

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MOTORLU TAŞITLAR İÇİN EGZOZ SİSTEMİNE
UYGUN TERMÖELEKTRİK JENERATÖR
GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şahin Anıl AYBEK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yaşar İSLAMOĞLU

Haziran 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MOTORLU TAŞITLAR İÇİN EGZOZ SİSTEMİNE
UYGUN TERMOELEKTRİK JENERATÖR
GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şahin Anıl AYBEK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ


Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez. 19.6.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. İ.Cem Parmaksızoğlu



Prof.Dr. Yaşar İslamoğlu



Prof.Dr. İmdat Taymaz



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Şahin Anıl AYBEK

19.6.2019



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Yaşar İSLAMOĞLU'na, teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışma sürecim boyunca desteğini esirgemeyen annem, babam ve kardeşim Özay AYBEK, Yüksel AYBEK ve Özge AYBEK'e ve her zaman yanımda olan eşim Günce AYBEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Enerji Tüketiminin Günümüzdeki Durumu	1
1.2. Termoelektrik Etkiler	3
1.2.1. Seebeck etkisi ve termoelektrik jeneratör	4
1.2.2. Peltier etkisi ve termoelektrik soğutucu	6
1.2.3. Thomson etkisi	8
1.3. Egzoz Gazından Elektrik Üretimi Üzerine Yapılmış Çalışmalar	9
BÖLÜM 2.	
DENEYSEL ÇALIŞMA	26
BÖLÜM 3.	
MODELLEME VE SAYISAL ÇÖZÜM	
3.1. Termoelektrik Modül İçin Teorik Esaslar	30
3.2. Termoelektrik Güç Üretimi (TEG)	31
3.3. Termoelektrik Soğutma (TEC)	32
3.4. Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi, Malzemenin Termo-Fiziksel	

Özellikleri ve Termoelektrik Modülün Boyutları	33
3.5. Termoeleman Ayak Geometrilerinin Etkileri	38
3.6. Tasarlanan Isı Değiştirici Modelleri	46
3.6.1. Model 1	47
3.6.2. Model 2	48
3.6.3. Model 3	48
3.6.4. Model 4	49
3.6.5. Model 5	50
3.6.6. Model 6	50
3.6.7. Model 7	51
3.6.8. Model 8	51
3.6.9. Model 9	52
3.6.10. Model 10	53
3.7. Ağ Yapıları İçin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması	54
3.8. Model 1 İçin Analiz Sonuçları	55
3.8.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları	55
3.8.2. Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları	58
3.9. Model 2 İçin Analiz Sonuçları	60
3.9.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları	60
3.9.2. Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları	63
3.10. Model 3 İçin Analiz Sonuçları	65
3.10.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları	65
3.11. Model 4 İçin Analiz Sonuçları	68
3.11.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz Sonuçları	68
3.12. Model 5 İçin Analiz Sonuçları	71
3.12.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları	71
3.13. Model 6 İçin Analiz Sonuçları	74
3.13.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları	74
3.14. Model 7 İçin Analiz Sonuçları	77
3.14.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları	77
3.15. Model 8 İçin Analiz Sonuçları	81
3.15.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları	81

3.16. Model 9 İçin Analiz Sonuçları	81
3.16.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları	81
3.17. Model 10 İçin Analiz Sonuçları	83
3.17.1. Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları	83
3.18. Taşıt Hareketsiz Durumdaki Analiz Sonuçları	86
3.19. Isı Borusu Etkisinin Karşılaştırılması	90
3.20. Prototip Termoelektrik Jeneratörün Sayısal Analizi ve Deneysel Doğrulaması	90
BÖLÜM 4.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	97
EKLER	101
ÖZGEÇMİŞ	111

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

- ABD : Amerika Birleşik Devletleri
- A : Termoelektrik malzemenin ayak kesit alanı [m^2]
- H : Termoelektrik malzemenin ayak yüksekliği [m]
- I : Elektrik akımı [A]
- k : Termoelektrik malzemenin ısı iletim katsayısı [W/mK]
- MW : MegaWatt
- P : Güç [W]
- Q_H : Kaynaktan alınan ısı veya jeneratörün aldığı ısı [W]
- Q_L : Kuyuya verilen ısı veya jeneratörün verdiği ısı [W]
- R : Elektrik direnci [Ω], [1/S]
- S_s : Termoelektrik malzemenin Seebeck katsayısı [V/K]
- T : Termoelektrik ayakların veya eklem ortalaması mutlak sıcaklığı [K]
- T_H : Kaynak tarafında termoelektrik ayakların uç veya eklem sıcaklığı [K]
- T_L : Kuyu tarafında termoelektrik ayakların uç veya eklem sıcaklığı [K]
- V : Elektriksel gerilim (Voltaj) [V]
- Z : Termoelektrik malzemenin performansı [1/K]
- Z.T : Termoelektrik malzemenin performansı
- ρ : Termoelektrik malzemenin elektrik öz direnci [$\Omega.m$], [m/S]
- σ : Termoelektrik malzemenin elektrik iletkenliği [$1/\Omega.m$], [S/m]
- η : Termoelektrik verim (ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm oranı)
- n : Tipi n olan termoelektrik malzeme veya ayak
- p : Tipi p olan termoelektrik malzeme veya ayak

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. ABD’de 2016 yılı enerji tüketimi	1
Şekil 1.2. ABD’de yıllara göre ulaşımda tüketilen enerji miktarları	2
Şekil 1.3. Bir otomobildeki enerji kayıpları	3
Şekil 1.4. Bir termoelektrik ayak çiftinde elektrik üretimi	6
Şekil 1.5. Peltier etkisi altındaki bir termoelektrik ayak çiftinde ısıtma olayı	7
Şekil 1.6. Peltier etkisi altındaki bir termoelektrik ayak çiftinde soğutma olayı ...	7
Şekil 1.7. Thomson Etkisi	8
Şekil 1.8. Termoelektrik jeneratör için ısı değiştirici modeli	9
Şekil 1.9. Egzoz’daki atık ısıdan enerji üretimi için geliştirilmiş ısı değiştiriciler	10
Şekil 1.10. Isı alıcı ve fan kullanılarak oluşturulmuş bir ısı değiştirici modeli ...	11
Şekil 1.11. Bir termoelektrik jeneratör sisteminin analizi için akış diyagramı	12
Şekil 1.12. Termoelektrik jeneratör sistemi için tasarlanmış özel ısı değiştirici ..	13
Şekil 1.13. Bir egzoz ısı değiştiricisinde saptırıcı kullanımı ve konumlandırılması	14
Şekil 1.14. Egzoz termoelektrik jeneratör sistemi için tasarlanmış ısı değiştirici	15
Şekil 1.15. 40 adet termoelektrik modül kullanılmış bir ısı değiştirici	15
Şekil 1.16. Isı borulu ve kanatlı bir egzoz ısı değiştiricisi	16
Şekil 1.17. Modül üzerindeki basınç etkisi ölçümü için oluşturulmuş düzenek ..	18
Şekil 1.18. Modüller ile akışkanların temasını sağlayan bir ısı değiştirici örneği.	19
Şekil 1.19. Kare profilli bir egzoz ısı değiştirici	20
Şekil 1.20. Farklı geometrilere sahip termoelektrik ayak çiftleri	21
Şekil 1.21. Bir termoelektrik modüldeki ısıl direnç modeli	22
Şekil 1.22. Egzoz termoelektrik jeneratör sistemi için ısı değiştirici	23
Şekil 1.23. Egzoz termoelektrik jeneratör sistemi için ısı değiştirici	23
Şekil 1.24. Isı alıcı formunda termoelektrik sistem	24
Şekil 1.25. Isı borulu ve ısı alıcılı termoelektrik sistem	25
Şekil 2.1. Deney düzeneği	26

Şekil 2.2. Deney düzeneğindeki ısı değiştirici ve parçaları	29
Şekil 3.1. ANSYS programında modül kullanımı	34
Şekil 3.2. Egzoz akış hızı	37
Şekil 3.3. Egzoz gazı sıcaklığı	37
Şekil 3.4. Akış yönlerinin modül üzerinde gösterimi	38
Şekil 3.5. Prizma ayaklı termoelektrik çiftlerin parametrik ölçülendirme	40
Şekil 3.6. Prizma ayaklı termoelektrik çiftlerde üretilen akım grafiği.....	41
Şekil 3.7. Prizma ayaklı termoelektrik çiftlerde üretilen güç grafiği.....	41
Şekil 3.8. Prizma ayaklı termoelektrik çiftlerde verim grafiği.....	41
Şekil 3.9. Kare prizma ayaklı çiftlerde ayak yüksekliğine bağlı akım grafiği.....	42
Şekil 3.10. Kare prizma ayaklı çiftlerde ayak yüksekliğine bağlı güç grafiği	42
Şekil 3.11. Kare prizma ayaklı çiftlerde ayak yüksekliğine bağlı verim grafiği...	43
Şekil 3.12. Trapez ayaklı termoelektrik çiftlerde üretilen akım grafiği.....	44
Şekil 3.13. Trapez ayaklı termoelektrik çiftlerde üretilen güç grafiği	44
Şekil 3.14. Trapez ayaklı termoelektrik çiftlerde verim grafiği.....	44
Şekil 3.15. Trapez ayaklı termoelektrik çiftlerin parametrik ölçülendirme	45
Şekil 3.16. SP1848-27145SA modül görüntüsü	46
Şekil 3.17. Model 1	47
Şekil 3.18. Model 2	48
Şekil 3.19. Model 3	48
Şekil 3.20. Model 4	49
Şekil 3.21. Model 5	50
Şekil 3.22. Model 6	50
Şekil 3.23. Model 7	51
Şekil 3.24. Model 8	51
Şekil 3.25. Model 9	52
Şekil 3.26. Model 10	53
Şekil 3.28. Farklı düğüm ve eleman sayılarında sıcaklık dağılımları	54
Şekil 3.28. Model 1 için farklı hız ve değişken motor devrinde akım grafiği	55
Şekil 3.29. Model 1 için farklı hız ve değişken motor devrinde güç grafiği.....	55
Şekil 3.30. Model 1 için farklı hız ve değişken motor devrinde verim grafiği	56
Şekil 3.31. Model 1 için farklı hız ve motor devrinde sıcaklık dağılımları	57

Şekil 3.32. Model 1 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	58
Şekil 3.33. Model 1 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği..	58
Şekil 3.34. Model 1 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen verim grafiği	59
Şekil 3.35. Model 1 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları.	59
Şekil 3.36. Model 2 için farklı hız ve değişken motor devrinde akım grafiği	60
Şekil 3.37. Model 2 için farklı hız ve değişken motor devrinde güç grafiği	61
Şekil 3.38. Model 2 için farklı hız ve değişken motor devrinde verim grafiği.....	61
Şekil 3.39. Model 2 için farklı hız ve motor devrinde sıcaklık dağılımları	62
Şekil 3.40. Model 2 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği	63
Şekil 3.41. Model 2 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği..	63
Şekil 3.42. Model 2 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	64
Şekil 3.43. Model 2 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları.	64
Şekil 3.44. Model 3 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği	65
Şekil 3.45. Model 3 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği..	66
Şekil 3.46. Model 3 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	66
Şekil 3.47. Model 3 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları .	67
Şekil 3.48. Model 4 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği	68
Şekil 3.49. Model 4 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği..	68
Şekil 3.50. Model 4 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	69
Şekil 3.51. Model 4 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları..	70
Şekil 3.52. Model 5 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği	71
Şekil 3.53. Model 5 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği..	71
Şekil 3.54. Model 5 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	72
Şekil 3.55. Model 5 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları..	73
Şekil 3.56. Model 6 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği	74
Şekil 3.57. Model 6 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği..	75
Şekil 3.58. Model 6 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	75
Şekil 3.59. Model 6 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları..	76
Şekil 3.60. Model 7 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği	77
Şekil 3.61. Model 7 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği..	77
Şekil 3.62. Model 7 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	77
Şekil 3.63. Model 7 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları..	78

Şekil 3.64. Model 8 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği	79
Şekil 3.65. Model 8 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği..	79
Şekil 3.66. Model 8 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	79
Şekil 3.67. Model 8 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları..	80
Şekil 3.68. Model 9 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği	81
Şekil 3.69. Model 9 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları..	82
Şekil 3.70. Model 9 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği..	83
Şekil 3.71. Model 9 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	83
Şekil 3.72. Model 10 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği	84
Şekil 3.73. Model 10 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği	84
Şekil 3.74. Model 10 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği.....	84
Şekil 3.75. Model 10 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları	85
Şekil 3.76. Taşıt hareketsizken bütün modellerde üretilen akım grafiği	86
Şekil 3.77. Taşıt hareketsizken bütün modellerde üretilen güç grafiği.....	86
Şekil 3.78. Taşıt hareketsizken model 1-2-3-4 için modül sıcaklık dağılımları ..	87
Şekil 3.79. Taşıt hareketsizken model 5-6-7-8 için modül sıcaklık dağılımları ..	88
Şekil 3.80. Taşıt hareketsizken model 9-10 için modül sıcaklık dağılımları	89
Şekil 3.81. Taşıt hareketsizken bütün modellerde üretilen verim grafiği	89
Şekil 3.82. Isı borulu ve borusuz durum karşılaştırma grafiği.....	90
Şekil 3.83. Denede kullanılan modül için ağ yapısı.....	91
Şekil 3.84. Kaynak tarafındaki sıcaklığın deneysel ve sayısal karşılaştırılması .	92
Şekil 3.85. Kuyu tarafındaki sıcaklığın deneysel ve sayısal karşılaştırılması	92
Şekil 3.86. Modülde üretilen gerilimin deneysel ve sayısal karşılaştırması	92
Şekil 3.87. Modülde üretilen akımın deneysel ve sayısal karşılaştırması.....	93
Şekil 3.88. Modülde üretilen gücüm deneysel ve sayısal karşılaştırması.	93
Şekil 3.89. 5 m/s soğuk hava hızı için tasarlanan sistemin sıcaklık dağılımı	93
Şekil 3.90. 3 m/s soğuk hava hızı için tasarlanan sistemin sıcaklık dağılımı	94

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Deneyde kullanılan termoelektrik modüller için üretici firma tarafından verilen katalog değerleri	28
Tablo 2.2. Termoelektrik enerji sistemlerinde ısı geçişi laboratuvarında yapılan deney sonuçları	27
Tablo 3.1. "Fluent" analizi için ağ özellikleri ve sonuçların düğüm sayısına göre karşılaştırması	34
Tablo 3.2. Malzemenin termo-fiziksel özellikleri.....	35
Tablo 3.3. Yakınsama kriterleri	35
Tablo 3.4. "Thermal-Electric" analizi için ağ özellikleri ve sonuçların düğüm sayısına göre karşılaştırması	36
Tablo 3.5. Bilgisayar özellikleri.....	36
Tablo 3.6. Termoeleman malzeme özellikleri.....	39
Tablo 3.7. Prizma ayaklı termoelektrik ayak çiftlerinin ölçüleri	39
Tablo 3.8. Trapez ayaklı termoelektrik ayak çiftlerinin ölçüleri	43
Tablo 3.9. Deneysel ve sayısal çalışmamızda kullandığımız modül (SP1848-27145SA) ölçüleri	47
Tablo 3.10. Prototip termoelektrik jeneratör sistemi için sonlu elemanlar analiz sonuçları	91

ÖZET

Anahtar kelimeler: Seebeck etki, Termoelektrik jeneratör, Isı geri kazanımı, Sayısal yöntem, Sonlu elemanlar yöntemi, Deneysel yöntem

Günümüzde fosil yakıtların tüketimi ve kullanım maliyeti artmıştır. Otomobillerdeki ısı verimi artırmak ve fosil yakıtlara olan ihtiyacı azaltmak amacı ile yeni teknolojiler geliştirilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojilerden bir tanesi olan termoelektrik jeneratörler (TEG), Seebeck etkisiyle çalışan ve ısı enerjisi elektrik enerjisine çevirerek güç üreten sistemlerdir. Termoelektrik malzemeler gün geçtikçe gelişmekte olup, malzemelerin performansları Z.T katsayısı (Figure of Merit) ile tanımlanmaktadır. Z.T değeri günümüzde yaklaşık olarak "1" olup, Ar-Ge çalışmalarıyla performansı yüksek malzemeler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda termoelektrik jeneratör performanslarının ilerleyen yıllarda daha da artacağını ve termoelektrik enerji sistemlerinin daha geniş kullanım alanına sahip olacağını göstermektedir.

