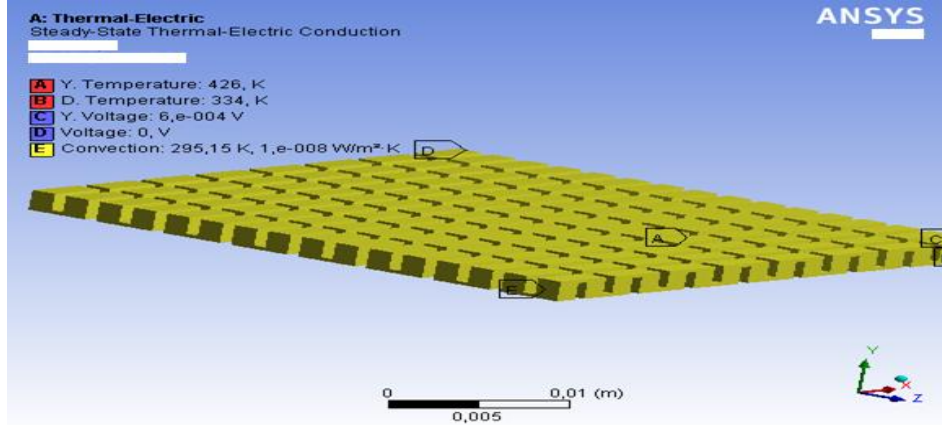
Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes

|             |                |                  |
|-------------|----------------|------------------|
| Object Name | Reaction Probe | Reaction Probe 2 |
|-------------|----------------|------------------|

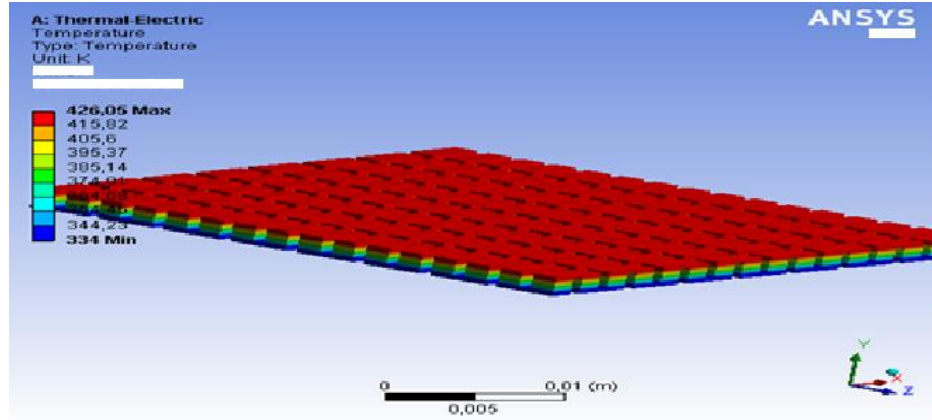
|                    |                    |                |
|--------------------|--------------------|----------------|
| State              | Solved             |                |
| Definition         |                    |                |
| Type               | Reaction           |                |
| Location Method    | Boundary Condition |                |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |
| Suppressed         | No                 |                |
| Options            |                    |                |
| Display Time       | End Time           |                |
| Results            |                    |                |
| Current            | 2,7042 A           |                |

Şekil 3.70. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devirde 75 Nm motor yükte çalışması durumunda TEM'in performansı incelenmiştir. Şekil 3.68 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.69 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.70 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. Bu çalışma şartlarında TEM yüzeylerine uygulanan fark sıcaklığı sonucunda TEM uçları arasında 0.43 V açık devre gerilimi oluşmaktadır. Alıcı bağlanılması durumunda üretebileceği maksimum akım değeri 2.7 A olmaktadır. Bu fark sıcaklıklarında TEM'in maksimum elektrik gücü 1.16 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil.3.71. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.72. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

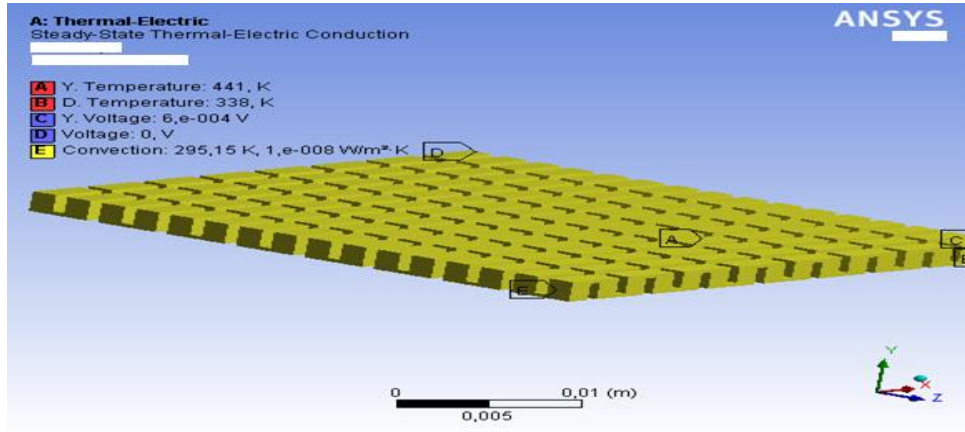
|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
|                        | Scope              |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 334, K             | -0,53877 V       |
| Maximum                | 426,03 K           | 8,1171e-002 V    |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes

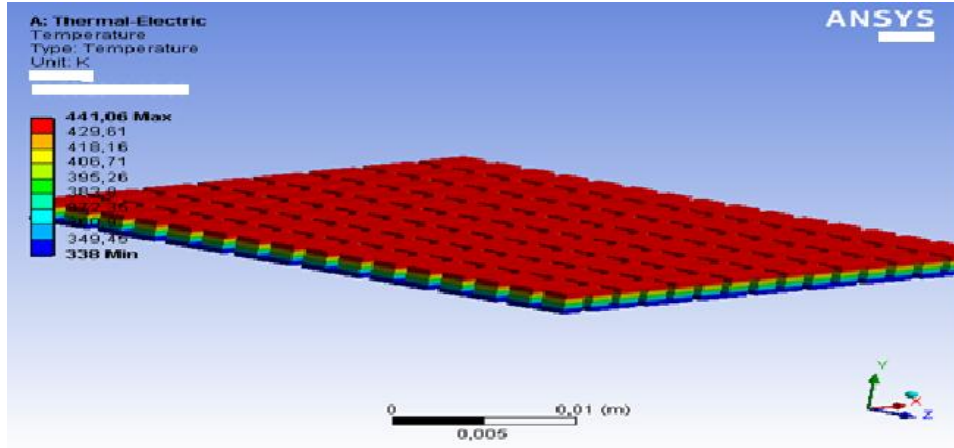
|                    |                    |                |                  |
|--------------------|--------------------|----------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     |                | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                |                  |
| Definition         |                    |                |                  |
| Type               | Reaction           |                |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |                  |
| Suppressed         | No                 |                |                  |
| Options            |                    |                |                  |
| Display Time       | End Time           |                |                  |
| Results            |                    |                |                  |
| Current            | 3,3616 A           |                |                  |

Şekil 3.73. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun 2000 dak<sup>-1</sup> devirde 100 Nm yükte çalışması durumunda TEM'in performansı incelenmiştir. Şekil 3.71 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.72 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.73 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. TEM yüzeylerine uygulanan sıcaklık sonucunda TEM uçları arasında 0.53 V açık devre gerilimi oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim sonucunda üretebileceği maksimum akım değeri 3.36 A olmuştur. Bu fark sıcaklıklarında bir tek TEM'in ürettiği maksimum elektrik gücü 1.78 W olarak hesaplanır.



Şekil.3.74. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.75. TEM'de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

|                |                    |                  |
|----------------|--------------------|------------------|
| Object Name    | Temperature        | Electric Voltage |
| State          | Solved             |                  |
| Scope          |                    |                  |
| Scoping Method | Geometry Selection |                  |
| Geometry       | All Bodies         |                  |
| Definition     |                    |                  |
| Type           | Temperature        | Electric Voltage |

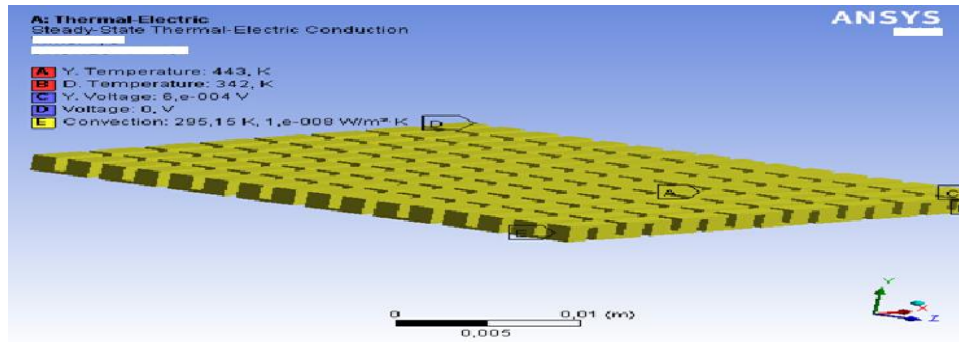
|                        |          |               |
|------------------------|----------|---------------|
| By                     | Time     |               |
| Display Time           | Last     |               |
| Calculate Time History | Yes      |               |
| Identifier             |          |               |
| Suppressed             | No       |               |
| Results                |          |               |
| Minimum                | 338, K   | -0,58325 V    |
| Maximum                | 441,04 K | 9,0815e-002 V |
| Minimum Occurs On      | Solid16  | Solid6        |
| Maximum Occurs On      | Solid7   | Solid6        |
| Information            |          |               |

**Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes**

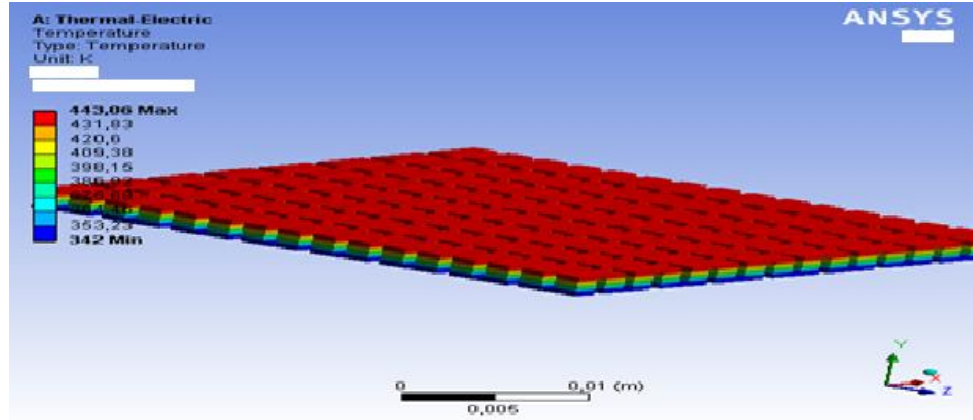
|                    |                    |                |                  |
|--------------------|--------------------|----------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     |                | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                |                  |
| Definition         |                    |                |                  |
| Type               | Reaction           |                |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |                  |
| Suppressed         | No                 |                |                  |
| Options            |                    |                |                  |
| Display Time       | End Time           |                |                  |
| Results            |                    |                |                  |
| Current            | 3,6629 A           |                |                  |

**Şekil 3.76.** Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devirde üç farklı motor yükü için TEM'in performansı incelenmiştir. İlk olarak bu devirde motorun 50 Nm yükü için Şekil 3.74 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.75 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.76 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. TEM yüzeylerine uygulanan sıcaklık sonucunda TEM uçları arasında 0.58 V açık devre gerilimi oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim sonucunda bir alıcı bağlanması durumunda üretebileceği maksimum akım değeri 3.66 A olmuştur. Bu fark sıcaklıklarında TEM'in maksimum elektrik gücü 2.12 W olarak hesaplanmıştır



**Şekil 3.77.** TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.78. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

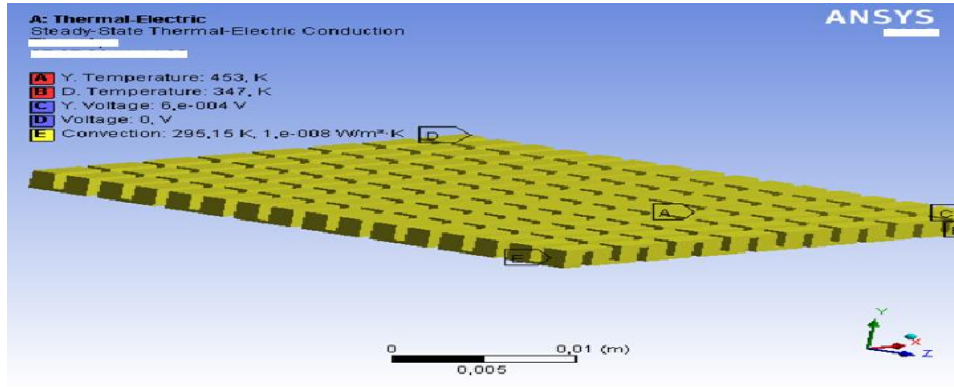
|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
| Scope                  |                    |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 342, K             | -0,59153 V       |
| Maximum                | 443,04 K           | 8,9065e-002 V    |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes

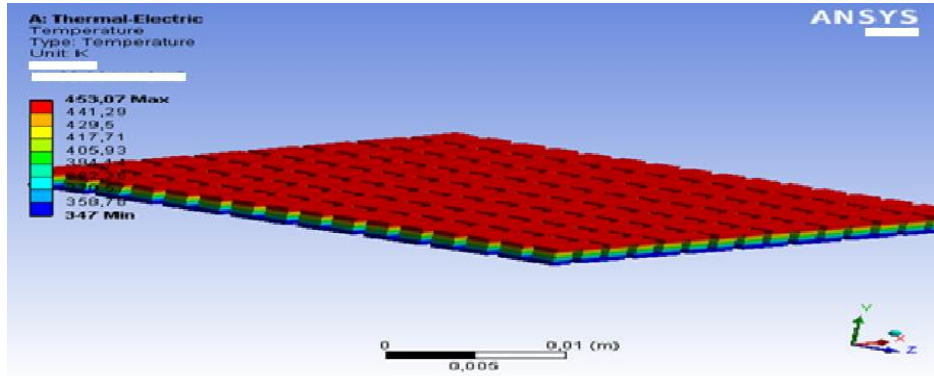
|                    |                    |                  |
|--------------------|--------------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                  |
| Definition         |                    |                  |
| Type               | Reaction           |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature   |
| Suppressed         | No                 |                  |
| Options            |                    |                  |
| Display Time       | End Time           |                  |
| Results            |                    |                  |
| Current            | 3,6894 A           |                  |

Şekil 3.79. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun 2500 dak<sup>-1</sup> devirde 75 Nm yükte çalışması durumunda TEM'in performansı incelenmiştir. Şekil 3.77 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.78 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.79 ise bu çalışma şartlarına göre Thermal-Electric programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. Motorun bu çalışma koşulları için, TEM yüzeylerine uygulanan fark sıcaklığı sonucunda TEM uçları arasında 0.59 V açık devre gerilimi üretebileceği maksimum akım değeri 3.68 A olmuştur. Bu fark sıcaklıklarında TEM'in maksimum elektrik gücü 2.17 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.80. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.81. TEM'de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
| Scope                  |                    |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |

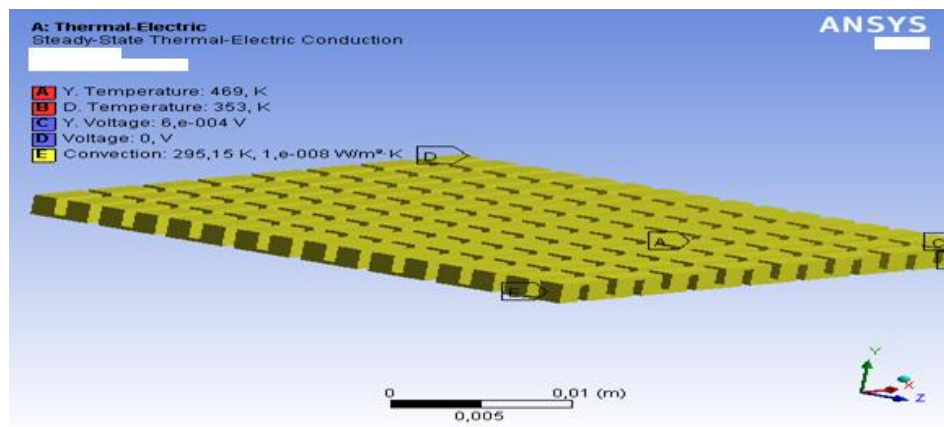
|                   |          |               |
|-------------------|----------|---------------|
| Identifier        |          |               |
| Suppressed        | No       |               |
| Results           |          |               |
| Minimum           | 347, K   | -0,62084 V    |
| Maximum           | 453,05 K | 9,3451e-002 V |
| Minimum Occurs On | Solid16  | Solid6        |
| Maximum Occurs On | Solid7   | Solid6        |
| Information       |          |               |

**Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes**

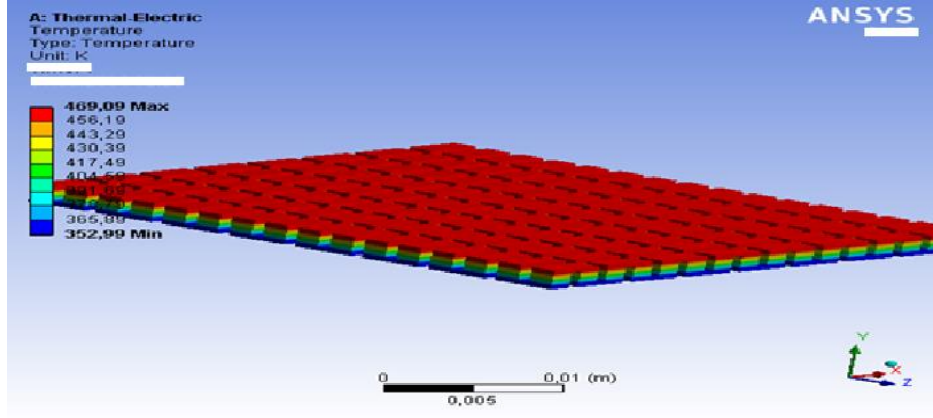
|                    |                    |                |                  |
|--------------------|--------------------|----------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     |                | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                |                  |
| Definition         |                    |                |                  |
| Type               | Reaction           |                |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |                  |
| Suppressed         | No                 |                |                  |
| Options            |                    |                |                  |
| Display Time       | End Time           |                |                  |
| Results            |                    |                |                  |
| Current            | 3,8714 A           |                |                  |