Sunulan çalışmada, termoleman ayak geometrilerinin termoelektrik jeneratör üzerinde güç üretimin etkisi ANSYS sonlu elemanlar yazılım programı ile sayısal olarak tahmin edilmiştir. Gücü ve verimi yüksek, kolay imal edilebilir termoelektrik ısı geri kazanım sistemleri tasarlanmıştır. Yapılan ön tasarımların performansı, ANSYS sonlu elemanlar yazılım programıyla sayısal yöntemle belirlenerek prototip imalata en uygun jeneratör tasarlanmıştır. Tasarlanan jeneratörün prototipi imal edilmiş ve performans deneyleri yapılmıştır. Bir termoelektrik modül için sayısal yöntemle tahmin edilen en yüksek akım, güç ve verim sırasıyla, 201 mA, 0,136 W ve % 0,94 değerindedir. Egzoz sistemine uygun prototipi de geliştirilen jeneratör için sayısal yöntemle tahmin edilen en yüksek akım, güç ve verim de sırasıyla, 184 mA, 0,095 W ve % 0,74 değerindedir. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında hata yaklaşık olarak ısı % 5, üretilen gerilimde % 16 ve üretilen akımda ise % 25 olmaktadır.

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMOELECTRIC GENERATOR SUITABLE FOR EXHAUST SYSTEM FOR MOTOR VEHICLES

SUMMARY

Keywords: Seebeck effect, Thermoelectric generator, Heat recovery, Numerical method, Finite element method, Experimental method.

Nowadays consumption and usage cost of fossil fuels have increased. New technologies are being developed and used to increase the thermal efficiency in cars and reduce the need for fossil fuels. Thermoelectric generators (TEG) as one of these technologies, are systems that operating with Seebeck effect. They convert the thermal energy to electrical energy. Thermoelectric materials are being developed day by day and the performance of these materials is defined as Z.T. coefficient. The Z.T value is approximately "1" in these days and it is being increased by the studies. This situation shows that, performance of the thermoelectric generators will increase and thermoelectric systems will have broader usage area.

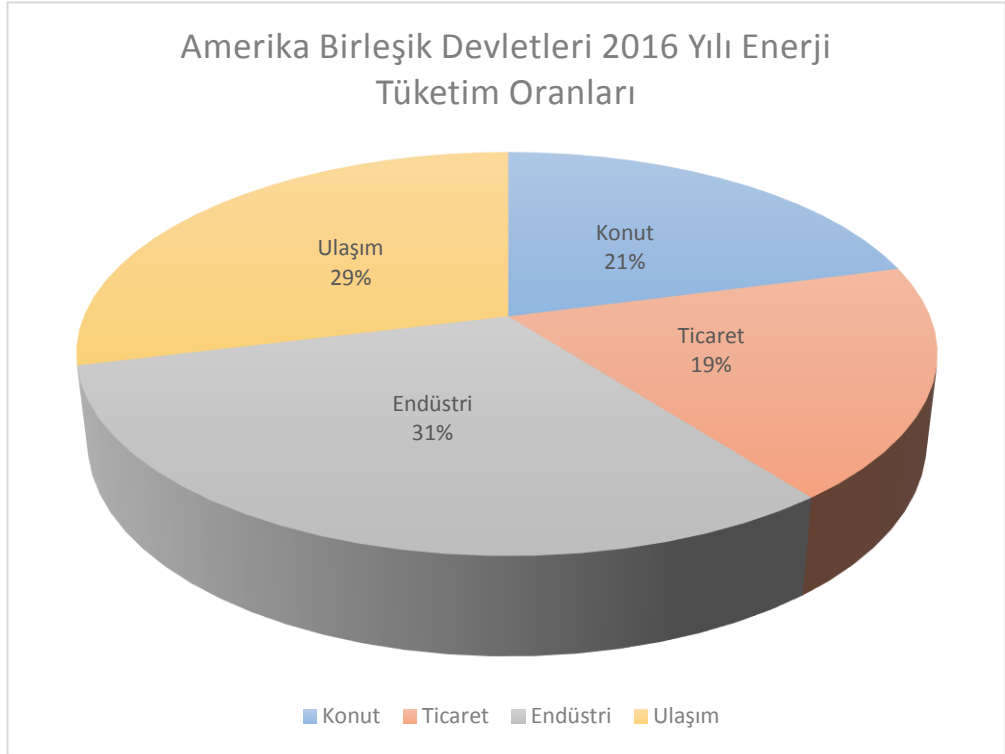
In this study, the effect of power generation on thermoelectric generator of the thermoelectric leg geometries has been estimated numerically by ANSYS finite element software. Various thermoelectric heat recovery systems has been designed considering high power, efficiency and producibility aims. The numerically predicted maximum current, power and efficiency values for a thermoelectric module were 201 mA, 0,136 W and % 0,94, respectively. At the design with prototype, numerically predicted maximum current, power and efficiency values were 184 mA, 0,095 W and % 0,74, respectively. Between experimental and numerically studies, as thermal % 5, as produced voltage % 16 and as produced current % 20 fault occurred.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Enerji Tüketiminin Günümüzdeki Durumu

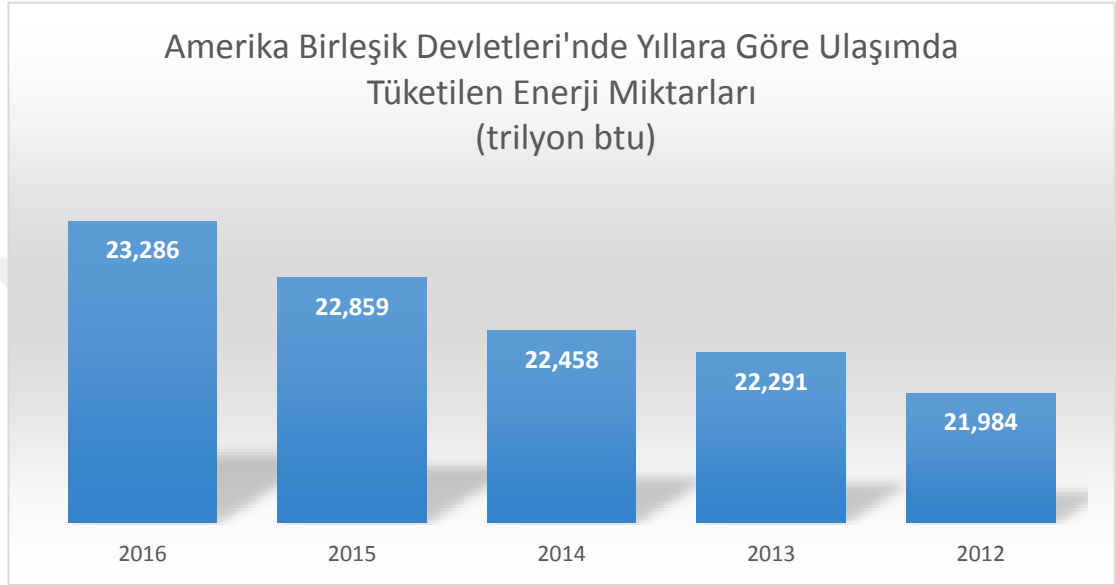
Enerji üretimi, verimliliği ve tüketimi, günümüzde ekonomik ve endüstriyel faaliyetleri etkileyen en önemli konulardandır. Günümüzde fosil yakıtlar enerji ihtiyacının karşılanmasında yoğun olarak kullanıldığından hem hava kirliliği artmakta hem de küresel ısınmaya sebep olmaktadır [1].

Enerji sanayide, konutlarda, çeşitli işletmelerde ve ulaşımda olmak üzere dört ana sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin; 2016 yılında ABD’de toplam 23445 MW enerji tüketimi yapılmıştır [2].



Şekil 1.1. ABD’de 2016 yılı enerji tüketimi [3]

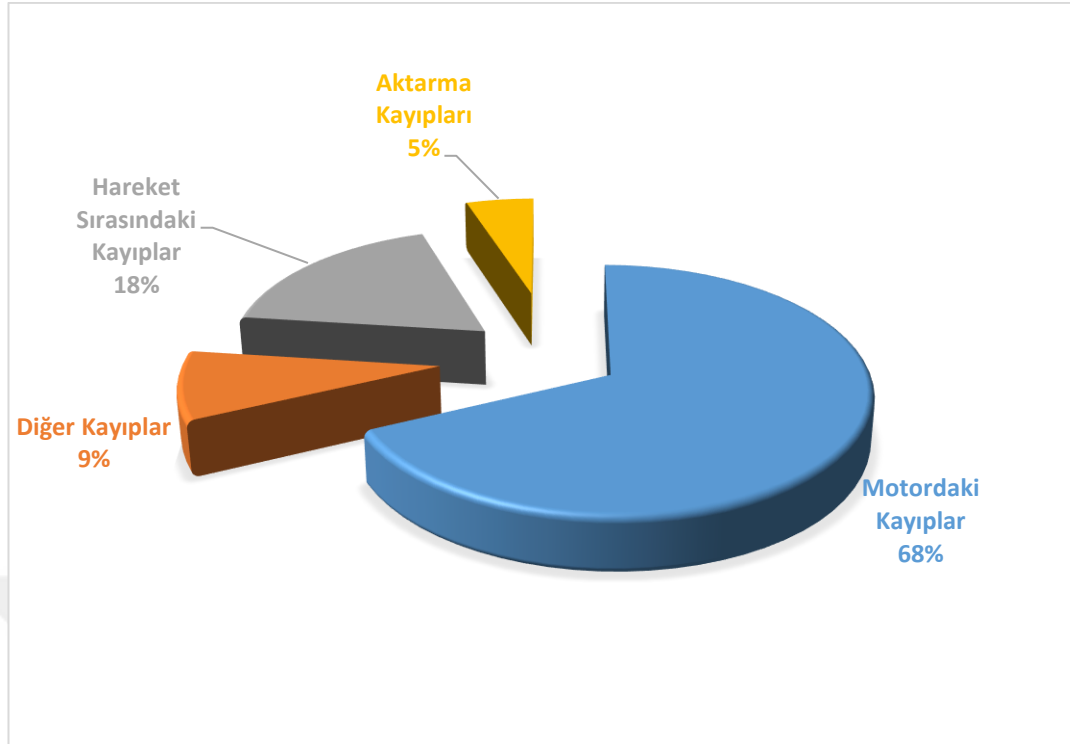
Şekil 1.1. ve Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi tüketilen toplam enerjinin % 29'una karşılık gelen 6740 MW kadar enerji tüketimi, ulaşım sektöründe olmaktadır. Enerji tüketiminde sanayiden sonra en büyük paya sahip olan ulaşımda enerji tüketimi son dört yıl boyunca artmıştır.



Şekil 1.2. ABD'de yıllara göre ulaşımda tüketilen enerji miktarları

Son yıllarda artan enerji tüketimi ile birlikte fosil yakıtlara olan ihtiyaç ve çevre kirliliği artmış, bundan dolayı enerji tüketimini azaltacak ve verimliliği artıracak teknolojilerin geliştirilmesine ağırlık verilmiştir.

Günümüzde otomobillerin ısı verimi yaklaşık % 30 civarındadır. Bu da yakıttan kazanabileceğimiz enerjinin % 70'lik kısmının kaybedildiğini göstermektedir. Bu kaybedilen enerjinin yaklaşık % 68'lik kısmının motorun çalışması sırasında oluşan ısı, sürtünme, pompa ve yanma kayıpları oluşturmaktadır. Geri kalan yaklaşık % 32'sini ise aktarma, hareket ve diğer kayıplar olarak oluşturmaktadır. Radyatör ve egzoz'da meydana gelen ısı kayıpları toplamda olan kayıpların yaklaşık % 58'lik kısmına karşılık gelmektedir. Taşıtlardaki ısı enerji kayıplarının dağılımı Şekil 1.3.'te gösterilmektedir [2].



Şekil 1.3. Bir otomobildeki enerji kayıpları

Radyatör ve egzoz'daki % 58'lik kayıp kısmının % 69'unu (toplam kaybın % 40'ı) ise egzoz gazından atılan atık ısı oluşturmaktadır [3]. Bu enerjinin bir kısmı geri kazanılarak araçların motor yükünün azaltılabileceği öngörülmüştür. Önerilen tez çalışmasında egzoz gazındaki atık ısının geri kazanımı için çevre dostu, temiz enerji uygulaması olan termoelektrik ısı geri kazanımı sistemi tasarlanmıştır.

1.2. Termoelektrik Etkiler

Termoelektrik etkiler ile gerçekleşen enerji dönüşümleri, ilk olarak yaklaşık 150 yıl önce olarak keşfedilmiştir. Hala kullanılmakta ve geliştirilmekte olan bu teknoloji ile güç üretimi ve soğutma gerçekleştirilebilmektedir. Termoelektrik etkiler Seebeck, Peltier ve Thomson Etkileri olarak üçe ayrılmaktadırlar [4].

Termoelektrik etkiler kullanılarak güç üretimi ve soğutma, içinde p ve n tipi termoelektrik yarı iletken malzemeler ile oluşturulan termoelektrik ayak çiftleri

bulunan modüller tarafından gerçekleştirilir. Bu modüller termoelektrik jeneratör (TEG) ve termoelektrik soğutucu (TEC) olarak sınıflandırılmaktadırlar. Termoelektrik modüller, istenilen miktarda soğutma veya güç üretimi yapabilmek için çeşitli sayılarda ihtiyaca göre paralel veya seri bağlanmaktadır.

Termoelektrik modüllerin avantajları;

- Termoelektrik modüllerde enerji dönüşümleri katı haldeki sabit malzemeler ile gerçekleşir. Modülde herhangi bir akışkan veya hareketli parça yoktur.
- Sessiz çalışırlar, uzun ömre sahiptirler.
- Çevre dostudurlar olup bakım gerektirmezler [5].
- Çeşitli boyutlarda üretilebilirler bu sayede çok küçük boyutta üretilip mikro düzeyde veya büyük tasarlanıp kilowatt mertebesinde güç üretebilirler.
- Termoelektrik etkiler ile çalışan modüller, yakıtla çalışan ve ısı enerjisi önce mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine çeviren motorların aksine enerji dönüşümünü direkt olarak gerçekleştirirler.

Termoelektrik modüllerin dezavantajları;

- Diğer güç üretim ünitelerine göre daha yüksek fiyatlara sahiptirler [6].

Dezavantajlarına rağmen termoelektrik modüller günümüzde sürekli geliştirilmekte ve performansları artırılmaktadır. Kullanımları, gelişmelerle birlikte gün geçtikçe artmaktadır.

1.2.1 Seebeck etkisi ve termoelektrik jeneratör

Termoelektrik jeneratörler yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile elektrik üreten ekipmanlardır. Bu elektrik üretimi teknolojisi Thomas Johann Seebeck tarafından 1821 yılında bulunmuştur. Seebeck, birbirine seri bağlı iki farklı yarı iletken malzemenin üzerinde sıcaklık farkı olduğunda, elektrik enerjisi elde edildiğini gözlemlemiştir. Keşfinden ötürü bu olaya Seebeck etkisi denilmiştir.

Termoelektrik jeneratör, Şekil 1.4.'te gösterildiği üzere p ve n tipi termoelektrik ayaklar ile elektriksel iletken ve yalıtkan malzemeler'den oluşur. P ve n tipi ayaklar iletken malzeme ile birbirlerine seri bağlanır. Elektriksel yalıtkan malzemeler sıcak ve soğuk yüzeylere yerleştirilir. Isının sıcak yüzeyden soğuk yüzeye geçmesi ile yarı iletkenler üzerindeki serbest yükler hareket eder ve bu hareket sonucu ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür [8].

Seebeck etkisi ile çalışan termoelektrik jeneratörlerde üretilen voltaj V , aşağıdaki şekilde (Denklem 1.1) ifade edilebilir;

$$V = S\Delta T \quad (1.1)$$

Eşitlikte;

V = Üretilen voltaj (V),

S = Kullanılan p ve n ayaklar için Seebeck katsayısı (V/K),

ΔT = Sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki ısı farkı olmak üzere (K)'dir.

Termoelektrik jeneratörlerde günümüzde p ve n tipi ayaklarda yarı iletken malzeme olarak Bizmut Tellür (Bi_2Te_3) ticarileşmiş ve piyasada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ticarileşmiş Bizmut Tellür malzenin Seebeck katsayısı yaklaşık olarak 150×10^{-6} (V/K) civarındadır [8].

Jeneratörün performansı, Z.T boyutsuz termoelektrik malzeme performans katsayısı FoM (Figure of Merit) aşağıdaki şekilde (Denklem 1.2) gösterilebilir.

$$Z.T = \frac{S^2 \sigma T}{k} \quad (1.2)$$

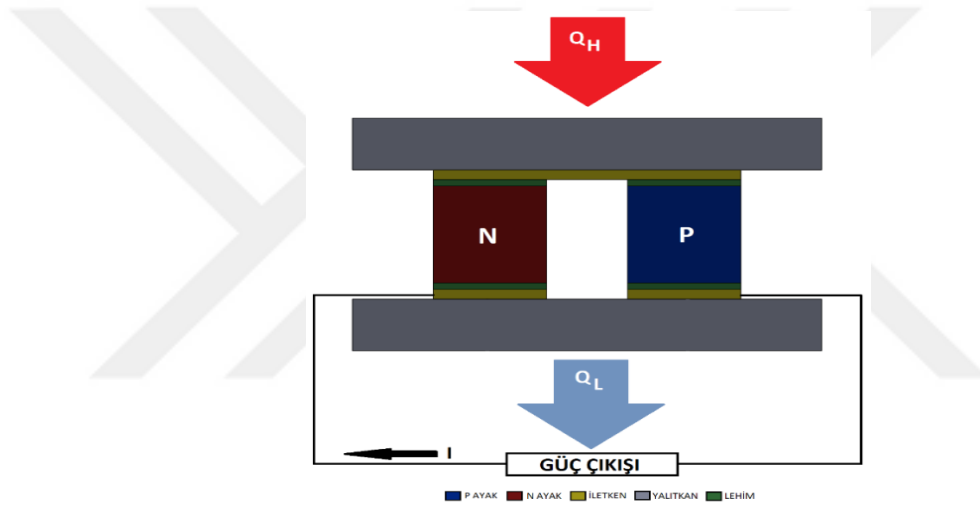
Eşitlikte;

S = Termoelektrik malzemenin Seebeck katsayısı [V/K],

σ = Termoelektrik malzemenin elektrik iletkenliği [$1/\Omega.m$],

T = Termoelektrik ayakların veya eklemnin ortalama mutlak sıcaklığı [K],
 K = Termoelektrik malzemenin ısı iletim katsayısıdır [W/mK].

Günümüzde piyasa bulunabilen termoelektrik malzemeler için Z.T sayısı 1 civarında ve altındadır. Genel olarak mevcut malzemelerde Z.T sayısı 0,5 ile 0,8 arasında olmakla birlikte Z.T sayısı 1 olan malzemelerde mevcuttur. İlerleyen zamanlarda piyasadaki mevcut malzemelerde ortalama Z.T sayısının 1 olması beklenmektedir. Laboratuvar çalışmaları göstermektedir ki Z.T sayısı 2 civarı olan materyaller ile oluşturulan termoelektrik modüllerde verim %10'un üzerine çıkmaktadır [6].

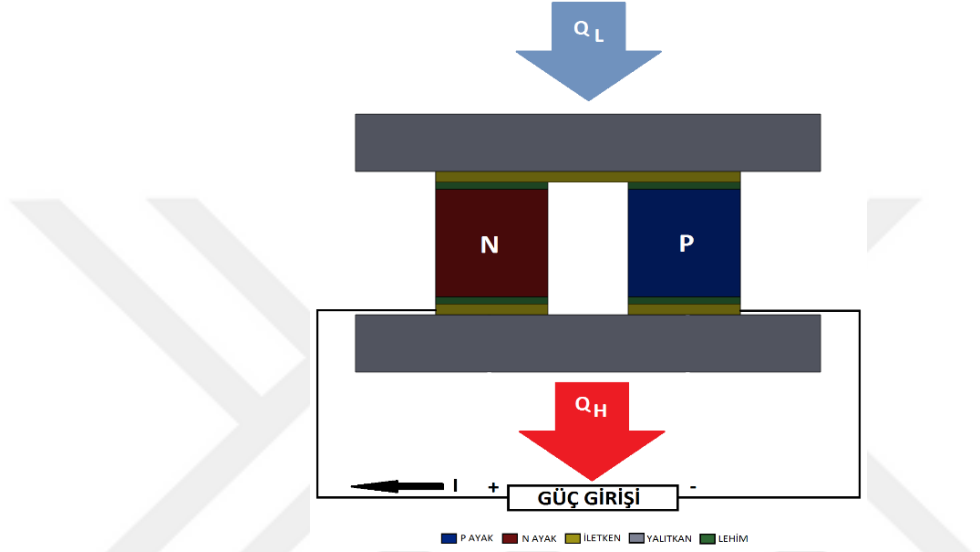


Şekil 1.4. Bir termoelektrik ayak çiftinde elektrik üretimi

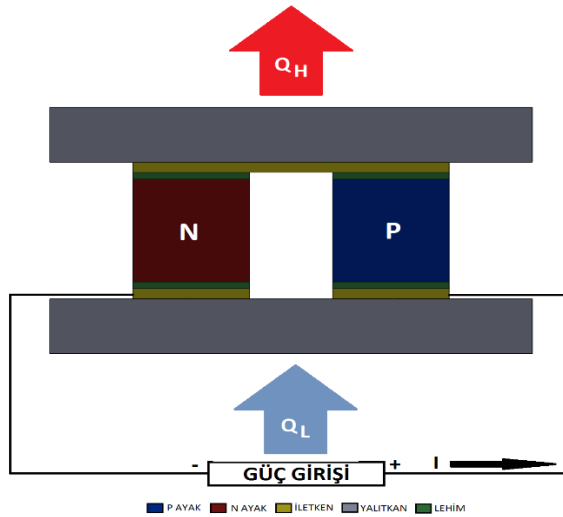
1.2.2. Peltier etkisi ve termoelektrik soğutucu

1834 yılında Jean Charles Athanase Peltier tarafından elektrik akımının yarı iletken malzemeler üzerinden geçirildiğinde, akımın aktığı doğrultuda ısı geçişi olduğu gözlemlenmiştir. Peltier etkisi olarakta adlandırılabilen termoelektrik soğutma çevrimi, bir elektrik akımının iki farklı yarı iletken malzeme üzerinden geçmesi ve sıcaklık farkı yaratması ile gerçekleşen bir teknolojidir [9]. Bir termoelektrik soğutucu içinde bulunan parçalar termoelektrik jeneratörlerle aynıdır. Termoelektrik jeneratörlerin tersine burada devreye akım verilerek işlem gerçekleştirilir. Şekil 1.5.'te gösterildiği üzere p ve n termoelektrik ayak çiftine verilen akım n tipi ayaktan p tipi

ayağa doğru aktığı takdirde sistem tarafından soğuk yüzeyinden enerji emilir ve sıcak yüzey tarafından etrafa salınır. Akımın p tipi ayaktan n tipi ayağa doğru aktığı tersi durumda ise Şekil 1.6.'da gösterildiği üzere ısı geçişi yönü değişir. Termoelektrik modüller ısı pompaları ile benzer çevrimde çalıştıkları için, sıcak ve soğuk yüzeyler tam tersine yer değiştirir. Isıtma amaçlı da kullanılabilir.



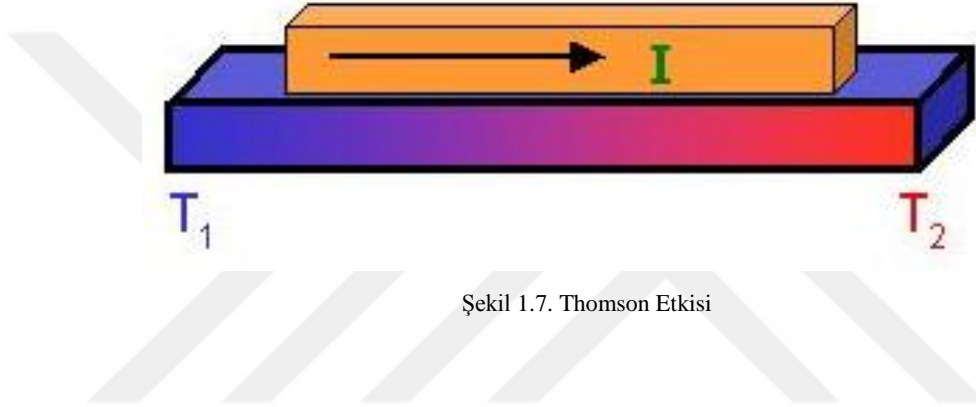
Şekil 1.5. Peltier etkisi altındaki bir termoelektrik ayak çiftinde ısıtma olayı



Şekil 1.6. Peltier etkisi altındaki bir termoelektrik ayak çiftinde soğutma olayı

1.2.3. Thomson etkisi

William Thomson tarafından keşfedilen thomson etkisi Şekil 1.7.'de gösterildiği üzere bir iletken malzemenin iki ucu farklı sıcaklıklarda bulunduğu anda akımın yönüne bağlı olarak enerjinin iletken üstünde biriktirilmesi veya soğutulması olayıdır [10]. Bu işlem sonucunda Thomson Isısı açığa çıkmaktadır. Pratikte seebeck ve peltier etkileri ile kendini gösterir.



Thomson Isısı Q_T (W), aşağıdaki şekilde (Denklem 1.3) ifade edilebilir;

$$Q_T = \tau \cdot \Delta T \cdot I \quad (1.3)$$

Bu formülde,

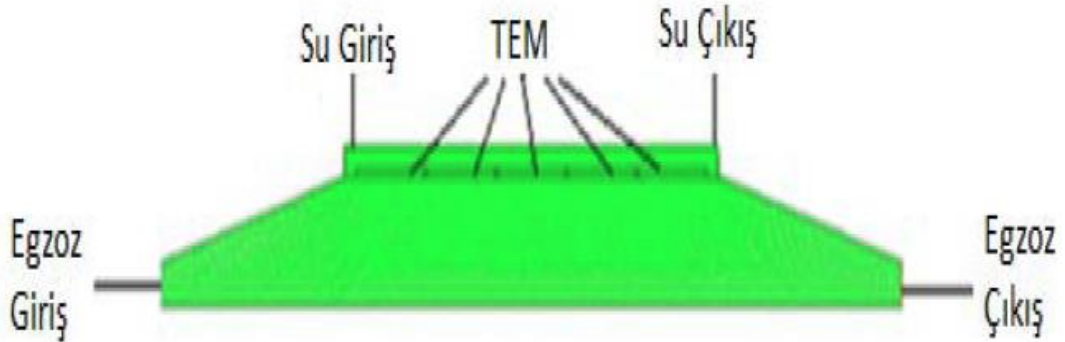
τ = Thomson katsayısı [V/K],

ΔT = İletkeninin iki ucu arasındaki sıcaklık farkı [K],

I = İletken üzerinden geçen akım şiddetidir [A].

1.3. Egzoz Gazından Elektrik Üretimi Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Temizer ve İlkılıç termoelektrik jeneratörlerin dizel motorların egzoz sisteminde kullanılması ile ilgili çalışma yapmıştır. Bu çalışmada tasarlanan ısı değiştirici Şekil 1.8.'de gösterildiği üzere ekipman egzoz susturucusundan önce yerleştirilmiştir. Soğutma için aracın üzerinde önceden mevcut olan radyatör ekipmanı ve suyu kullanılmıştır. Sistemde 40 adet termoelektrik jeneratör kullanılmıştır. Motorun çalıştığı çeşitli devir aralıklarında ısı değiştiricideki sıcaklık farkları incelenmiş ve bu sıcaklık farkları sonucunda sistemin ürettiği maksimum akım ve voltaj motorun 100 nm yük ve 3500 devir/dakika çalışması sırasında olduğu belirlenmiştir. Sistemin ürettiği maksimum güç 156,7 W olarak ölçülmüştür [11].

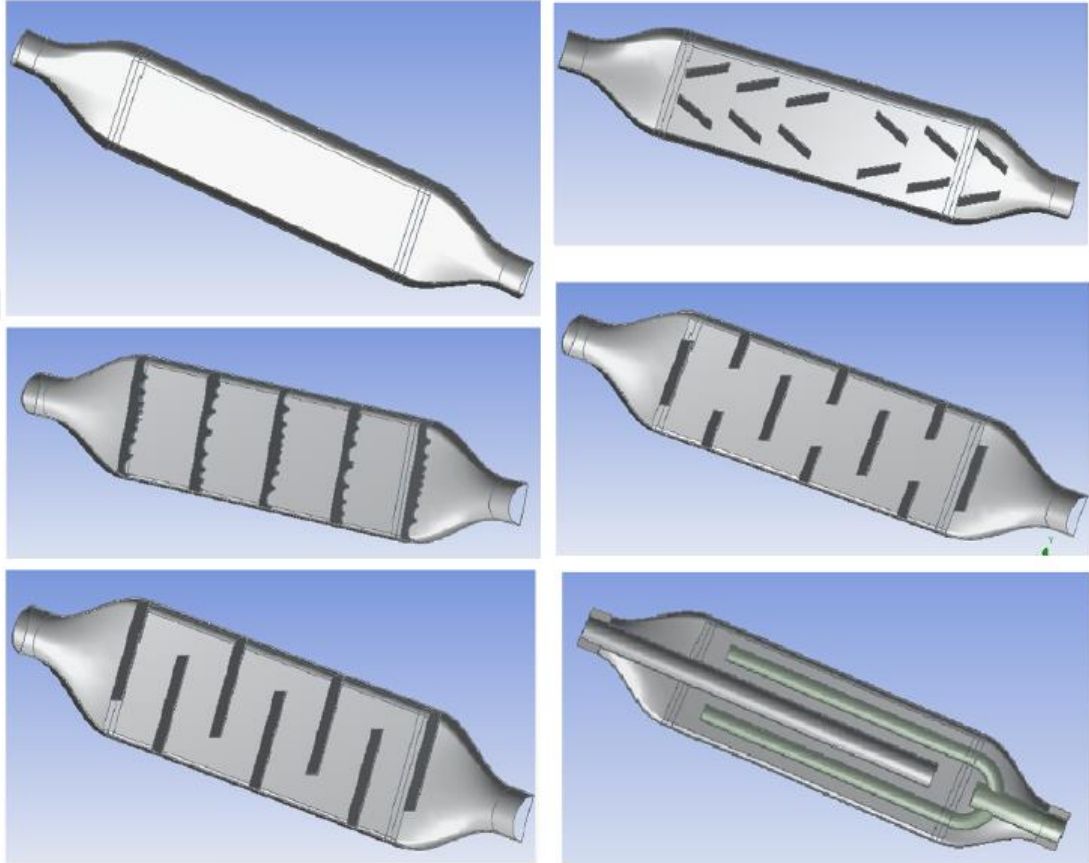


Şekil 1.8. Termoelektrik jeneratör için ısı değiştirici modeli [1]

Chen ve Chen yön bazlı kullanılan ısı alıcıların optimize edilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada levla kanatlı ısı alıcılar ele alınmıştır. Havanın plakaların arasından aktığı ve ısı alıcı üzerine direkt olarak çarptırıldığı iki soğutma türü üzerine simülasyonlar yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda kanatların uzun tutulması halinde, levhalar arasından akışlı sistemin diğerine göre daha performanslı olduğu gözlemlenmiştir [12].

Bai, Lu, Wu, Yin, Shi ve Chen termoelektrik jeneratör ile kullanılmak üzere egzoz gazının geçtiği kısım boş ve engelsiz olan, egzoz gazının çeşitli geometride ve açıda yerleştiren plakalar ve aynalarla saptırıldığı ve yine aynı kısımda borular ile saptırma

yapılan Şekil 1.9.'da gösterildiği üzere 6 farklı ısı değiştirici modelinin, simülasyonlarını yaparak karşılaştırmıştır. Simülasyonlar sonunda egzoz gazının akışına dik olarak yerleştirilmiş 7 tane seri dizilmiş aynalı tasarım 1737 W ile en yüksek ısı geçişi değerine ulaşmıştır [13].