Şekil 3.82. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun  $2500 \text{ dak}^{-1}$  devirde  $100 \text{ Nm}$  yükte çalışması durumunda TEM'in performansı incelenmiştir. Şekil 3.80 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.81 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.82 ise bu çalışma şartlarına göre Thermal-Electric programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. TEM yüzeylerine uygulanan sıcaklık sonucunda TEM uçları arasında  $0.62 \text{ V}$  açık devre gerilimi oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim sonucunda üretebileceği maksimum akım değeri  $3.87 \text{ A}$  ve maksimum elektrik gücü  $2.35 \text{ W}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.83. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.84. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

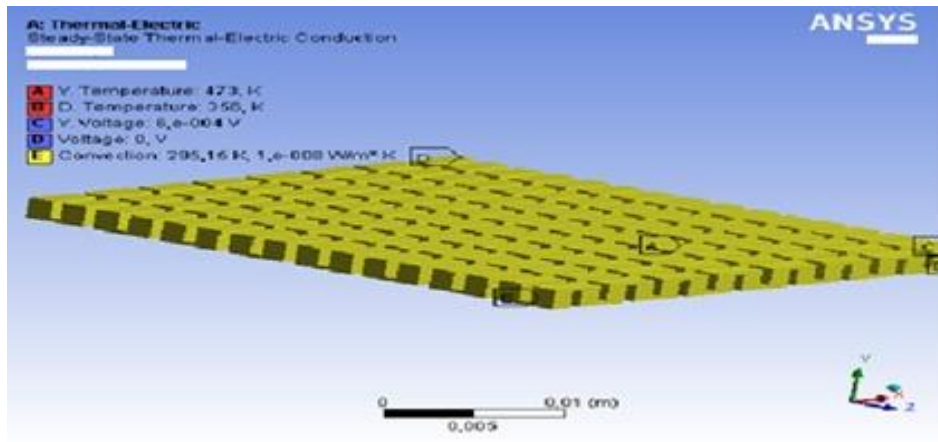
|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
| Scope                  |                    |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 353, K             | -0,67946 V       |
| Maximum                | 469,06 K           | 0,10222 V        |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |
|                        |                    |                  |

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes

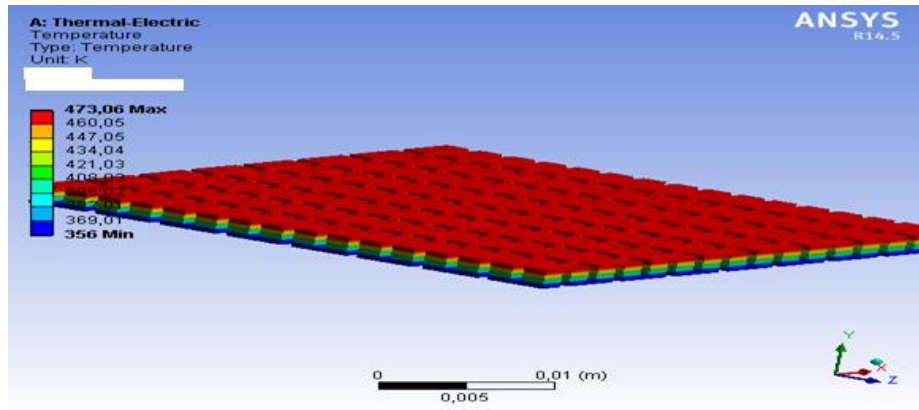
|                    |                    |                  |
|--------------------|--------------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                  |
| Definition         |                    |                  |
| Type               | Reaction           |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature   |
| Suppressed         | No                 |                  |
| Options            |                    |                  |
| Display Time       | End Time           |                  |
| Results            |                    |                  |
| Current            | 4,2356 A           |                  |

Şekil 3.85. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devirde üç farklı motor yükü için TEM performansı incelenmiştir. İlk olarak motorun 50 Nm yükte çalışması durumunda Şekil 3.83 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.84 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.85 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. Artan motor devri ile beraber egzoz gaz sıcaklıkları da artışlar gözlemlenmişti. Motor 3000 dak<sup>-1</sup> devirde ve 50 Nm motor yükte çalışma şartlarında TEM yüzeylerinde oluşan sıcaklık sonucunda uçları arasında 0.67 V açık devre gerilimi elde edilmiştir. Oluşan bu gerilim sonucunda üretebileceği maksimum akım değeri 4.23 A ve maksimum elektrik gücü 2.83 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.86. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.87. TEM'de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

| Object Name    | Temperature        | Electric Voltage |
|----------------|--------------------|------------------|
| State          | Solved             |                  |
| Scope          |                    |                  |
| Scoping Method | Geometry Selection |                  |
| Geometry       | All Bodies         |                  |

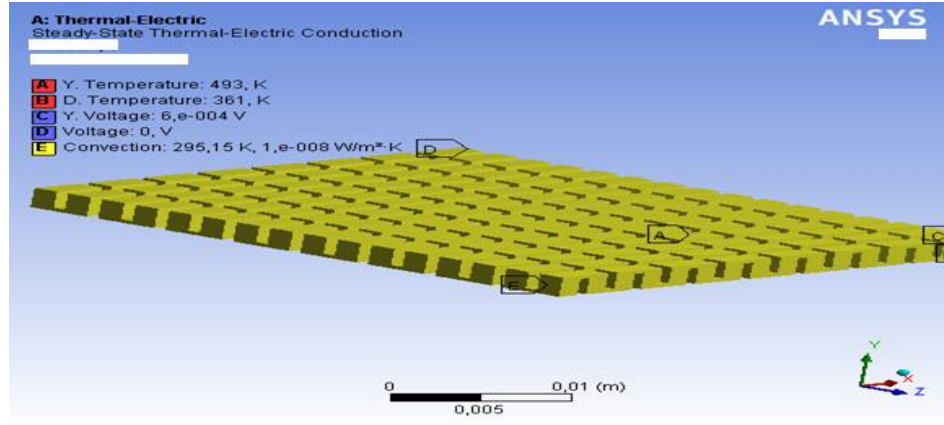
| Definition             |             |                  |
|------------------------|-------------|------------------|
| Type                   | Temperature | Electric Voltage |
| By                     | Time        |                  |
| Display Time           | Last        |                  |
| Calculate Time History | Yes         |                  |
| Identifier             |             |                  |
| Suppressed             | No          |                  |
| Results                |             |                  |
| Minimum                | 356, K      | -0,68533 V       |
| Maximum                | 473,06 K    | 0,1031 V         |
| Minimum Occurs On      | Solid16     | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7      | Solid6           |
| Information            |             |                  |

**Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes**

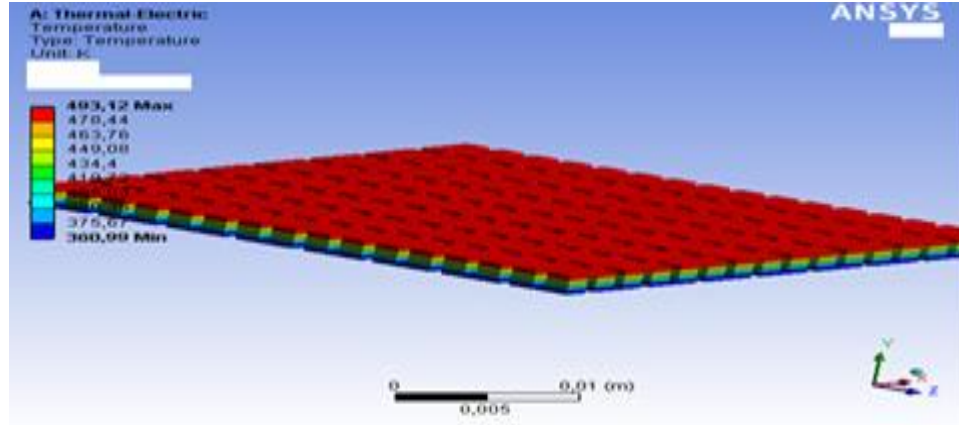
|                    |                    |                |                  |
|--------------------|--------------------|----------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     |                | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                |                  |
| Definition         |                    |                |                  |
| Type               | Reaction           |                |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |                  |
| Suppressed         | No                 |                |                  |
| Options            |                    |                |                  |
| Display Time       | End Time           |                |                  |
| Results            |                    |                |                  |
| Current            | 4,2717 A           |                |                  |