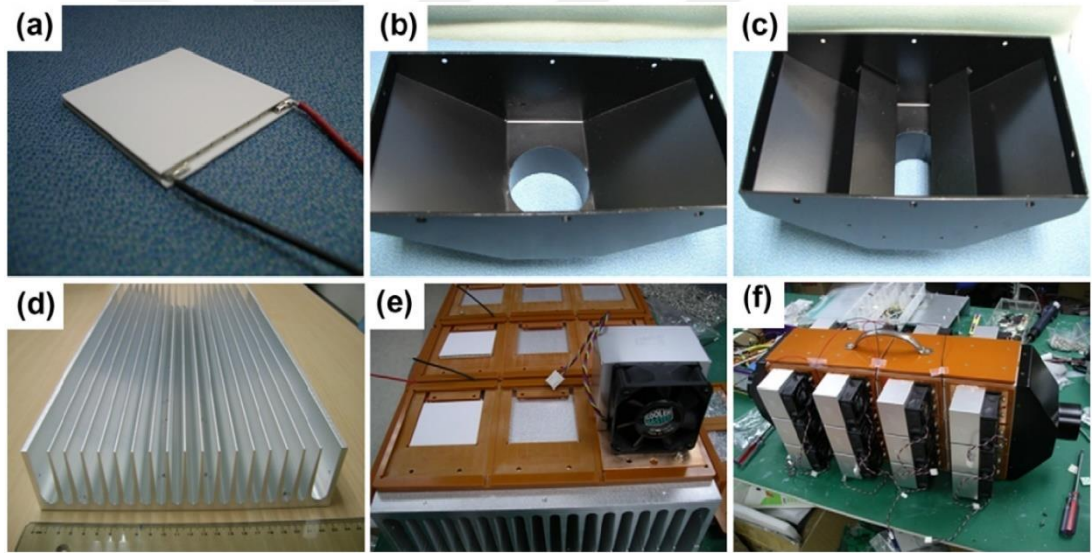


Şekil 1.9. Egzoz'daki atık ısıdan enerji üretimi için geliştirilmiş ısı değiştiriciler [3]

Remeli, Date, Orr, Ding, Singh, Affandi ve Aakbarzadeh termoelektrik jeneratörleri bakır plakaların arasına yerleştirmişlerdir. Bu 20 mm'lik bakır plakalar ısı boruları ile birleştirilmiştir. Isı boruları sıcak ve soğuk gaz akışların bulunduğu kısımlarda akış yönüne dik olarak yerleştirilmiştir. Isı borularının akışla temas eden kısımlarına ısı geçişini artırmak amacı ile 62 adet kanat eklenmiştir. Burada özellikle soğuk akışkanın geçtiği kısımda ısı geçişinin artırılması amacının yanında akışkanın başka bir işlemde kullanılmak üzere ısıtılmasında amaçlanmıştır. Bu düzenekten 8 adet kullanılmış ve her düzenekte 6 termoelektrik jeneratör modülüne yer verilmiştir. Sıcak gaz tarafını ısıtan ısıtıcı 20 W-120 W güç arasında çalıştırılmış ve en düşük değerler 20 W sıcaklığında

çalıştırılırken termoelektrik jeneratörün iki yüzü arasında $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkında $0,15\text{ A}$ ve $0,38\text{ V}$, en yüksek değerler 120 W sıcaklığında çalıştırılırken termoelektrik jeneratörün iki yüzü arasında $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkında $0,85\text{ A}$ ve $2,02\text{ V}$ olarak ölçülmüştür. Maksimum üretilen elektrik gücü 7 W olarak hesaplanmış ve yapılan teorik hesaplamadan % 16 daha az olduğu belirtilmiştir [14].

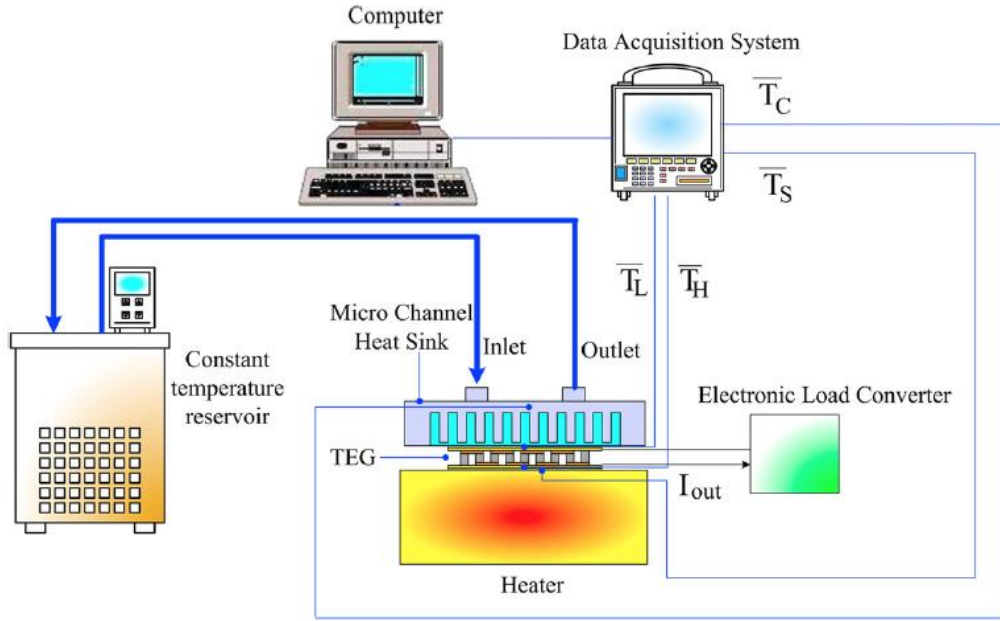
Hsu, Huang, Chu, Yu ve Yao termoelektrik jeneratörler ile düşük sıcaklıktaki atık ısıdan elektrik enerjisi üretimi üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada 24 adet termoelektrik modül kullanılmış, sıcak gazın geçtiği kanala Şekil 1.10.'da gösterildiği üzere termoelektrik jeneratör modülünün sıcak yüzeyine olan ısı geçişini artırabilmek amacı ile alüminyum ısı alıcı yerleştirilmiştir. Sıcaklık farkı 30 K iken $0,64\text{ A}$ ile $12,41\text{ W}$ güç üretilmiştir [15].



Şekil 1.10. Isı alıcı ve fan kullanılarak oluşturulmuş bir ısı değiştirici modeli [5]

Hsiao, Chang ve Chen'in otomobil motorundaki atık ısıdan elektrik üretimi üzerine yaptıkları çalışmada test için oluşturdukları modelde Şekil 1.11.'de gösterildiği üzere termoelektrik jeneratörün sıcak tarafına sürekli ısı enerjisi sağlayabilmek için bir ısıtıcı kullanılmış, soğuk tarafına ise ısıyı uzaklaştırmak amacı ile mikro kanallı bir ısı alıcı yerleştirilmiştir. Aynı zamanda su soğutucu akışkan olarak kullanılarak soğutma amacı ile ısı alıcı ve düşük sıcaklıklı sirkülasyon banyosu arasında sirküle edilmiştir. İki değişik tipte termoelektrik modül incelenmiştir. Biri TGM-127 isimli $40\text{ mm} \times 40$

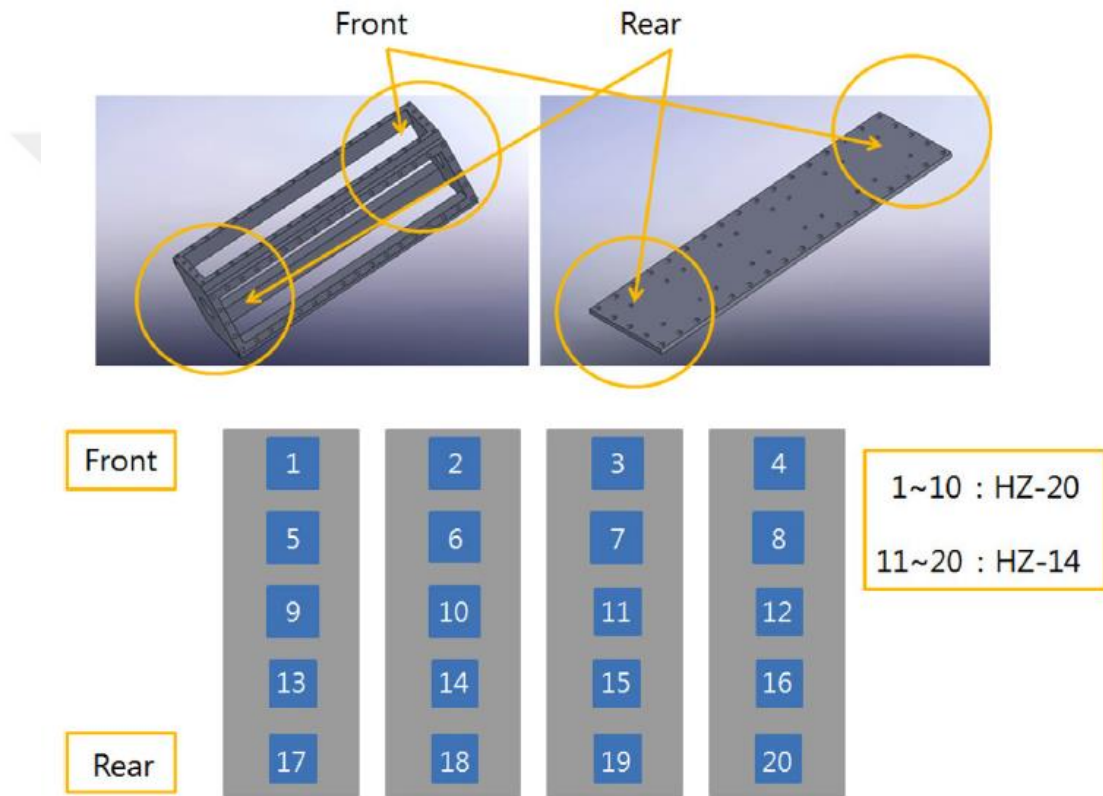
mm x 3,9 mm boyutlarında ve diğeri HZ-2 isimli ve 29 mm x29 mm x 5,08 mm boyutlarındadır. Elde edilen maksimum güç tgm-127 isimli TEG’de 120 °C sıcaklık farkında 0,12 W olarak ölçülmüş HZ-2 isimli modülde ise 0,43 W olarak ölçülmüştür [16].



Şekil 1.11. Bir termoelektrik jeneratör sisteminin analizi için akış diyagramı [6]

In, Kim, Son ve Lee çeşitli ısıl durumlar içerisinde bir dizel motordaki egzoz gazından termoelektrik jeneratör ile elektrik üretimi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada 10 adet HZ-20 ve 10 adet HZ-14 olmak üzere toplam 20 adet termoelektrik modül kullanılmıştır. Termoelektrik modüllerin boyutu 75 mm x 75 mm x 5 mm'dir. HZ-14 model modüllerin yüksek sıcaklıklara dayanımı daha az olmasından ötürü ısı değiştiricinin daha düşük sıcaklıklarda olan arka kesimlerine yerleştirilmişlerdir. Bu çalışmada Şekil 1.12.'de gösterildiği üzere sıcak egzoz gazının geçtiği tarafa ısı alıcı yerleştirilmiştir. Bu ısı alıcıların kanat kısımları kare sütunlu, egzoz gazı akış yönünde ve zıt yönde üçgen sütunlu olmak üzere üç şekilde tasarlanmıştır. Soğutma kısmında 12 litre/dk sabit akışlı sabit sıcaklıklı su banyosu kullanılmıştır. Egzoz gazının elde edileceği motor olarak 2,2 L dizel motor tercih edilmiştir. Isı değiştirici tasarımı egzoz borusunun çevresinde kare olarak yapılmış ve TEG'ler kare tasarımın her yüzünde 5'er tane olacak şekilde yerleştirilmiştir. TEG'lerin performanslı çalışabilmesi için sıcak

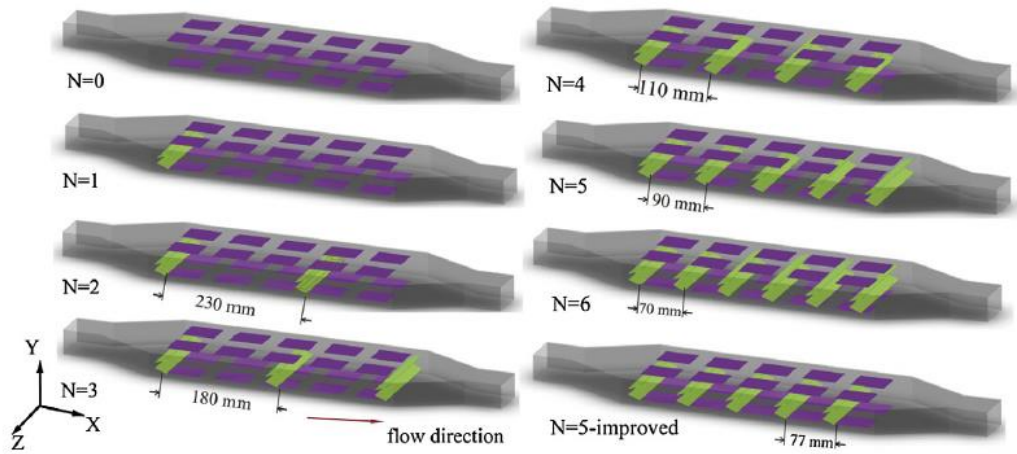
taraflarında 250 °C sıcaklık amaçlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en fazla güç üretimi dikdörtgen sütunlu ısı alıcı kullanıldığında görülmüştür. Hedeflenen ortalama sıcaklıklarda (Sıcak taraf için 250 °C soğuk taraf için 80 °C) ortalama 6,2 W ve 3,6 A değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. TEG’lerin sıcak taraflarındaki sıcaklık değeri dayanabilecekleri seviyeye kadar artırıldıkça performanslarının arttığı gözlemlenmiştir. Dayanma seviyesi geçildikten itibaren performansta düşüşler meydana gelmiştir [17].



Şekil 1.12. Termoelektrik jeneratör sistemi için tasarlanmış özel ısı değiştirici [7]

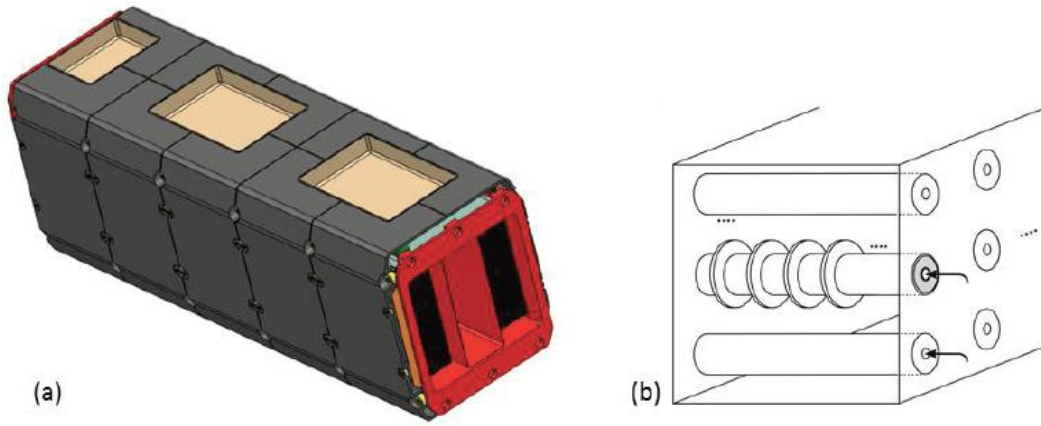
Niu, Diaoi, Yu, Jiao, Du, Shu'nun egzoz gazından termoelektrik modül yardımı ile elektrik üretimi üzerine yaptıkları çalışmada egzoz gazının içinden geçtiği ve modüllerin sıcak taraflarının temas ettiği kısım ile ilgili çeşitli tasarımlar oluşturmuş ve bunlarla ilgili simülasyonlar yaparak karşılaştırmışlardır. Çalışmada Şekil 1.13.'te gösterildiği üzere egzoz gazının giriş ve çıkışında 30 mm x 40 mm, 60 mm x 40 mm, 120 mm x 40 mm kesit alanları, egzoz gazının geçtiği kısımda 1-6 adet arası yönlendiriciler ve 10 - 400 derece arası yönlendirici açıları ile simülasyonlar yapılmış

ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Simulasyonlar sonucunda düşük kesitli giriş ve çıkış alanlarının TEG'lere daha iyi ısı geçişi sağladığı gözlemlenmiş fakat akış direncini arttırdığından ötürü ortalama alanın daha optimal çözüm olarak belirlenmiş 60 mm x 40 mm'lik giriş ve çıkış kesit alanı en optimal çözüm olarak tespit edilmiştir. Yönlendirici sayısının artırılması ısı iletim katsayısını arttırmasına rağmen en büyük etki egzoz gazının giriş kısmına koyulmasıyla gözlemlenmiş ve geri kalan yönlendiricilerin'ların etkisinin çok az olduğu gözlemlenmiştir. Yönlendirici açılarının büyümesinin sıcak gazdan faydalanmayı arttırdığı gözlemlenmiştir fakat basınç düşüşünü belirgin şekilde arttırmasından ötürü akış yönünde gittikçe açı büyüklüğü artacak şekilde değişken açılarda yönlendiriciler kullanılması önerilmiştir. Yapılan tasarım ile dikkate alınan 6 silindirik motorun yakıt tüketimi % 0,6 oranında düşürülmüştür [18].



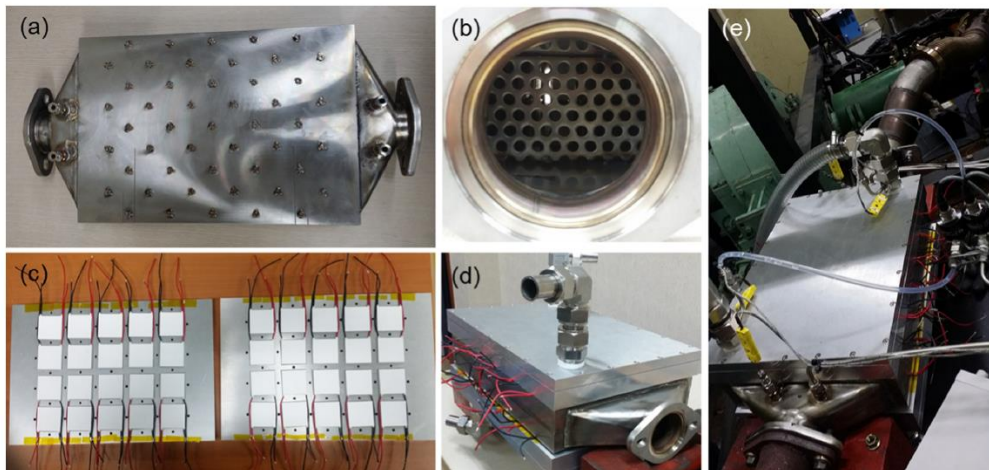
Şekil 1.13. Bir egzoz ısı değıştiricisinde saptırıcı kullanımı ve konumlandırılması [8]

Kühn, Koeppen, Schulze ve Jansch' yaptığı iki farklı geometrideki egzoz gaz sistemi üzerinde çalışan termoelektrik sistemin karşılaştırılması üzerine yaptıkları Şekil 1.14.'te gösterildiği üzere çalışmada geometrilerin birinde p ve n ayaklar yüzeylere paralel olarak yerleştirilmiş. Diğerinde ise bir yüzük formuna getirilerek egzoz gazının geçtiği kanalların dışına yerleştirilmiştir. Paralel formda 2470 adet yüzük formunda 3528 adet ayak kullanılmıştır. Yüzük şeklinde olan ayakların daha az kütle ile % 9 ile % 46 arasında daha yüksek elektriksel güç üretebildiği gözlemlenmiştir [19].



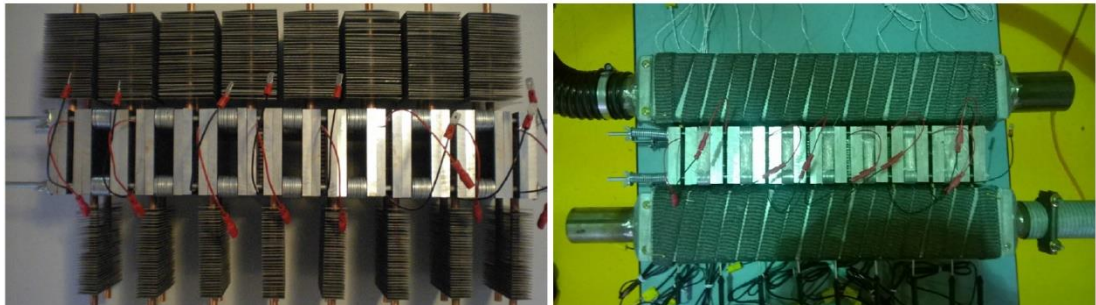
Şekil 1.14. Egzoz termoelektrik jeneratör sistemi için tasarlanmış ısı değıştirici [9]

Kim, Negash ve Cho nin yaptıkları çalışmada termoelektrik jeneratörlerin atık ısıdan elektrik üretimini deneysel olarak incelemişlerdir. Şekil 1.15.'te gösterildiği üzere jeneratörleri paslanmaz çelikten yapılmış 253,5 mm x 372 mm x 60 mm boyutlarındaki kanalın üst ve alt kısmına 4 x 5 şeklinde yerleştirilmiştir. Soğutma için kullanılan su ortam sıcaklığı olan 293 K sıcaklıktadır. Isı kaynağı olarak 6 silindirli dizel motor kullanılmış ve 1000, 1500, 2000 devir/dakika olarak 3 farklı devirde çalıştırılmıştır. Maksimum güç 304 K sıcaklık farkında 119 W ile 2000 devir/dakika'da elde edilmiştir [20].



Şekil 1.15. 40 adet termoelektrik modül kullanılmış bir egzoz ısı değıştiricisi [10]

Orr, Akbarzadeh ve Lappas'ın ısı boruları kullanarak termoelektrik jeneratörler ile egzoz atık ısısından geri dönüşümü üzerine yaptıkları çalışmada Şekil 1.16.'da gösterildiği üzere termoelektrik modülleri iki metal blok arasına yerleştirilmiş, bloklara ısı borularıyla ek yapılmış ve ısı borularının akışkan akışlarıyla temas eden kısımlarına kanatlar yerleştirilmiştir. Bloklar ve onlara bağlı ısı borusu sistemlerimdem biri sıcak akıştaki ısıyı, öbürü soğuk akışa ısı ısıyı taşımak amacıyla her bir modül için ayrı ayrı yerleştirilmiştir. Kanatların bulunduğu kısımlar sıcak ve soğuk akışın olduğu ayrı kanallara yerleştirilmiştir. Sıcak akışkan olarak egzoz gazı, soğuk akışkan olarak hava kullanılmıştır. Sıcak akış kısmını besleyecek araçta 3,0 L V6 motor bulunmaktadır.Yapılan deneylerde 8 adet 62 mm x 62 mm boyutlarında termoelektrik modüller kullanılmıştır. Deney ilk olarak motor 2500 devirde ve sıfır yük altında cihaz yatay iken gerçekleştirilmiştir. Bu şartlarda sıcak kanalda 218 °C ve soğuk kanalda 31 °C sıcaklıklar ile 15,17 W güç üretilmiştir. İkinci deneyde motor 4000 devirde ve sıfır yük altında iken, sıcak gaz 325 °C ve soğuk gaz çıkış sıcaklığı 54 °C durumunda 37,85 W güç üretilmiştir. Bu deneylerin yanısıra ısı değiştirici tasarımı farklı pozisyonlarda değerlendirilip yerçekiminin etkisi görülmek istenmiştir. Sıcak akış üstte soğuk akış altta, tamamen yatay olarak iki akış aynı seviyede ve sıcak akış altta soğuk akış üstte olarak deneyler yapılmıştır. Sıcak akışın üstte olduğu pozisyon yaklaşık 24 W ile en az gücün üretildiği durum, sıcak akışın altta olduğu pozisyon yaklaşık 38 W ile en çok gücün elde edildiği durum olarak belirlenmiştir. Yatay pozisyon ise 30 W yaklaşık olarak iki pozisyonun ortasında kalmıştır. Isı geçişi en yüksek sıcak akışın altta olduğu durumda 1541 W ile gözlemlenmiştir. Çalışma, yapılan tasarım araç üzerinde kullanıldığı taktirde potansiyel olarak yakıt tüketiminde % 1,57'lik düşüş olabileceğini göstermiştir [21].



Şekil 1.16. Isı borulu ve kanatlı bir egzoz ısı değiştiricisi [11]

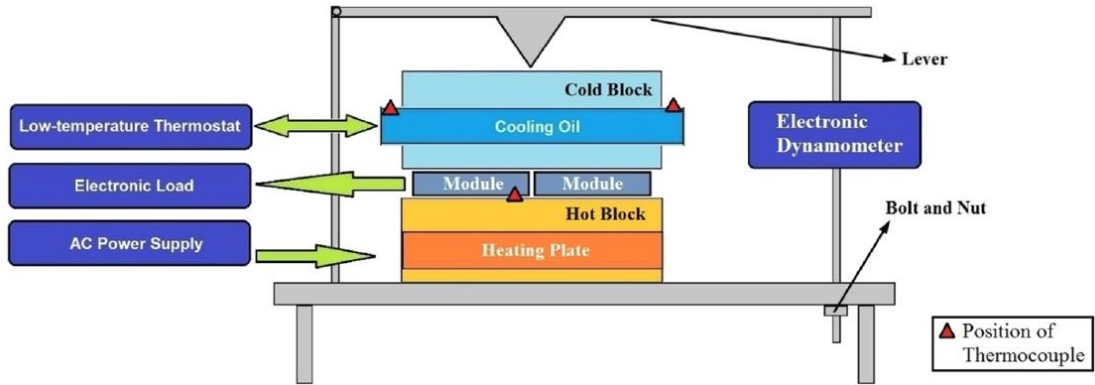
Elnaggar, Abdullah ve Mujeebu'nun kanatlı ısı borularının soğutma için kullanılmasını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir. U şeklindeki ısı borularının alüminyum kanatların içine dikey olarak yerleştirildiği çalışmada zorlanmış ve doğal taşınım şartlarında analizler yapılmıştır. 3d model SOLIDWORKS 2010 programında çizilmiş olup analizler ANSYS 10 programında yapılmıştır. Toplam 666.812 eleman ile analiz yapılmıştır. Isı borularında 1 mm kenarlı elemanlar kullanılırken kanatlarda daha kaba 1 cm kenarlı elemanlar kullanılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırılmış ve çok yakın sonuçlar çıkmıştır. Havanın hızının ve soğutulacak ekipmanın gücünün performansı etkilediği görülmüştür. Analizlerde ayrıca ısı borularının yerleşimi ve pozisyonunun performans konusunda önemli bir rol oynadığı, dikey pozisyonun yatay pozisyona göre ısı borusu performansını artırdığı görülmüştür [22].

Prabisha ve Ramesh'in ısı alıcılardaki çeşitli kanat profillerinin ısı performansını karşılaştırdıkları çalışmada dalgalı-levhalı kanatlı, konik kanatlı, silindirik formda sıralı yerleştirilmiş kanatlı ve silindirik formda açılı yerleştirilmiş kanatlı olmak üzere dört farklı kanat geometrisine sahip ısı alıcı karşılaştırılmıştır. Çalışmada yapılan analizler sonucu en iyi ısı performansını dalgalı-levhalı kanatlı ısı alıcısının gösterdiği görülmüştür [23].

El-nasr ve El-haggar'ın ısı borularındaki efektif ısı iletkenlik isimli çalışmasında 15 mm çapında ve 0,08 m uzunluğunda içinde çeşitli akışkanlar bulunan ve farklı fitil katman sayılarında ısı boruları ile deneyler yapılmıştır. Düz bakır boru, termosifon ve bir fitil katmanlı ısı borusunun karşılaştırılmasında ısı borularının düz bakır boruya göre 2,5 kata kadar daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Isı borusunun kondenser kısmından atılan ısı miktarı üzerinden metanol, aseton ve suyun performanslarının karşılaştırıldığı deneyde en düşük performansı metanol en yüksek performansı su göstermiştir. Çalışmada 313 K – 373 K sıcaklık arasında akışkanın ısı borusu performansını güçlü bir şekilde etkilediği görülmüştür. Fitil sayısının etkisi 0 - 18 fitil katman adeti ile karşılaştırılmış. 16 adet fitile kadar ısı geçişinde artış, daha yüksek adet kullanımlarında ise düşüş gözlemlenmiştir. Deneysel çalışma, ısı borularının sahip oldukları yüksek ısı iletim katsayıları ve kompakt boyutlarından ötürü ısı

geçişinde kullanılan geleneksel cihazlara göre daha başarılı olduğunu göstermiştir [24].

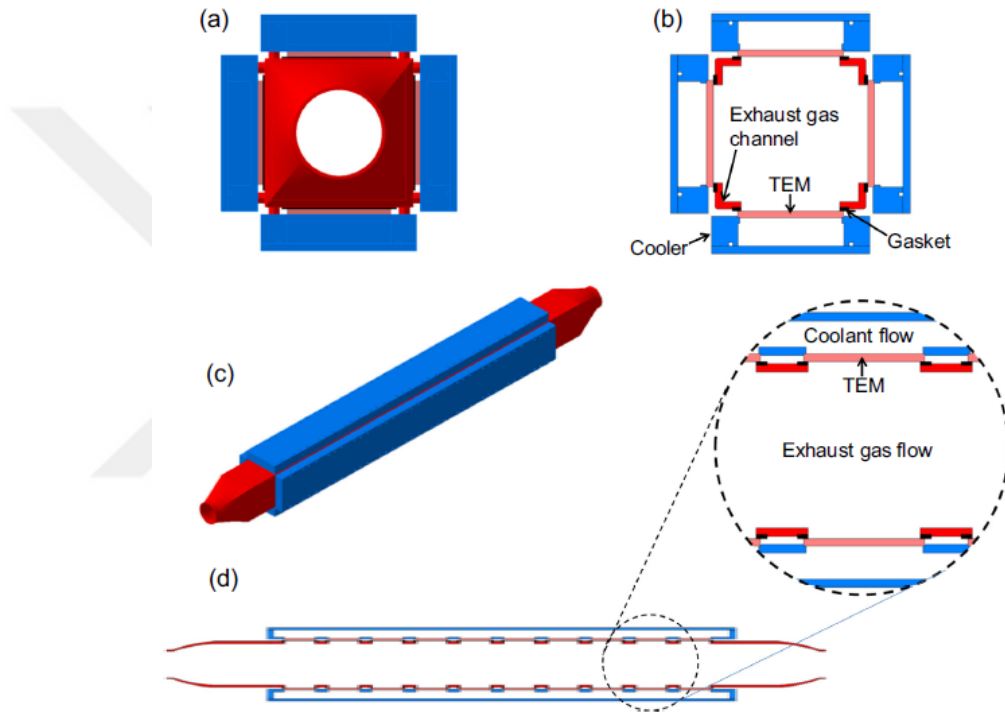
Deng, Zheng, Su, Yuan, Yu ve Wang 'ın otomobil egzoz'unda ısı geri kazanımında termoelektrik modüllerin bağlantısının topolojik olarak incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, 56 mm x 56 mm x 5,5 mm'lik 126 p-n çiftli bizmut-tellürid modüller kullanılmıştır. Modüller Şekil 1.17.'de gösterildiği üzere iki blok arasına yerleştirilmiş ve bu bloklardan biri ısıtıcı plaka ile ısıtılmış öbürü soğutma yağı ile soğutulmuştur. Bloklar bir düzenek ile birbiriyle çeşitli basınçlarda sıkıştırılmıştır. 0'dan 0,3348 MPa'ya kadar uygulanan basınçlarda, en fazla güç 2,36 W ile 0,2391 MPa ile elde edilmiş ve bu değerlerin üstündeki basınçlarda bir değişim olmamıştır. Ayrıca iki adet modülün birbiri ile bağlanma şekillerinin elde edilen güce etkisi incelenmiş, kablo direncinin seri ve paralel bağlantılarda güç kayıplarına sebep gözlemlenmiş, ihmal edilemez olduğu belirtilmiş ve özellikle paralel bağlantıda düşük voltaj yüksek akım değerlerinden ötürü büyük güç kayıpları olduğu gözlemlenmiştir [25].