**Şekil 3.88.** Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun 3000 dak<sup>-1</sup> devirde 75 Nm yükte çalışması sonucunda TEM performansı incelenmiştir. Şekil 3.86 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.87 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.88 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. TEM yüzeylerine uygulanan sıcaklık sonucunda TEM uçları arasında 0.68 V açık devre gerilimi oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim sonucunda üretebileceği maksimum akım değeri 4.27 A, maksimum elektriksel çıkış gücü 2.9 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.89. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.90. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

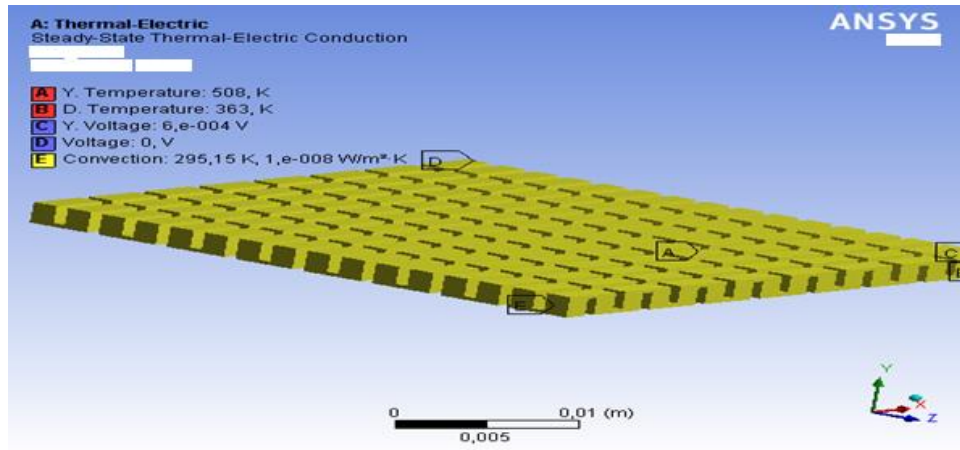
|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
| Scope                  |                    |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 361, K             | -0,77326 V       |
| Maximum                | 493,08 K           | 0,11626 V        |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes

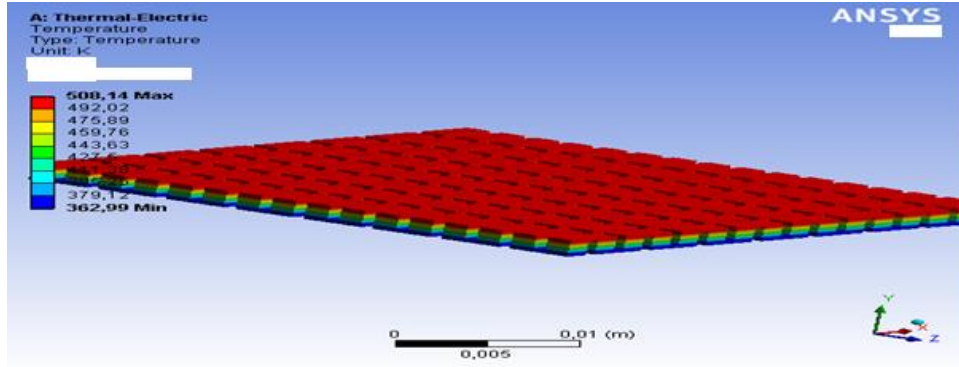
|                    |                    |                |                  |
|--------------------|--------------------|----------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     |                | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                |                  |
| Definition         |                    |                |                  |
| Type               | Reaction           |                |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |                  |
| Suppressed         | No                 |                |                  |
| Options            |                    |                |                  |
| Display Time       | End Time           |                |                  |
| Results            |                    |                |                  |
| Current            | 4,8184 A           |                |                  |

Şekil 3.91. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun  $3000 \text{ dak}^{-1}$  devirde 100 Nm motor yükü çalışma şartlarında TEM performansı incelenmiştir. Şekil 3.89 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.90 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.91 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. TEM yüzeylerine uygulanan fark sıcaklığı sonucunda TEM uçları arasında 0.77 V açık devre gerilimi oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim sonucunda üretebileceği maksimum akım değeri 4.81 A, maksimum elektrik gücü 3.7 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.92. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.93. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
| Scope                  |                    |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 363, K             | -0,84946 V       |
| Maximum                | 508,09 K           | 0,12766 V        |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

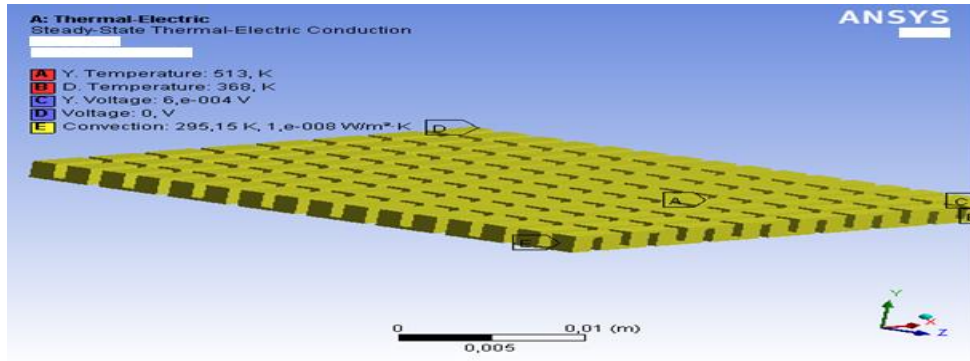
Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes

|                    |                    |                  |
|--------------------|--------------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                  |
| Definition         |                    |                  |
| Type               | Reaction           |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature   |
| Suppressed         | No                 |                  |
| Options            |                    |                  |
| Display Time       | End Time           |                  |
| Results            |                    |                  |
| Current            | 5,2910 A           |                  |

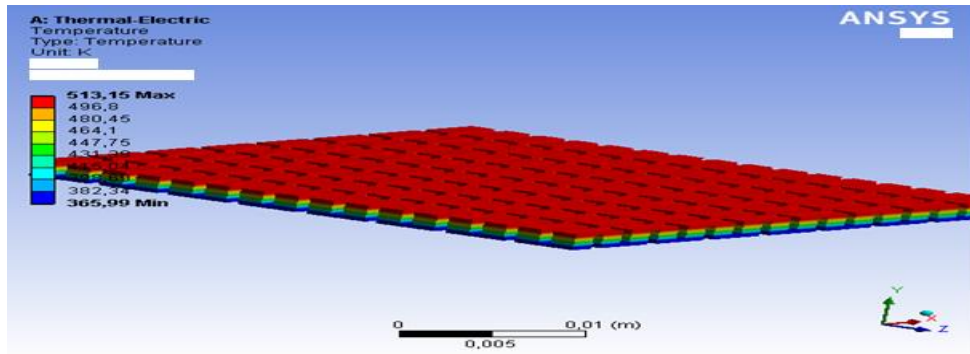
Şekil 3.94. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Son olarak motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devirde üç farklı motor yükü altında çalışması sonucu oluşan TEM performansı incelenmiştir. İlk olarak 50 Nm motor yükü altında çalışan motorun TEM üzerinde oluşturduğu çalışma sınır şartları Şekil 3.92, Şekil 3.93 bu şartlar altında TEM’de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.94 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devrinde sistem ve modüllerde maksimum çalışma sıcaklıklarına ulaşılmıştır.

Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devirde ve 50 Nm motor yükü çalışma şartlarında TEM yüzeylerinde oluşan sıcaklık dağılımı sonucunda uçlar arasında 0.84 V açık devre gerilimi elde edilmiştir. Oluşan bu gerilim sonucunda TEM’in üretebileceği maksimum akım değeri 5.29 A, maksimum elektriksel çıkış gücü 4.44 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.95. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.96. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

|                |                    |                  |
|----------------|--------------------|------------------|
| Object Name    | Temperature        | Electric Voltage |
| State          | Solved             |                  |
| Scope          |                    |                  |
| Scoping Method | Geometry Selection |                  |
| Geometry       | All Bodies         |                  |
| Definition     |                    |                  |
| Type           | Temperature        | Electric Voltage |

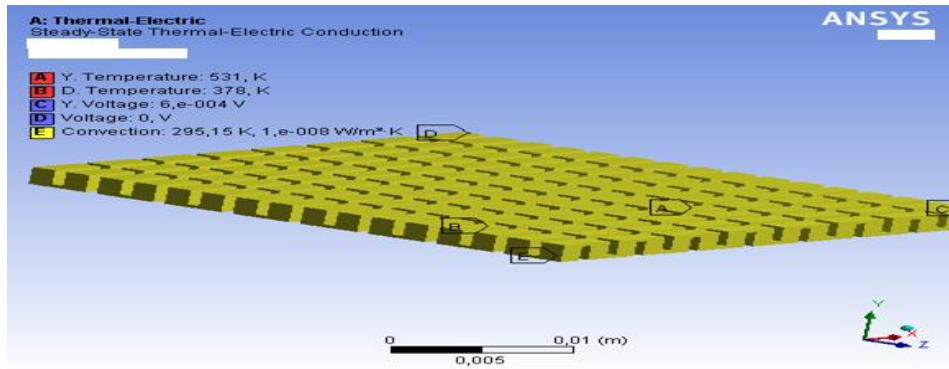
|                        |          |            |
|------------------------|----------|------------|
| By                     | Time     |            |
| Display Time           | Last     |            |
| Calculate Time History | Yes      |            |
| Identifier             |          |            |
| Suppressed             | No       |            |
| Results                |          |            |
| Minimum                | 368, K   | -0,95947 V |
| Maximum                | 513,09 K | 0,12766 V  |
| Minimum Occurs On      | Solid16  | Solid6     |
| Maximum Occurs On      | Solid7   | Solid6     |
| Information            |          |            |

**Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes**

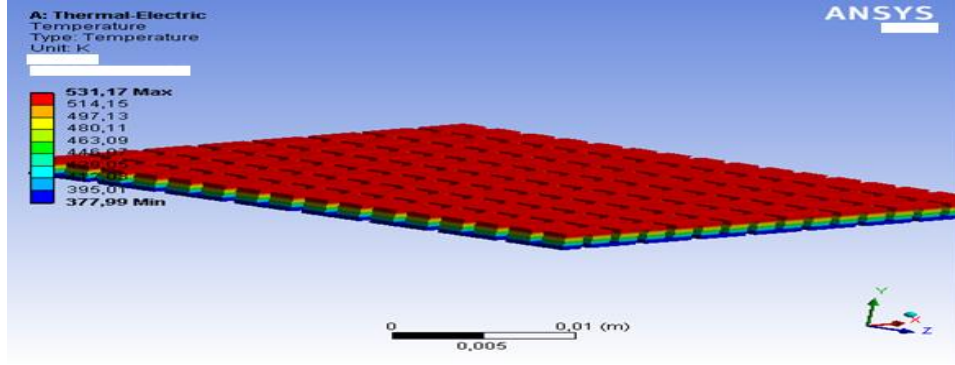
|                    |                    |                |                  |
|--------------------|--------------------|----------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     |                | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                |                  |
| Definition         |                    |                |                  |
| Type               | Reaction           |                |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |                  |
| Suppressed         | No                 |                |                  |
| Options            |                    |                |                  |
| Display Time       | End Time           |                |                  |
| Results            |                    |                |                  |
| Current            | 5,2915 A           |                |                  |

Şekil 3.97. Termal-Elektrik analiz çıktısı

Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devirde 75 Nm yük altında çalışması sonucunda TEM performansı incelenmiştir. Motorun bu şartlar altında çalışması sonucunda Şekil 3.95 TEM'in çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.96 TEM'de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.97 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. TEM yüzeylerine uygulanan sıcaklık sonucunda TEM uçları arasında 0.95 V açık devre gerilimi olduğu görülmektedir. Oluşan bu gerilim sonucunda TEM'den çekilebilecek maksimum akım değeri 5.29 A, maksimum elektriksel çıkış gücü 5 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.98. TEM giriş sınır şartları



Şekil 3.99. TEM’de meydana gelen sıcaklık dağılımı

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Results

|                        |                    |                  |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Object Name            | Temperature        | Electric Voltage |
| State                  | Solved             |                  |
|                        | Scope              |                  |
| Scoping Method         | Geometry Selection |                  |
| Geometry               | All Bodies         |                  |
| Definition             |                    |                  |
| Type                   | Temperature        | Electric Voltage |
| By                     | Time               |                  |
| Display Time           | Last               |                  |
| Calculate Time History | Yes                |                  |
| Identifier             |                    |                  |
| Suppressed             | No                 |                  |
| Results                |                    |                  |
| Minimum                | 378, K             | -1,09637 V       |
| Maximum                | 531,11 K           | 0,13468 V        |
| Minimum Occurs On      | Solid16            | Solid6           |
| Maximum Occurs On      | Solid7             | Solid6           |
| Information            |                    |                  |

Model (A4) > Steady-State Thermal-Electric Conduction (A5) > Solution (A6) > Probes

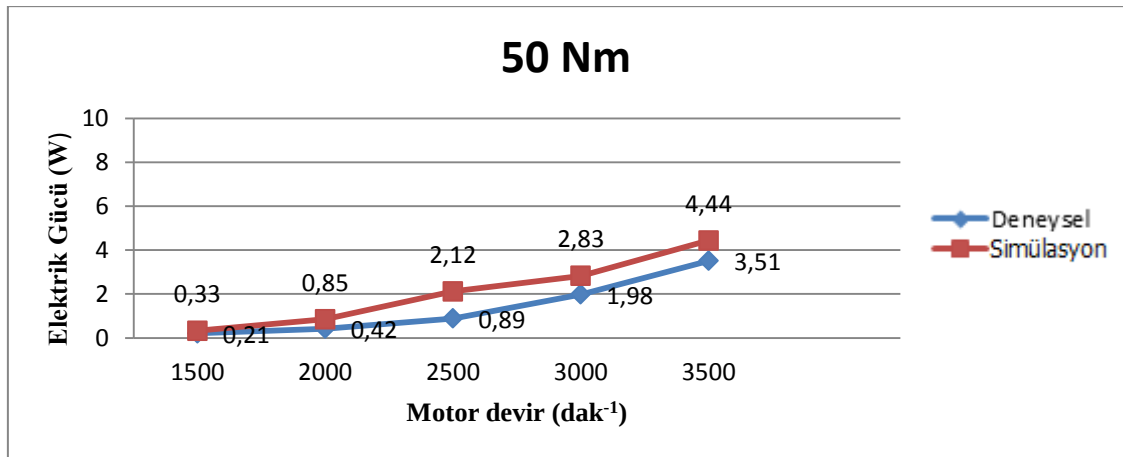
|                    |                    |                |                  |
|--------------------|--------------------|----------------|------------------|
| Object Name        | Reaction Probe     |                | Reaction Probe 2 |
| State              | Solved             |                |                  |
| Definition         |                    |                |                  |
| Type               | Reaction           |                |                  |
| Location Method    | Boundary Condition |                |                  |
| Boundary Condition | Y. Voltage         | Y. Temperature |                  |
| Suppressed         | No                 |                |                  |
| Options            |                    |                |                  |
| Display Time       | End Time           |                |                  |
| Results            |                    |                |                  |
| Current            | 5,5823 A           |                |                  |

Şekil 3.100. Termal-Elektrik analiz çıktısı

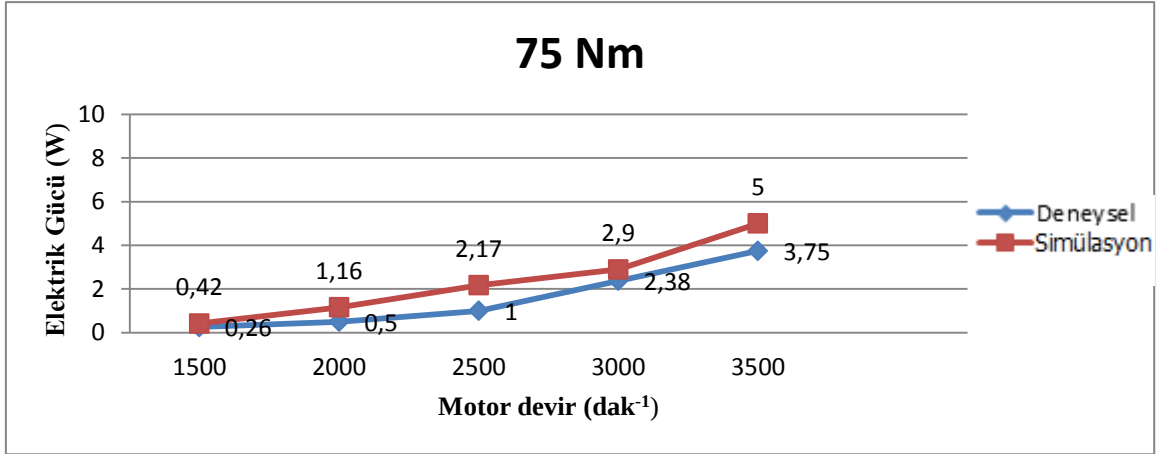
Motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devirde 100 Nm yük altında çalışma şartları için TEM’in performansı incelenmiştir. Motordaki bu çalışma şartları altında Şekil 3.98 TEM’de oluşan

çalışma sınır şartlarını, Şekil 3.99 TEM’de oluşan sıcaklık dağılımını ve Şekil 3.100 ise bu çalışma şartlarına göre Termal-Elektrik programında elde edilen sonuç verilerini göstermektedir. TEM yüzeylerine uygulanan sıcaklık sonucunda TEM uçları arasında 1.09 V açık devre gerilimi oluşmaktadır. Oluşan bu gerilim sonucunda TEM’den çekilecek maksimum akım değeri 5.58 A ve maksimum elektriksel gücü 6.08 W olmuştur.