Şekil 1.17. Modül üzerindeki basınç etkisi ölçümü için oluşturulmuş düzenek [15]

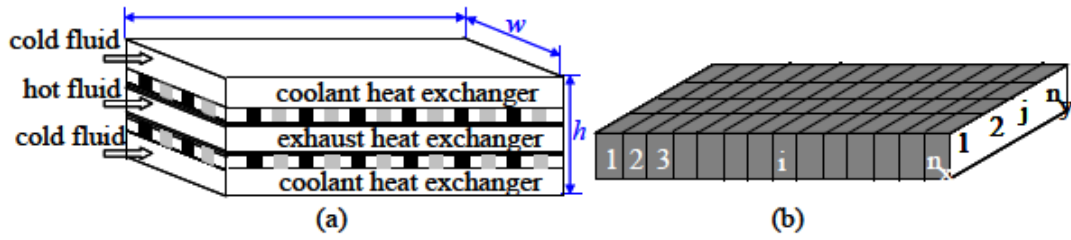
Kim, Negash ve Cho'nun direkt temaslı termoelektrik jeneratör'ün ısı geri kazanımı karakteristiğini deneysel ve sayısal incelediği çalışmada 40 adet 161 p ve n çiftine sahip olup Bi_2Te_3 malzemeden oluşan modül kullanılmıştır. Şekil 1.18.'de gösterildiği üzere kare profil şeklinde tasarlanan ısı değiştiricide modüller ekipmanın her yüzünde on adet olacak şekilde tek sıra halinde yerleştirilmiş, arada direnç oluşturabilecek hiçbir malzeme bulunmadan direkt olarak sıcak ve soğuk akışkanlara temas etmesi istenmiştir. 1700 - 2300 devir/dakika aralığında çalışan motorda egzoz gazı sıcaklığı

600 K - 680 K ve soğutucu akışkanın sıcaklığı 298-318 K arasında kabul edilmiştir. Soğutucu akışkan olarak % 50 - % 50 oranında etilen glikol-su karışımı kullanılmıştır. Bu parametreler de sistemin % 1 - 2 arası verimle yaklaşık 12 W - 45 W arası güç üretebildiği gözlemlenmiştir. Motor çalışma şartlarının yanısıra soğutucu akışkanın büyük bir rol oynadığı ve soğutucu akışkan sıcaklığındaki 20 K farklılığın verimliliği % 25 ile % 40 arası değiştirebildiği bununda çıkış gücünde % 33 ile % 43 arası farklılık yaratabildiği gözlemlenmiştir [26].



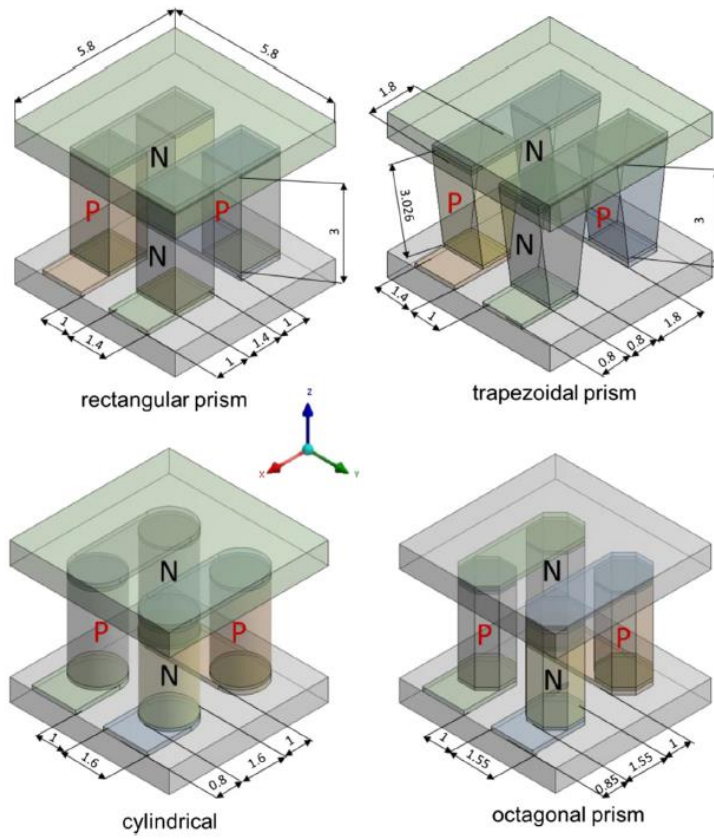
Şekil 1.18. Modüller ile akışkanların temasını sağlayan bir ısı değiştirici örneği [16]

Hei, Wang ve Yang'ın farklı egzoz gazı sıcaklıkları'nda termoelektrik sistemler için optimal boyutların analizlerini yaptıklarını çalışmada, termoelektrik modüller, Şekil 1.19.'da gösterildiği üzere sıcak egzoz gazının geçtiği kare profilli hava kanalı ile soğuk akışkanın geçtiği kare profilli kanalın arasına yerleştirilmiştir. Egzoz gazı sıcaklıkları 300 °C - 600 °C arasında varsayılmıştır. Optimal ölçülerin genişlik ve uzunluk için 0,58 m, yükseklik için 4 mm olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklıklar yükseldikçe optimal ısı değiştirici için uzunluklarının artması ve genişliklerinin azalması gerektiği gözlemlenmiştir [27].



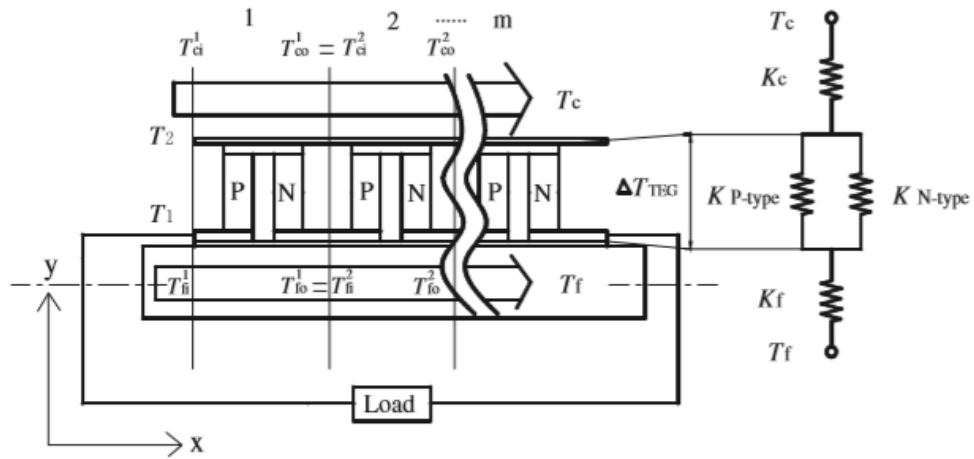
Şekil 1.19. Kare profilli bir egzoz ısı değiştiricisi [26]

Erturun, Erermis ve Mossi'nin değişik ayak geometrilerinin termoelektrik modüller üzerindeki termo-mekanik ve güç üretim performanslarını incelendiği çalışmada değişken olmayan durumda, genellikle modüllerin çalışmakta olduğu 20 - 120 °C ve 100 - 300 °C sıcaklık gradyenlerinde analizler yapılmıştır. Analizlerde ANSYS programı kullanılmıştır. Şekil 1.20.'de gsterildiği üzere 1.4 mm x 1.4 mm x 3.0 mm'lik ölçülerde tasarlanan bizmut tellürid ayaklar 1 mm'lik aralıklarla 2 çift olarak yerleştirilmiştir. Ayakların seebeck katsayıları 150 - 220 $\mu\text{V/K}$ arasında kabul edilmiştir. 20 - 120 °C sıcaklık gradyeninde 45 mV, 100 °C - 300 °C sıcaklık gradyeninde 108 mV voltaj hesaplanmıştır. Dikdörtgen, yuvarlak, altıgen ve trapez olmak üzere 4 farklı ayak geometrisinde 20 - 120 °C, kare ve silindir olarak 100 °C - 300 °C gradyeninde analizler yapılmıştır. 100 °C-300 °C gradyende yapılan analizlerde kullanılan ayaklar, bizmut tellürid ile kobalt antimon eşit miktarda sırayla birleştirilerek oluşturulmuştur. 20 - 120 °C sıcaklıklar arasında yapılan analizlerde bütün ayak türleri için üretilen akım 400 ma, absorbe edilen ısı 650 MW ve verim % 3,3 civarında olmuştur. 100 °C - 300 °C sıcaklık gradyeninde yapılan analizlerde sırasıyla dikdörtgen ve silindir ayaklar için üretilen akım 1300 Ma - 1400 Ma, absorbe edilen ısı 2300 W - 2350 W ve verim % 6,20 - 6,25 çıkmıştır. İki farklı gradyendede en çok üretilen akımı ve verimi silindir ayaklar'ın sağladığı gözlemlenmiştir. Ayaklar üzerinde yapılan stres testlerinde 20 °C - 120 °C sıcaklık gradyeninde maksimum stres, dikdörtgen ve silindir ayaklar için sırasıyla 49,9 MPa ve 43,3 MPa, 100 °C - 300 °C gradyeninde 94,2 MPa ve 85,7 MPa olarak gözlemlenmiştir. Yapılan testler sonucunda her ayak geometrisinin, belirgin bir şekilde termo-mekanik özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir [7].



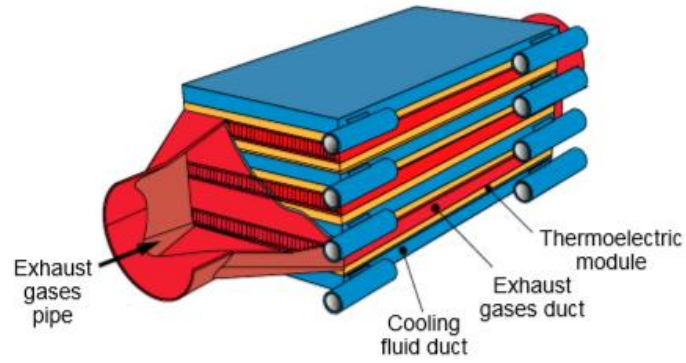
Şekil 1.20. Farklı geometrilere sahip termoelektrik ayak çiftleri [19]

Wang, Dai ve Wang'in araçlarda bulunan egzoz gazını ısı kaynağı olarak kullanan termoelektrik jeneratörlerin teorik analizinin yaptığı Şekil 1.21.'de gösterildiği üzere çalışmada sıcak ve soğuk akış kanalları arasına yerleştirilen modüller ile deneyler yapılmıştır. Soğutma havasının debisinin belli bir düzeyden sonra modül performansına olan etkisinin azaldığı (çalışma için 40 g/s), ve soğutma için gerekli güç tüketimi artacağından optimizasyon çalışması yapılması gerektiği belirtilmiştir. Sıcak taraftaki egzoz gazı debisinin artışının performansa olana etkisi yalnızca debi düşük miktarlarda iken kayda değer olduğu, debi miktarı yükseldikçe yükselme miktarının etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir. Soğutma kısmında faz değişim yolu ile soğutmanın, hava soğutmaya göre etkisinin modül performansı açısından oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir [28].



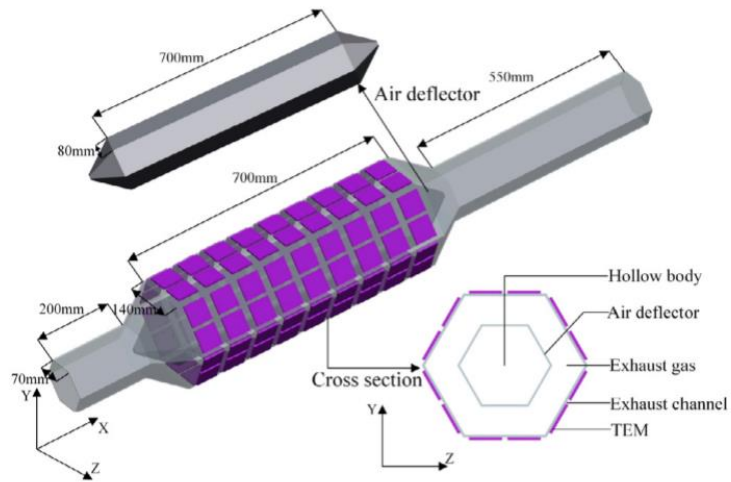
Şekil 1.21. Bir termoelektrik modüldeki ısıl direnç modeli [28]

Marvao, Coelho ve Rodrigues'in termoelektrik jeneratörlerin ağır koşullarda çalışan taşıtlardaki optimizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, egzoz gazları termoelektrik jeneratörler için ısı kaynağı oluşturma amacı ile, Şekil 1.22.'de gösterildiği üzere içinde kanatlar bulunan bir kanaldan geçirilmiştir. Soğutma için içinden soğutma suyu geçen dikdörtgen kanallar kullanılmıştır. Çalışmalarda üç farklı tipte özel tasarım termoelektrik modül kullanılmıştır. Çalışmalarda 3,5 tonluk ve 40 tonluk, 80 g/s ve 201 g/s'lik egzoz gazı debisine, partikül fitesinde 568 K ve 710 K'lik egzoz gazı sıcaklığına sahip iki farklı araç dikkate alınmıştır. Soğutma suyu sıcaklığı 368 K olarak belirlenmiştir. Sadece kanatların optimize edildiği, 5 termoelektrik modülün kullanıldığı koşullarda 3,5 tonluk araç için 55 W - 60 W arası güç, 7 - 9 termoelektrik modülün kullanıldığı koşullarda 40 tonluk araç için 370 W - 400 W arası güç elde edilmiştir. Soğutma suyu kanal yüksekliğinin, egzoz gazı ve soğutma suyu kanal duvar kalınlıklarının, modül seramik ve elektrik iletim kısım kalınlıklarının, Modüldeki p ve n ayakların arasındaki mesafenin ve ayak kesitlerinin optimize edildikten sonra, 7 - 9 termoelektrik modülün kullanıldığı koşullarda 3,5 tonluk araç için 96 W - 100 W arası güç, 11 - 15 termoelektrik modülün kullanıldığı koşullarda 40 tonluk araç için 700 W - 800 W arası güç elde edilmiştir. Çalışma sonucunda termoelektrik modüllerin ve içindeki kısımların ölçülerinin performans açısından oldukça önemli olduğu, kalınlıkların mümkün olduğu kadar az olması ve kanat tasarımlarının araca özel olarak çalışılması gerektiği belirtilmiştir [29].



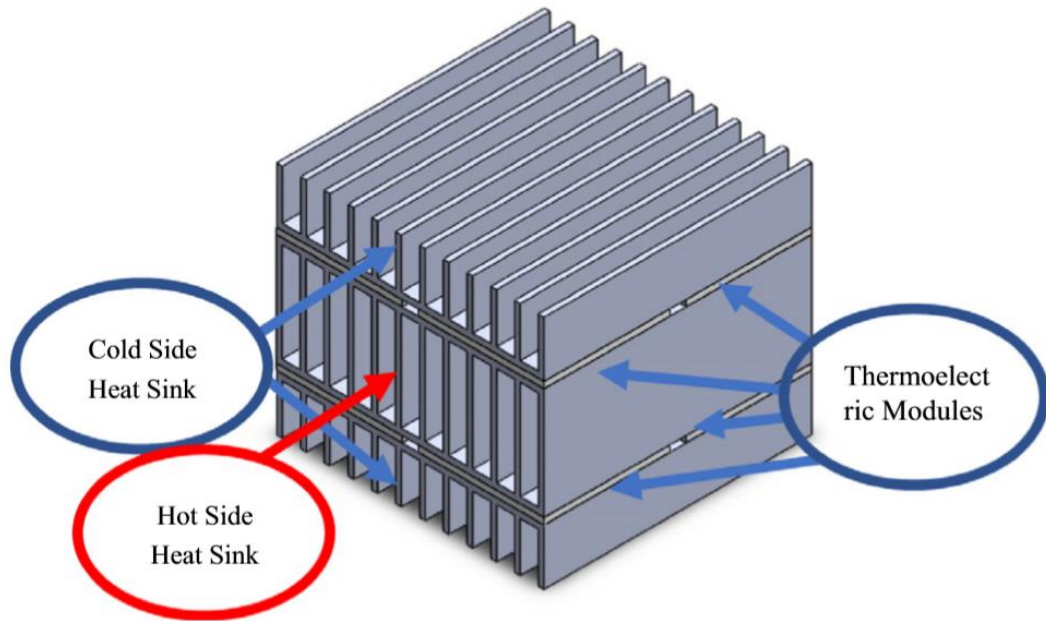
Şekil 1.22. Egzoz termoelektrik jeneratör sistemi için ısı değıştirci [29]

Shu, Ma, Tian, Yang, Chen ve Li tarafından egzoz gazından elektrik üretimi yapan sistem üzerindeki kısmılı termoelektrik modüllerin konfigürasyon optimizasyonunun yapıldığı çalışmada, Şekil 1.23.'te gösterildiği üzere altıgen kanal şeklinde bir ısı değıştirci ve 56 mm x 56 mm x 5 mm boyutlarında içinde 126 adet termoelektrik ayak çifti bulunan 108 adet kısmılız ve kısmılız termoelektrik modül kullanılmıştır. Egzoz gazının geçtiği kanalın içine sıcak gazın ısı değıştirci duvarları boyunca ilerlemesi ve modül sıcak yüzey sıcaklığını daha yüksek tutabilmek için bir deflektör yerleştirilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda kısmılız termoelektrik jeneratörler sıcak ve soğuk yüzey arasında 100 ile 180 K fark arasındaki durumlarda ile 723 W ile 861 W arası güçlere ulaşmıştır [30].