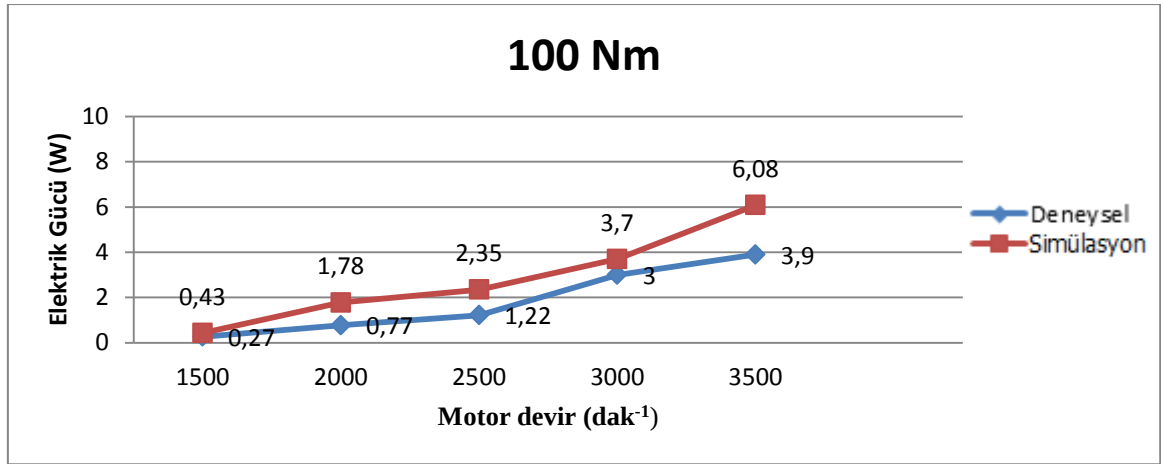
Bir adet TEM için, yukarıda analiz sonucunda elde edilen veriler ile deneysel çalışma sonucunda elde edilen verilerin kıyaslanması mümkündür. Yapılan bu deneysel çalışmada birbirine elektriksel olarak seri bağlı bulunan 40 adet TEM’in ayrı ayrı akım ve voltaj miktarlarını belirlemek mümkün değildir. Ancak, farklı çalışma şartları için birim modül başına düşen elektrik gücü miktarı yaklaşık bir ifade ile hesaplanabilir. Tek bir modülden elde edilen değer 50 Nm yük altında çalışan motorda 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500  $\text{dak}^{-1}$  devirlerde sırasıyla yaklaşık 0,21, 0,42, 0,89, 1,98 ve 3,51 W olmaktadır. Motorun 75 Nm yükte 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500  $\text{dak}^{-1}$  devirlerinde sırasıyla 0.26, 0.5, 1, 2.38 ve 3.75 W olur. Benzer şekilde motorun 100 Nm yükte çalıştırılması durumunda 1500, 2000, 2500, 3000 ve 3500  $\text{dak}^{-1}$  devirleri için ise 0,27, 0,77, 1,22, 3 ve 3.9 W olmuştur. Aşağıdaki Şekil 3.101, Şekil 3.102 ve Şekil 3.103 TEM’in değişen motor çalışma şartlarına göre oluşan Ansys Thermal-Electric analizi ile deneysel çalışma sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 3.101. Deneysel ve sayısal TEM elektrik gücü



Şekil 3.102. DeneySEL ve sayısal TEM elektrik gücü



Şekil 3.103. DeneySEL ve sayısal TEM elektrik gücü

DeneySEL ve sayısal çalışma neticesinde elde edilen veriler şunu göstermektedir ki gerçek çalışma şartlarında TEM’de meydana gelen termal ve elektriksel bağlantı kayıpları modüllerin verimlerini büyük oranda düşürmektedir. Ayrıca analizlerde çevre ile olan ısı kayıplarının ihmal edilmesi, Seebeck katsayısında oluşabilecek farklılıklar, imalat hataları ve TEM yüzeylerindeki homojen olmayan sıcaklık farklılıkları analiz sonuçlarının bir miktar yüksek çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca analiz sonucunda üretilen voltaj açık devre gerilimidir. Bu gerilim, hücre veya panelin standart test koşulları altında artı ve eksi çıkış uçları arasında herhangi bir yük yok iken, yani herhangi bir akım akmazken ölçülen açık devre gerilimidir. Bu nedenle yük kaybı yaşanmamış olması da çıkış değerlerinin analizlerde yüksek olmasına neden olmuştur.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Termoelektrik güç üretimi ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşme şeklidir. Başka bir deyişle bir yarı iletkenin sıcak ve soğuk yüzeyleri arasında meydana gelen sıcaklığa bağlı olarak kaynaklanan ısıнын elektrik enerjisine dönüşümüdür. Deney düzenekleri bu tanıma göre tasarlanmıştır. Bu çalışmada, farklı devir ve yükler altında çalıştırılan dizel bir motorun egzoz sistemine bağlantısı gerçekleştirilen TEJ sistemi yardımıyla atık ısıнын geri kazanımı işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, sürekli değişkenlik gösterebilen motor devir ve yükünün TEJ sistemindeki etkisi hem deneysel hem de sayısal analizlerde gösterilmiştir. Motorun devri ile beraber artış gösteren egzoz gaz hızı ve sıcaklığı TEM performansının artmasına neden olmuştur. Çalışmada, motorun 3500 dak<sup>-1</sup> devir ile 100 Nm yük altında çalıştırılması sonucunda TEJ sistemden maksimum akım ve gerilim elde edilmiştir. Egzoz sistemine bağlantısı gerçekleştirilen TEJ sistemimin ürettiği maksimum elektrik enerjisi değeri maksimum 156.7 Watt olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu elektrik enerjisi taşıtlarda bataryanın şarjlı kalmasını sağlayabileceği gibi araçlarda bulunan klima, ısıtıcı, lambalar vb gibi alıcılara elektrik enerjisi sağlaması noktasında alternatöre alternatif bir enerji kaynağı olabileceği bu çalışma ile kanıtlanmıştır. Ayrıca çalışmamızda Ansys Fluent 12.0 paket programında termoelektrik egzoz sistemin iki boyutlu ısı ve akış analizleri gerçekleştirilmiştir. TEJ sistemde oluşan sıcaklık dağılımları incelendiğinde deneysel veriler ile analiz sonuçları arasında çok fazla bir fark oluşmadığı görülmüştür. Ayrıca enerji dönüşüm verimliliği hesaplandığında bir tek modülün yaklaşık % 4.3'lük bir etkiye sahip olduğu deneysel çalışma sonucunda görülmüştür. Hesaplamalar yapılırken TEJ soğutma sisteminin ihtiyacı olan 20 W değerindeki kayıp elektrik enerji hesaba katılmamıştır. Bu nedenle kayıp kazanç hesabı yapıldığı takdirde sistemin veriminin bir miktar düşmesi mümkündür.

TEJ sisteminde oluşan basınç düşümü motor çalışma şartlarının tamamında gözlenmiş olup, özellikle yüksek akış hızlarına sahip devirlerde daha belirgin bir hal aldığı dikkat çekmiştir. Dolayısıyla egzoz gazlarının TEJ sistemi içerisindeki toplam basıncının TEJ çıkışına doğru düşüş göstermesi yerel kayıpların doğal bir sonucu olarak düşünülmektedir. Sayısal hesaplamalar yardımıyla ısı ve akış dağılımları bakımından detaylı bilgilerin elde edildiği düşünülmektedir.

Ayrıca Ansys 12.0 Workbench içinde yer alan Thermal-Electric programında, çalışmada kullanılan TEM'lerin ısı-elektriksel analizleri gerçekleştirilmiştir. Bir adet TEM için, deneysel çalışmada en yüksek 3.9 W'lık bir elektrik enerjisi elde edilirken, analiz sonuçlarında bu değer 6.08 W olarak tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada elektriksel bağlantı kayıpları ve elektriksel yük faktörü çıkış gücü üzerinde önemli bir etki oluşturduğu düşünülmektedir. Bu nedenle analiz verilerinin daha yüksek olduğu söylenebilir. Ayrıca ticari bir ürün olan TEM'lerin Seebeck katsayıları yapılan literatür taraması sonucunda programa tanıtılmıştır. Bu değerlerin de elektrik gücü üzerinde oluşan bu farklılığın nedenlerinden biri olduğu düşünülmektedir.

Termoelektrik üretim kusursuz derecede temiz ve güvenilir bir enerji kaynağıdır. Termoelektrik enerji üretimi yüksek güvenilirlik, sessizlik, hareketli parçaların olmayışı ve uzun ömürlü bakımsız çalışması gibi sebeplerle ön plana çıkmaktadır. Termoelektrik Enerji teknolojileri kullanımı; enerji tedarikinde çeşitlilik ve güvenilirliği kazandırması, yeni iş olanakları sağlaması, enerji piyasasında yeniden yapılanmayı desteklemesi, ithal yakıt bağımlılığını azaltması, uzak ve izole yerlerde yaşayan kırsal toplulukların elektrik ihtiyacının karşılanması gibi önemli sosyo-ekonomik sorunlara çözüm olabilir. Yüzeyler arası ısı geçişinin azaltılması, sıcak yüzeyin ısı kaybının düşürülmesi, soğuk yüzeyin daha iyi soğutulması gibi yapılacak bazı iyileştirmelerle bu etkinlik daha da artırılabilir. Böylece Termoelektrik enerji üretim sistemleri önümüzdeki yıllarda önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak düşünülebilir.