Şekil 1.23. Egzoz termoelektrik jeneratör sistemi için ısı değıştirci [30]

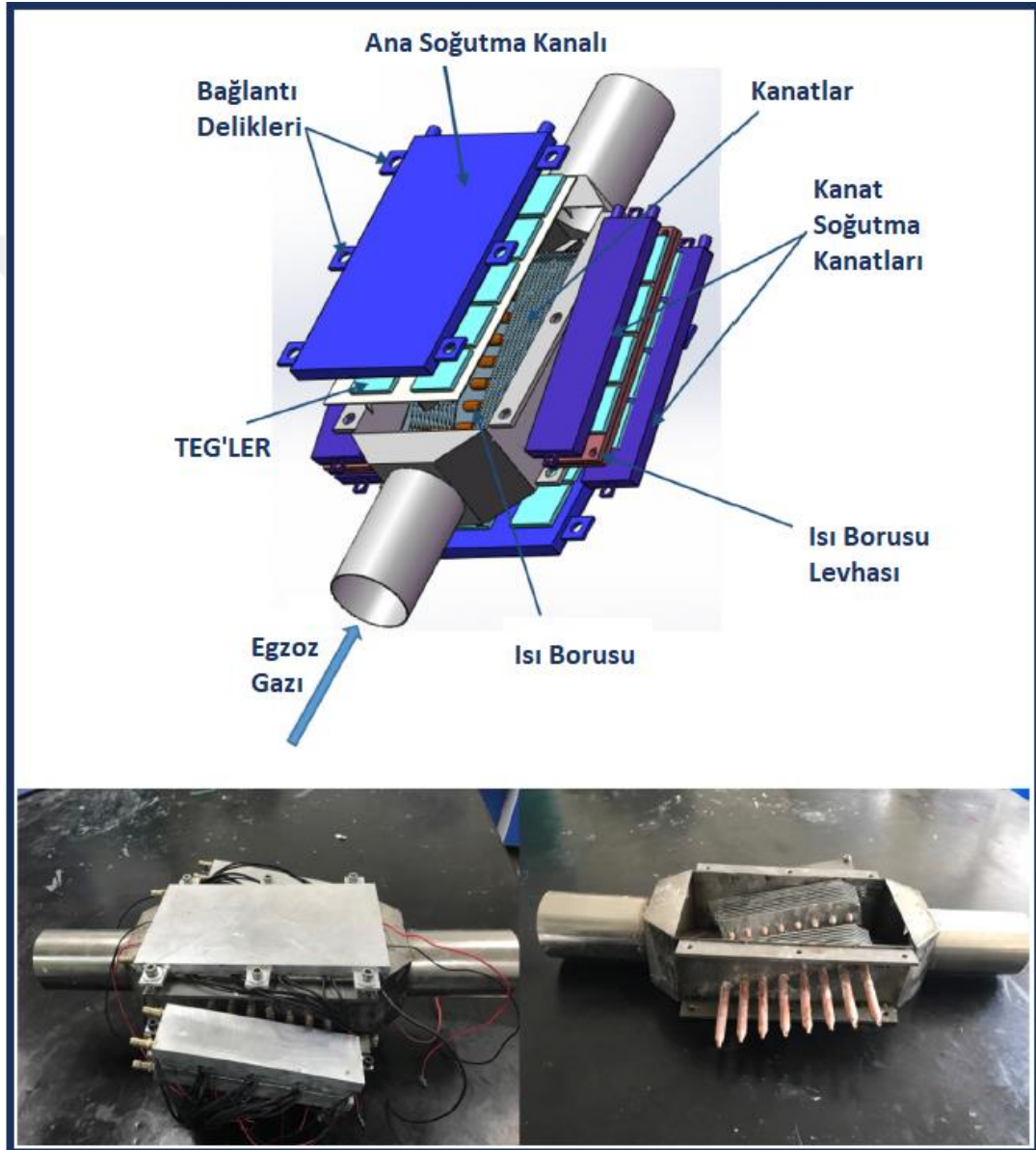
Mostafavi ve Mahmoudi'nin egzoz gazından termoelektrik jeneratör ile elektrik üretimi üzerine yaptıkları çalışmada, Şekil 1.24.'te gösterildiği üzere egzoz gazının geçtiği kısımda kanatları olan soğutma kısmında ise yine kanatlı ısı alıcısı bulunan ve bu kısımların arasında modüllerin yerleştirildiği bir ısı değiştirici kullanılmıştır. Soğutma kısmında hava akışını sağlayabilmek için fanlar kullanılmıştır. Alt kısımda ve üst kısımda 4'er tane olmak üzere toplamda 8 adet termoelektrik modül kullanılan çalışmada TEC 12706 kodlu termoelektrik modüller kullanılmıştır. Yapılan deneylerde sıcak ve soğuk modül yüzeyleri arası sıcaklık farkı 20 °C, 45 °C, 70 °C, 95 °C, 120 °C olan durumlarda yaklaşık olarak 0,2 W, 0,4 W, 1 W, 2 W, 3,5 W çıkış gücü elde edilmiştir [31].



Şekil 1.24. Isı alıcı formunda termoelektrik sistem [31]

Cao, Luan ve Wang'in termoelektrik yöntemle egzoz gazından elektrik üretimi için ısı boruları ile güçlendirilmiş sistem çalışmasında Şekil 1.25.'te gösterildiği üzere 127 termoelektrik ayak çiftine sahip modüller sıcak ve soğuk akış kanallarının arasına yerleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan 36 adet modülün 16 tanesi ısı borusu kullanımının etkilerini görebilmek amacı ile, egzoz gazı tarafında ısı geçişini arttırmak amacı ile 8 mm çapında 120 mm uzunluğundaki ısı borularının uç kısımlarındaki alüminyum levhalara montajlanarak, kalanlar ise egzoz gazı kanalının etrafına montajlanarak kullanılmıştır. Egzoz gazı debisi 120 kg/h altındaki durumlarda ısı

borusuz sistemdeki verim çok küçük bir farkla fazla çıkmıştır. Fakat debinin artmasıyla birlikte ısı borusu ile montajlanmış jeneratörlerin açık devre voltajı, maksimum çıkış gücü ve maksimum güç yoğunluğu sırasıyla % 7,5, % 10.17 ve % 15.49 daha fazla olmuştur. Sıcaklığın ve debinin artması ile ısı borusu kullanımının yararlı olduğu gözlemlenmiştir [32].



Şekil 1.25. Isı borulu ve ısı alıcılı termoelektrik sistem [32]

BÖLÜM 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Termoelektrik modüller ile egzoz sistemindeki atık ısıdan elektrik üretimini görmek ve devam eden bölümlerde belirtilmiş olan bilgisayar üzerinde yapılan analizleri doğrulamak amacı ile Şekil 2.1.'de gösterilen deney düzeneği kurulmuş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyde Bölüm 3.'de belirtilmiş olan Model 9 prototipi üretilerek kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Deney düzeneği

Deney düzeneğindeki cihazlar ve önemli parçalar yukarıdaki fotoğrafta gösterildiği üzere;

1. Fan
2. Varyak (Varatran 36Y)
3. Dwyer VT-200 Anemometer (Anemometre)

4. Dwyer TC-20 Thermometer (Termometre)
5. Airflow TA2 Anemometer / Thermometer (Anemometre)
6. Keithley 197 Autoranging Microvolt DMM (Multimetre)
7. Hava kanalı

olarak yerleştirilmiştir.

Yatay olarak konumlandırılan hava kanalında, fan hava kanalı çıkış kısmına yerleştirilmiş ve çekiş yapması sağlanmıştır. Fan ile hava kanalı arasında bir vana yerleştirilerek havanın debisinin istenen değerlere getirilmesi sağlanmıştır. Test bölgesinin girişine 5 numaralı cihaz yerleştirilerek hava giriş hızı ve sıcaklığı, test bölgesi çıkışına 4 numaralı cihaz yerleştirilerek çıkış sıcaklığı, deney düzeneği çıkış noktasına 3 numaralı cihaz yerleştirilerek havanın hızı ölçülmüştür. 4 numaralı cihaza ikinci bir yüzey probu eklenerek yüzey sıcaklığı ölçülmüştür. Rezistans yüzey sıcaklığı, gövde üzerinde delik açılarak alüminyum silindir üzerinden ölçülmüştür. Modüller 150 °C sıcaklığa kadar dayanıklı olduğu için 2 numaralı varyak, fişek rezistansa bağlanarak rezistans'ın istenen güçte çalışması ve sıcaklığın 150 °C'yi geçmemesi sağlanmıştır. 6 numara ile belirtilen multimetre, modüle bağlanarak Tablo 2.2'deki akım ve voltaj verileri elde edilmiş ve Tablo 2.1'deki veriler ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.1. Deneyde kullanılan termoelektrik modüller için üretici firma tarafından verilen katalog değerleri

Yüzeyler Arası Sıcaklık Farkı (°C)	Akım (A)	Voltaj (V)
20	225	0,97
40	368	1,8
60	469	2,4
80	559	3,6
100	669	4,8

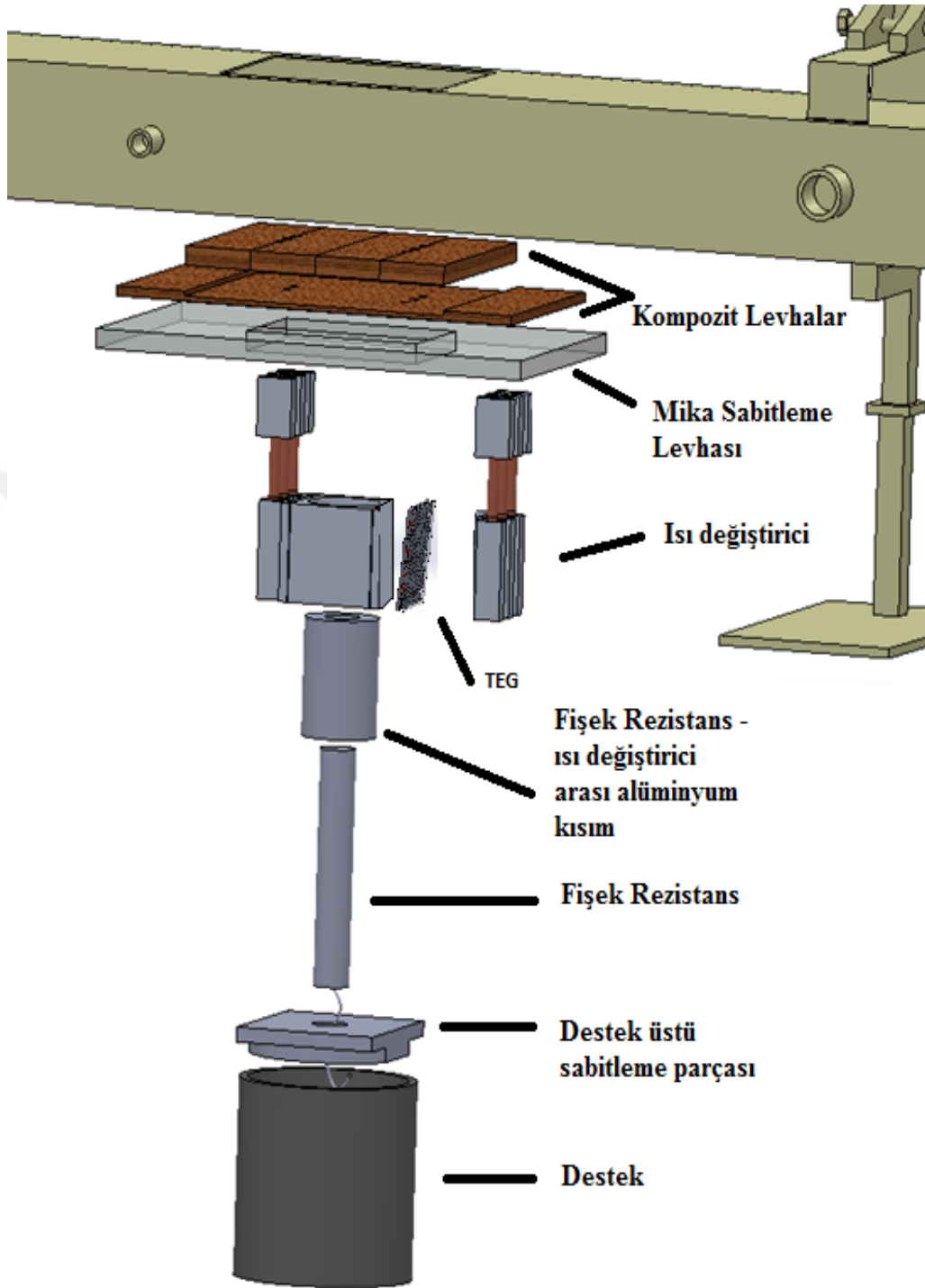
Deneyler ilk olarak fan kapalı ilen yani doğal taşınım halinde gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde yapılan deneyde, modül yüzeyleri arası sıcaklık farkı ve buna bağlı olarak

üretileen güç ve akım değerleri fan açıkken yani zorlanmış taşınım haline göre düşük çıkmıştır.

Tablo 2.2. Termoelektrik enerji sistemlerinde ısı geçişi laboratuvarında yapılan deney sonuçları

Hava Giriş Hızı (m/s)	Hava Giriş Sıcaklığı (°C)	Hava ıkış Hızı (m/s)	Hava ıkış Sıcaklığı (°C)	Rezistans Yüzey Sıcaklığı (°C)	Isı Alıcı Yüzey Sıcaklığı (°C)	retilen Voltaj (V)	retilen Akım (A)
X	X	X	X	45	40	0,172	0,030
5	22	26	16,5	63	43	0,91	0,103
5	22	27	16,5	78	54	1,029	0,112
4	21	25,1	11	88	62	1,13	0,124
3	20	27,5	9	106	78	1,2	0,133
3	20	28,3	9	115	86	1,24	0,137
5	22	29,4	16,5	136	105	1,3	0,142
5	21	33,1	16,5	140	90	1,9	0,252
4	21	32,6	11	144	97	1,85	0,221
4	20	32,2	11	145	98	1,85	0,212
3	19	34	9	140	100	1,82	0,190
3	20	35,2	9	146	105	1,73	0,188

Hava kanalının alt tarafı kesilmiş ve termoelektrik sistem buradan yerleştirilmiştir. Isı borularının yoğuşturucu kısımları hava tüneli içerisine yerleştirildikten sonra, Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi 130 mm x 30 mm x 10 mm boyutlarındaki 4 adet kompozit levhanın birleşim noktalarından ısı borusu geçecek Şekilde 6 mm çapında delikler açılmıştır. Levhaların birleşim noktalarından hava sızıntısı olmaması amacı ile boyutları levhaların toplam boyutuna uygun Şekilde 8 mm kalınlığında faturalı kompozit levha üretilmiştir. Bu kısmın altına bir mika levha yerleştirilerek, termoelektrik sistem, kelepçeler ile hava tüneli altında sabitlenmiştir. Termoelektrik sistemde egzoz borusu yerleştirilecek kısıma, egzoz gazı sıcaklığına uygun sıcaklığı sağlayabilmek amacı ile 900 W gücünde ve 20 mm çapında bir elektrikli fişek rezistans yerleştirilmiştir. 42 mm'lik egzoz borusu çapına göre hazırlanan termoelektrik sistemin, fişek rezistans ile arasında kalan kısımdaki boşlukta ısı geçişini sağlamak amacı ile i çapı 20 mm, dış çapı 42 mm 7000 serisi alüminyum silindir kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Deney düzeneğindeki ısı değiştirici ve parçaları

BÖLÜM 3. MODELLEME VE SAYISAL ÇÖZÜM

3.1. Termoelektrik Modül İçin Teorik Esaslar

Termoelektrik ayaklarda iletimle geçen ısı (Q , W) aşağıdaki şekilde (Denklem 3.1) ifade edilir;

$$Q=K\Delta T=K(T_H-T_L) \quad (3.1)$$

Denklemde;

K = Toplam ısı iletim katsayısı [W/K],

T_H ve T_L = Termoelektrik ayak veya eklem sırasıyla sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarıdır [K].