Daha önce belirtildiği gibi atık ısıdan elektrik enerjisi üretiminde kullanılan bu sistemlerin verimleri kullanılan malzeme yapısı ile sınırlıdır. İlk bakışta bu değer küçük gibi görünse de atık ısının elektrik enerjisi olarak geri kazanımı ile beraber değerlendirildiğinde bu verim miktarı oldukça değerlidir. Ayrıca sistemin çevreci olması da yine önemli bir faktördür.

Araç radyatörü, sobalar, doğal sıcak su kaynakları, gazlı su ısıtıcıları, güneş ışınlarının odaklanması gibi atıl ısının değerlendirilebileceği kaynaklardan TEJ sistemleri ile daha etkin yararlanılabilir. Ayrıca hibrit elektrikli araçlarda akü şarjına ek bir şarj sistemi olarak düşünülebilir. Katalitik konvertör sistemi, sürüş esnasında oluşan CO ve HC emisyonlarının büyük bir kısmını ortadan kaldırarak zararsız bir hale dönüştürür. Fakat performansları çalışma sıcaklıkları ile sınırlı kalmaktadır. Çalışma sıcaklığına varıncaya kadar sistem tam performanslı çalışmaz. Çalışma sıcaklığı 1 ya da 2 dk sonra oluşur ve o

zaman sistem etkin çalışmaya başlar. Burada kullanılabilecek termoelektrikli cihaz büyük ölçüde soğuk başlangıç emisyonlarını azaltarak katalitik konvertörün çalışma sıcaklığını yükseltebilir. İçten yanmalı motorlar alanında yapılan ve yapılacak çalışmalar motor egzoz gazlarındaki enerjiyi elektrik enerjisine doğrudan dönüşümünü sağlayan TE materyallerin potansiyel kullanımına katkı sağlarlar. Bu sistemler yardımıyla üretilen elektrik, hibrit sistemlerle (fotovoltaik, piezoelektrik) birleştirilerek daha etkili bir şekilde kullanılabilir. Ayrıca enerjinin maksimum geri kazanımı motorun maksimum çıkış gücünde sağlanabilirken gerçek yol şartlarında araçların uzun süre maksimum güç de çalışması söz konusu olmayabilir. Bu nedenle enerjinin geri kazanımı hakkında daha sağlıklı veriler elde etmek için gerçek yol şartlarında birtakım araştırmaların yapılması mümkündür.

## KAYNAKLAR

- [1] **Temizer, İ.**, 2010. Bir dizel motorunun performans ve emisyonları üzerine katkı maddelerinin etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [2] **Deniz, O.**, 2008. İçten yanmalı motorlar ders notları, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [3] **Balcı,C.**, 2011. Egzoz gaz enerjisiyle çalışan  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  absorpsiyonlu soğutma sistemiyle taşıt kabininin iklimlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [4] **Can,İ.**, 2009. Lpg ile çalışan benzinli bir motora kademeli doldu yapılmasının performans üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [5] **Toksöz,S.**, 2010. Bir dizel motorunda yanma olayının analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [6] **Çakır,U.**, 2007. Seramik kaplı bir dizel motor yanma odasının termal analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [7] <http://www.megep.meb.gov.tr> Sabit Motor Parçaları.pdf. 10 mart 2012.
- [8] **Lagrandeur, J ve crane, D.**, 2005. Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery, Bsst Llc 5462 Irwindale Avenue Irwindale, Chicago.
- [9] <http://obitet.net/index.php/dokumanlar> Marş ve Şarj Sistemleri. 20 Eylül 2012.
- [10] <http://bilimselkonular.com/> termoelektrik.html,13 Kasım 2011.
- [11] **Turan,E.,vd.**, 2012. Elektrik enerjisi üretimi, Anadolu Üniversitesi Yayınları 2506, Eskişehir,978-975.
- [12] **Temizer,İ.**, 2012. Energy conversion of systems used thermoelectric technology,12th International Combustion Symposium, Turkey, May 24-26.
- [13] **Kaynaklı,M.**, 2010. Pençe tipi alternatör ile sabit mıknatıslı alternatör performanslarının karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü ,Sakarya.
- [14] [http://www.balmar.net/pdf/alternator drawings/6-series-sheet.pdf](http://www.balmar.net/pdf/alternator%20drawings/6-series-sheet.pdf). 23 Ocak 2012.
- [15] **Ivankovic,R.,vd.**, 2012. Power electronic solutions to improve the performance of lundell automotive alternators, New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering, Canada.

- [16] **Koçak,E.,** 2010. Olasılık sinir ağı kullanılarak alternatör arızalarının tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [17] <http://www.megep.meb.gov.tr> Şarj Sistemleri,19 Mayıs 2013.
- [18] **Uçar,M.,** 2009. Alternatör arızalarının zeki denetim teknikleri ile gerçek zamanlı olarak tespit edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [19] **Özermiş,E,M.,** 2010. Kurşun asit akülerin optimum şarj olmasını sağlayan şarj devresi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [20] <http://www.obitet.net> Akü sistemleri, 12 Kasım 2012.
- [21] <http://hbogm.meb.gov.tr> Otomotiv Elektrik Tesisatı.pdf. 12 Temmuz 2013.
- [22] **Çalışkan A.,** 2007. Otomotiv Elektroniği Ders Notları, Sakarya.
- [23] **Temizer,İ.,** 2012. Effects on vehicle systems of technology thermoelectric, Batman University International Participated Science And Culture Symposium, Batman University , Journal of Life Sciences.
- [24] **Derun, E.M.,** 2005.  $Sb_2Te_3$  ve  $Bi_2Te_3$  içerikli bileşiklerin termoelektrik, yapısal ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] **Özgün, H.,** 2009. Termoelektrik jeneratörlerin çok düşük sıcaklıklarda teorik ve deneysel karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] **Jaegle,M.,** 2007. Multiphysics simulation of thermoelectric systems, Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques Heidenhofstr, Freiburg.
- [27] <http://www.power.gen.tr/makaleler/icerik.asp?id=96>, 20 Eylül 2013.
- [28] **Ünsaç,A.,** 2010. Kriyojenik ısı değiştiricisinde termoelektrik jeneratör uygulaması ve karakterizasyonu, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknolojisi, İstanbul.
- [29] **Yaman,M.,** 2009. Güneş ışınlı ve termoelektrik malzemeler ile elektrik enerjisi üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü,İsparta.
- [30] **Pişkin,B,M.,** 2006. Yarı iletken alaşımlarının elektriksel, termoelektrik, fiziksel, ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi ve sanayii uygulamaları, Doktora Tezi,Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , İstanbul.
- [31] **Döşkaya H.E.,** 2010. Güneş enerjisi ve atık ısı kullanılarak termoelektrik modül ile deneysel elektrik üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

- [32] **Suter,C.,** 2012. A 1 kWe thermoelectric stack for geothermal power generation – Modeling and geometrical optimization, *Applied Energy* ,379–385.
- [33] **Meng,F.,** 2011, A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multi-irreversibilities, *Energy* ,3513- 3522.
- [34] **Huang, H, S.,** Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 140–146.
- [35] **Zhou,Y.,** 2008. Energy harvesting using a thermoelectric generator and generic rule-based energy management, For The Degree of Master of Science, Case Western Reserve University.
- [36] **Li,S.,** 2010. Thermo-mechanical analysis of thermoelectric modules, Industrial Technology Research Institute,Taiwan.
- [37] **Lau,G,P.,** 1997. Calculation of thermoelectric power generation performance using finite element analysis, *Thermoelectric Proceedings ict '97. Xvi International Conference on*, Dresden, Aug 26-29.
- [38] **Hsu,T,C.,** 2011. An effective seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module, *Applied Energy*, 88, 5173-5179.
- [39] **Weisse,M,J.,** 2010. Thermoelectric generators,stanford university, Fall.
- [40] **Crane,T,D.,** 2003. Potential thermoelectric applications in diesel vehicles, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction (deer) Conference*, Newport, Rhode Island, August 24-28.
- [41] [http://tr.wikipedia.org/wiki/peltier\\_soğutucu\\_optimizasyonu](http://tr.wikipedia.org/wiki/peltier_soğutucu_optimizasyonu),20 Şubat 2014.
- [42] **Mohan, N., vd.,** 2010. Aktroniği, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [43] **Bitschi,A.,** 1973. Modelling of thermoelectric devices for electric power generation, The Degree of Doctor of Sciences, Technical University of Vienna ,Austria.
- [44] **Cafer, T.,** 2000. Katıhal elektroniği, YTÜ Vakfı Yayınları, İstanbul.
- [45] **Kulbachinskii V.A. ve Kaminskii A,Y.,** 2004. “Thermoelectric power and shubnikov-de has effect in magnetic impurity-doped  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 272: 1991–1992.
- [46] **Sano,S.,** 2003. Development of high-efficiency thermoelectric power generation system, Technical Report, Vol. 49 no.152.
- [47] **Reinhaus P., vd,** 1994. Proc. of the 2th european symposium on thermoelectric materials, Processing Techniques and Application, Dresden ,Germany.

- [48] <http://www.tellurex.com/technology/seebeck> 12 Ekim 2013.
- [49] **Yu,C., Chau,K,T.**, 2009. Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking, *Energy Conversion and Management*, 1506– 1512.
- [50] **Love,N.D., vd.**, 2012. Effect of heat exchanger material and fouling on thermoelectric exhaust heat recovery, *Applied Energy*, 322–328.
- [51] **Bensaid,S., vd.**, 2012. High efficiency Thermo-Electric power generator, *International Journal of Hydrogen Energy*, 1385 -1398.
- [52] **Gao,X., vd.**, 2012. Numerical model of a thermoelectric generator with compact plate-fin heat exchanger for high temperature PEM fuel cell exhaust heat recovery, *International Journal of Hydrogen Energy*, 8490-8498.
- [53] **Bansal P. K. ve Martin A.**, 2000. Comparative study of vapour compression, thermoelectric and absorption refrigerator, *International Journal of Energy Research*, 24:93-107.
- [54] **Yalçinkaya,G.**, 2008. Termoelektrik modül ile soğutma ve deneysel elektrik üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [55] **Keççiler,A.**, 2007. Termoelektrik soğutucular ve uygulamalar, Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya.
- [56] **Yıldırımaz, G. ve Kalecik, O.**, 2007, Güç elemanlarında soğutma sistemlerinin incelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [57] **Ahiska,R., vd.**, 2012. Termoelektrik jeneratörler için düşük güçlü DC/DC boost konvertör uygulanması, Proje Tabanlı Mekatronik Eğitim Çalıştayı Çankırı, Türkiye, Mayıs 25-27.
- [58] **Çakır G.**, 2006. Yumuşak anahtarlama Dc-Dc boost dönüştürücü topolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [59] **Altıntaş,N.**, 2007. Yumuşak anahtarlama Dc-Dc dönüştürücülerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [60] **Kavaklı,K,A.**, 2005. Egzoz gazı ile çalışan absorpsiyonlu soğutma sisteminin otobüslerde kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- [61] **Özdenal, A.**, 2006. Motor egzoz gazını ısı kaynağı olarak kullanan absorpsiyonlu soğutma sistemi ile taşıt kabini soğutulmasının teorik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [62] **Atmaca,M.**, 2006. Klasik tip eş eksenli (merkezli) iç içe borulu ısı değiştiricisinde ısı transferi ve basınç kaybının deneysel olarak incelenmesi, Makine

- [63] **Gemici,E.**, 2009. CFD modelling of a coupled catalytic convertor, Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi,İstanbul.
- [64] **Yılmaz,B,U.**, 2012. Altıgen kesitli kanalda hidrodinamik olarak tam gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan akışın sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü,Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [65] **Weng,C,C.**, 2013. A Simulation study of automotive waste heat recovery using a thermoelectric power generator, international journal of thermal sciences ,302 -309.
- [66] **Hilali,İ.**, 2007. An experimental study on absorption refrigeration system driven by engine exhaust gas for vehicles, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [67] **Karabiyik, Ö.**, 2008. Buji ateşlemeli hava soğutmalı bir motorda egzoz gazları ile ısıtılmış LPG yakıtının yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarına etkisi,Teknik Bilimler Dergisi, CBÜ Soma Meslek Yüksek Okulu,1-9.
- [68] **Yalçın,E.**, 2011. İçten yanmalı motorlarda turbo aşırı doldurma grubunun termodinamik modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi,İstanbul.
- [69] **Courant, L.**, 2012. Waste heat recovery in brake pad using a thermoelectric generator Department of Energy Technology, Alborg University.
- [70] **Sisman, A. ve Özgün, H.**, 2008. Thermoelectric generators and their applications for energy from space. Efs 2008, international workshop on Energy from space for a sustainable environment. İstanbul, Turkey.
- [71] **Thacher,E,F.**, 2005. Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck, Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering, 221-95.
- [72] **Kumar,S.**, 2013. Thermoelectric generators for automotive waste heat recovery systems part , Parametric Evaluation And Topological Studies, Journal of Electronic Materials, 2472-8.
- [73] **Vieira, B, A, J.**, 2009. Thermoelectric generator using water gas heater energy for battery charging, 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-Conference on Systems And Control Saint Petersburg, Russia, July 8-10.
- [74] **Ahiska,R.**, 2011. Termoelektrik modülün jeneratör olarak modellenmesi ve deneysel çalışması, Gazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 889-896.
- [75] **Hatzikraniotis, E..** Study of thermoelectric power generators and application in a small sized car, Physics Department, Solid State Physics Section, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.

- [76] **Lagrandeu,J.,** 2006. Automotive waste heat conversion to electric power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe'', Thermoelectrics, 2006. Ict '06. 25th International Conference on, 343 – 348.
- [77] **Admasu,T,B.,vd.,** 2013. Effects of temperature non-uniformity over the heat spreader on the outputs of thermoelectric power generation system, energy conversion and management 76, 533–540.
- [78] **D.T.Crane, vd.,** Performance results of a high power density thermoelectric generator:beyond the couple, Irwindale, 91706 USA.
- [79] **Daniel J. Krommenhoek, vd.,** Predicted performance of quantum well thermoelectrics for power generation, *Hi-z Technology, inc., San Diego, ca 92126-4210.*
- [80] **Eric F. Thacher, Joseph R. Wagner, S.,** Thermoelectric generator'', Clarkson University.
- [81] **Phillip,N.,** Thermo Electric Generators,Control Theory and Applications Centre ,Coventry University.
- [82] **G. Jeffrey Snyder and Eric S. Toberer.,** Complex thermoelectric materials, Materials Science, California Institute of Technology, 1200 East California Boulevard, Pasadena, California 91125, USA.
- [83] **Su,Ş., İlbaş,M.,** 2003. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları sempozyumu ve sergisi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Kayseri.
- [84] **Espinosa,N.,** 2010, Modeling a thermoelectric generator applied to diesel automotive heat recovery, Journal of Electronic Materials, 1446-1455.
- [85] **Vázquez,J., vd.,** State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles'',İspanya.
- [86] **Ramesh,C.,Sonthalia,A.,Goel,R.,** Experimental study on waste heat recovery from an IC engine using thermoelectric technology. [www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2011%20online-first/035498361100053k.pdf](http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2011%20online-first/035498361100053k.pdf). 20 Mart 2012.
- [87] **Kaya, A.Y.,** 2010. Egzoz gazındaki ısı ile çalıştırılan termoelektrik sistemin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi Elektronik Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı , Isparta.
- [88] **K. Wojciechowski, vd.,** Study of recovery of waste heat from the exhaust of automotive engine, Poznan University Of Technology, Piotrowo 3, 60-965, Poznan, Poland.

- [89] **Braig,T., Ungethüm,J.,** 2009. System-level modeling of an ICE-powered vehicle with thermoelectric waste-heat-utilization,Proceedings 7th Modelica Conference, Como, Italy, sep. 20-22.
- [90] **Yushanov, S.P., vd.,** Multiphysics analysis of thermoelectric phenomena, Altasim Technologies,Llc,Comsol Conference, October13-15.
- [91] **Admasu,T,B.,** 2013. Effects of temperature non-uniformity over the heat spreader On the outputs of thermoelectric power generation system, Energy Conversion and Management ,533–540.
- [92] **Hsu,T,C.,** 2011. Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators, Applied Energy, 1291–1297.
- [93] **Güldiken,F.,** 2011.Termoelektrik modüllerin fiziksel boyutlarının soğutma kapasitesi üzerine etkisinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen bilimleri enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- [94] **Antonova,E.E, and Looman ,C.D.,** Finite elements for thermoelectric device analysis in ansys, southpointe, Technology Drive, Canonsburg, USA.
- [95] **Dişlitaş,S,vd.,** 2007. Termoelektrik modülün dinamik çıkış parametrelerinin elde edilmesi için yeni bir algoritma, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Ankara, 22-4.
- [96] **Champier, D.,** 2009. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves, Energy,1-8.
- [97] **Lertsatitthanakorn, C.,** 2007.Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator, Bioresource Technology 98, 1670–1674.
- [98] **Fettah,S.,** 2010. Katı oksit yakıt pilinin atık ısısından elektrik enerjisi üretim sistemin deneysel analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Başkent Üniversitesi, Ankara.
- [99] **Kühn,R., Koeppen,O., Kitte,J.,** 2013. Influence of an optimized thermoelectric generator on the back pressure of the subsequent exhaust gas system of a vehicle, Journal of Electronic Materials, 1521-1526.
- [100] **Kober,M.,** 2012. Methodical concept development of automotive thermoelectric generators (TEG), 3. International Conference Thermoelectrics goes Automotive, Methodical Concept Development of Automotive TEG.
- [101] **F.P. Incropera and D.P. DeWitt.,** 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 137–168.

[102] **Yücel, N., vd.**, 2013. Akışkanlar mekaniğine giriş, Nobel akademik yayıncılık eğitim danışmanlık, Hazar Basımevi 26482, Ankara.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1986 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamladı. 2008 yılında Fırat üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Otomotiv Öğretmenliği bölümü bitirdi ve aynı yıl yüksek lisansa başladı. 2010 yılında Makine Eğitimi Otomotiv A.B.D'da yüksek lisansı tamamlayarak 2011 yılında doktora başladı ve şu an Muş Alparslan Üniversitesi'nde Uzman Öğretim Elemanı olarak çalışmaktadır.