P ve n tipi ayaklardan oluşan bir ayak çiftinin toplam ısı iletim katsayısı (K , W/K), aşağıdaki denklem ile (Denklem 3.2) ifade edilir;

$$K = k_n y_n + k_p y_p = k_n \left(\frac{A}{L}\right)_n + k_p \left(\frac{A}{L}\right)_p \quad (3.2)$$

Denklemde;

k_n = N-tipi ayak malzemesinin ısı iletim katsayısı [W/mK],

k_p = P-tipi ayak malzemesinin ısı iletim katsayısı [W/mK],

A = Kesit alanı [m^2],

L = Ayak uzunluğu [m],

y = Efektif ayak uzunluğudur [m].

Termoelektrik ayaklardan akım geçmesi ile meydana gelen Joule ısısı (Q , W) aşağıdaki şekilde de (Denklem 3.3) ifade edilir;

$$Q = I^2R \quad (3.3)$$

Denklemde;

I = Ayaklardan geçen akım [A],

R = Modülün iç direncidir [Ω].

Modülün iç direnci (R, Ω) aşağıdaki denklemler (Denklem 3.4 ve 3.5) ile ifade edilir;

$$R = R_n + R_p \quad (3.4)$$

$$R = \frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{\rho_p L_p}{A_p} \quad (3.5)$$

Denklemde;

ρ_n ve ρ_p = P ve N tipi ayak malzemelerinin elektriksel özdirençleri [Ω .)],

L_n ve L_p = P ve N tipi ayakların uzunlukları [m],

A_n ve A_p = P ve N tipi ayakların kesit alanlarıdır [m^2].

3.2. Termoelektrik Güç Üretimi (TEG)

Modülün T_H sıcaklığındaki sıcak yüzeyine gelen ısı (Q_H, W) ve modülün T_L sıcaklığındaki soğuk yüzeyinden çıkan ısı (Q_L, W) değerlerini belirlemek için gereken denklemler (Denklem 3.6, 3.7 ve 3.8) aşağıdaki gibi gösterilir;

$$Q_H = N[SIT_H + K(T_H - T_L) - 0,5I^2R] \quad (3.6)$$

$$Q_L = N[SIT_L + K(T_H - T_L) + 0,5I^2R] \quad (3.7)$$

$$S = |S_n| + |S_p| \quad (3.8)$$

Yukarıdaki Denklemlerde;

S_n = N-tipi ayak malzemesi için Seebeck katsayısı [V/],

S_p = P-tipi ayak malzemesi için Seebeck katsayısı [V/K],

I = Akım [A]),

K = Toplam ısı iletim katsayısı [W/K],

N = Ayak çifti sayısı,

R = İç dirençtir [Ω]).

Termoelektrik modülde çıkış gücü (P , W) aşağıdaki şekilde (Denklem 3.9) ifade edilir;

$$P = Q_H - Q_L = N[SI(T_H - T_L) - I^2R] = VI \quad (3.9)$$

Denklemde;

V = Çıkış Gerilimidir [Volt].

Çıkış gerilimi, Q_H (Denklem 3.6) ve Q_L (Denklem 3.7), P ifadesini veren denklemde (Denklem 3.9) yerine yazılırsa aşağıdaki denklem'de (Denklem 3.10) elde edilir.

$$V = N[(S_p - S_n)(T_H - T_L) - IR] \quad (3.10)$$

Termoelektrik ısı makinasının verimi aşağıdaki denklem ile (Denklem 3.11) ile hesaplanır;

$$\text{Verim} = \frac{(Q_H - Q_L)}{Q_H} = \frac{P}{Q_H} = \frac{P}{(Q_H + P)} \quad (3.11)$$

3.3. Termoelektrik Soğutma (TEC)

Modül giriş gerilimi (V , volt) aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Denklem 3.12);

$$V = N[(S_p - S_n)(T_H - T_L) + IR] \quad (3.12)$$

Güç girişi (P , W) aşağıdaki denklem ile (Denklem 3.13) ifade edilir ;

$$P = N[(S_p - S_n)(T_H - T_L)I + I^2R] = VI \quad (3.13)$$

Soğutma kapasitesi, soğutma yükü, soğutulan ortamdan çekilen ısı veya T_L sıcaklığındaki soğuk eklemenin çektiği ısı (Q_L, W), aşağıdaki denklem ile (Denklem 3.14) ifade edilir;

$$Q_L = N[(S_p - S_n)IT_L - K(T_H - T_L) - 0,5I^2R] \quad (3.14)$$

Çevreye verilen veya T_H sıcaklığında eklemden çıkan ısı (Q_H, W) aşağıdaki denklem ile (Denklem 3.15) ile ifade edilir;

$$Q_H = N[(S_p - S_n)IT_H - K(T_H - T_L) - 0,5I^2R] \quad (3.15)$$

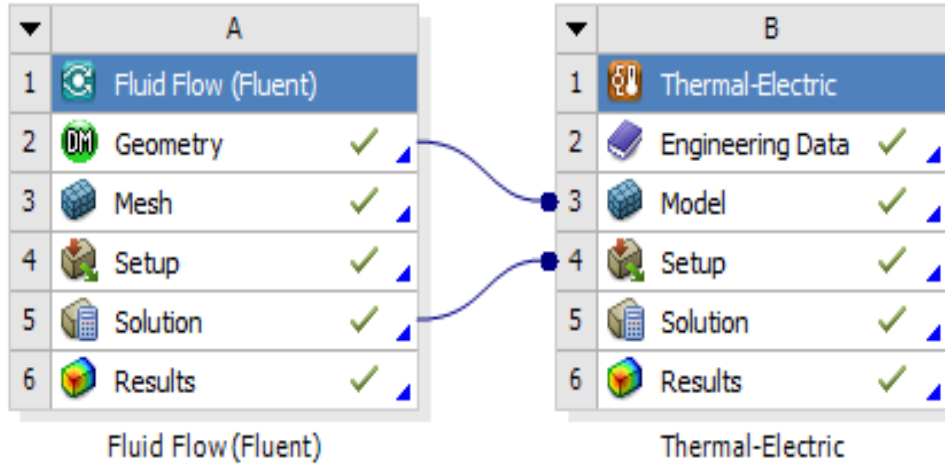
Termoelektrik soğutucunun veya termoelektrik soğutma makinasının etkinlik katsayısı aşağıdaki denklem (Denklem 3.16) ile ifade edilir;

$$COP_{SM} = \frac{Q_L}{P} \quad (3.16)$$

3.4. Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi, Malzemenin Termo-Fiziksel Özellikleri ve Termoelektrik Modül Boyutları

Tasarımlar SOLIDWORKS 2016 programında katı model halinde 3 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Tasarımlarda kullanılan parçalar yazılım üzerinde ayrı ayrı oluşturulmuş ve montaj modülü kullanılarak birleştirilmiştir. ANSYS 17.2 programına sonlu eleman analizi yapılmak üzere aktarılmıştır. Analizler için ANSYS programında “Fluent” ve “Thermal- Electric” modülleri Şekil 3.1.’te gösterildiği üzere birlikte kullanılmıştır.

Oluşturulan 3B modeller ANSYS programında Fluent modülünde Geometri kısmına aktarılmıştır. Burada aktarılan model üstünde, “boolean” yöntemi ile çözüm için gerekli birleştirme ve çıkarma işlemleri yapılarak geometri son haline getirildi.



Şekil 3.1. ANSYS programında modül kullanımı

“Mesh” kısmında sonlu eleman analizi için gerekli düğüm yapısı oluşturuldu. Çeşitli düğüm sayılarında analizler yapılarak Tablo 3.1.’deki veriler dikkate alınarak uygun eleman sayısı ve türü belirlendi. Burada en uygun görülen eleman sayısı için boyut fonksiyonu olarak “Proximity and Curvature”, ilişki merkezi olarak “Coarse” ve boşluklar arası hücre sayısı olarak “1” seçildi.

Tablo 3.1. “Fluent” analizi için ağ özellikleri ve sonuçların düğüm sayısına göre karşılaştırılması

Boyut Fonksiyonu	Proximity and Curvature		
	İlişki Merkezi		
	Coarse		
Boşluklar Arası Hücre Sayısı	2	1	1
Maximum Tet Boyutu, m	8,00E-03		1,60E-02
Fluent Node Sayısı	8745549	3167666	1425652
Fluent Element Sayısı	7200388	2443086	986542
Fluent Sıcak Taraf Ortalaması	70	71	73
Fluent Soğuk Taraf Ortalaması	43	44	42
Fluent Çözüm Süresi	7 s 40 dk	2 s 20dk	55dk

Mesh kısmında işlemler bittikten sonra Setup kısmına geçildi. Burada işleme seçeneği olarak “Parallel” seçildi. Çözücü olarak “Pressure-Based” seçildi. Analizler “Steady” zamanlı olarak yapıldı. Model olarak “k-epsilon” seçildi. Material kısmında Tablo 3.2.’deki malzeme özellikleri girildi.

Tablo 3.2. Malzemenin termo-fiziksel özellikleri

	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (J/kg-K)	Isı iletim Katsayı (W/m-K)
Seramik	3970	880	32
Isı Borusu	8933	385	24000
Bakır	8940	381	387,6
Aluminyum	2719	871	202,4
P-Tipi Yarı-İletken	6858	544	1,3
N-Tipi Yarı-İletken	7858	544	1,9
Nitrojen	1,138	1040,67	0,0242
Hava	1,225	1006,43	0,0242

“Cell Zone Conditions” kısmında malzemeler atandı. “Boundary Conditions” kısmında sınır şartları belirlendi. “Solutions Methods” ve “Solution Controls” kısmında Tablo 3.3.’teki standart ayarlarla devam edildi.

Tablo 3.3. Yakınsama kriterleri

Yakınsama Kriterleri	
Basınç	0,3
Yoğunluk	1
Kütle Kuvvetleri	1
Momentum	0,7
Türbülans Kinetik Enerjisi	0,8
Türbülans Yayılım Oranı	0,8
Türbülans Viskozitesi	1
Enerji	1

“Run Calculation” kısmından hesap yaptırıldı. Yaklaşık 1000 ile 2000 iterasyon arasında sonuçlar yakınsandı.

“Fluent” modülünde elde edilen gerekli bilgiler amaçlanan birleşik çözüm modeli için “Thermal-Electric” modülüne aktarıldı. “Fluent” modülünden sırasıyla “Geometry” ve “Solution” kısımları, “Thermal-Electric” modülünde “Model” ve “Setup” kısımlarına aktarıldı.

“Model” kısmında yine “Fluent” modülünde olduğu gibi “Mesh” kısmında düğüm sayısı ve türü belirlendi. En uygun görülen eleman sayısı için Tablo 3.4.’teki veriler

incelenerek boyut fonksiyonu olarak “Adaptive”, ilişki merkezi olarak “Coarse” seçildi.

Tablo 3.4. "Thermal-Electric" analizi için ağ özellikleri ve sonuçların düğüm sayısına göre karşılaştırılması

Boyut Fonksiyonu	Adaptive		Curvature	Proximity
İlişki Merkezi	Coarse	Medium	Medium	Medium
Thermal-Electric Node Sayısı	496800	3035950	20584	1250689
Thermal-Electric Element Sayısı	75308	585188	1046	162896
TEG 1 Akım, A	0,19279	Analiz Yapılamadı	0,1896	0,19382
TEG 2 Akım, A	0,20195		0,1902	0,20185
Süre	2dk 48sn	46dk 48sn	26sn	21dk 34sn

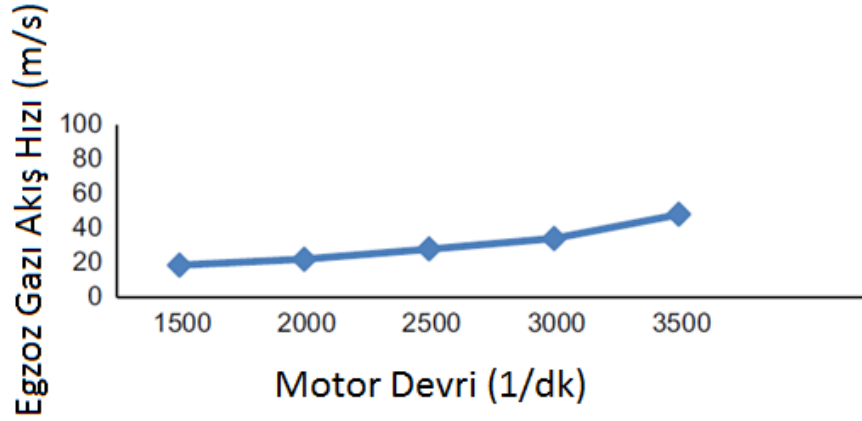
Sınır şartları kısmında, voltajlar tanımlandı. Termoelektrik modülün dış yüzeylerine $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ısı taşınım katsayısı tanımlandı. “Imported load” kısmında termoelektrik modülün sıcak ve soğuk yüzlerinin sıcaklık profilleri “fluent” modülünde yapılmış analizden aktarıldı. “Solution” kısmında istenen bilgiler belirlenip çözüm yapıldı. Bütün analizler sırasında Tablo 3.5.’te özellikleri verilen bilgisayar kullanıldı.

Tablo 3.5. Bilgisayar özellikleri

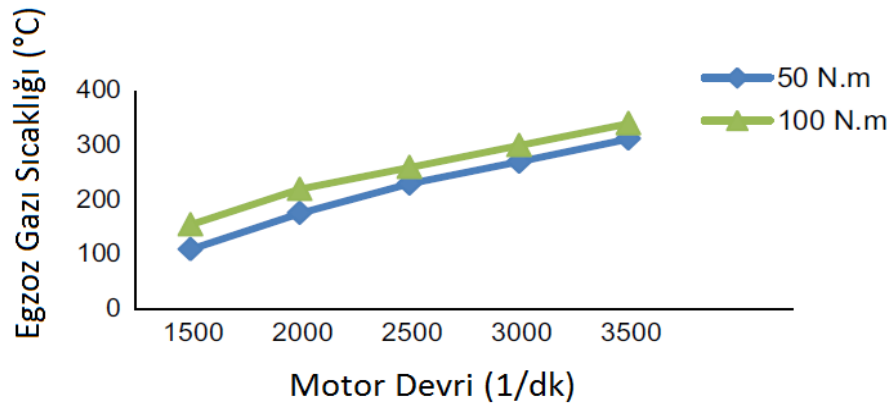
İşlemci	Intel I5 6500 3.2 Ghz
Ram	16 gb ddr4 2133 Mhz
Ekran Kartı	Nvidia Geforce Gtx1060 6gb

Otomobil seyir halinde iken, cihazın performansını ölçebilmek amacıyla 30, 60, 90, 120 km/h araç hızlarında analizler yapılmıştır. Ayrıca taşıt hareketsiz durumda iken performansı görebilmek amacıyla 10 km/h hıza görede analizler gerçekleştirilmiştir. Bu hızlardaki egzoz gazı sıcaklığı ve hızı için İ.Temizer ve C.İlkılıç’ın daha önce Dizel

motorlarda termoelektrik jeneratör yönteminin performansını incelendiği makaledeki Şekil 3.2. ve 3.3.'de gösterilen veriler kullanılmıştır [11].



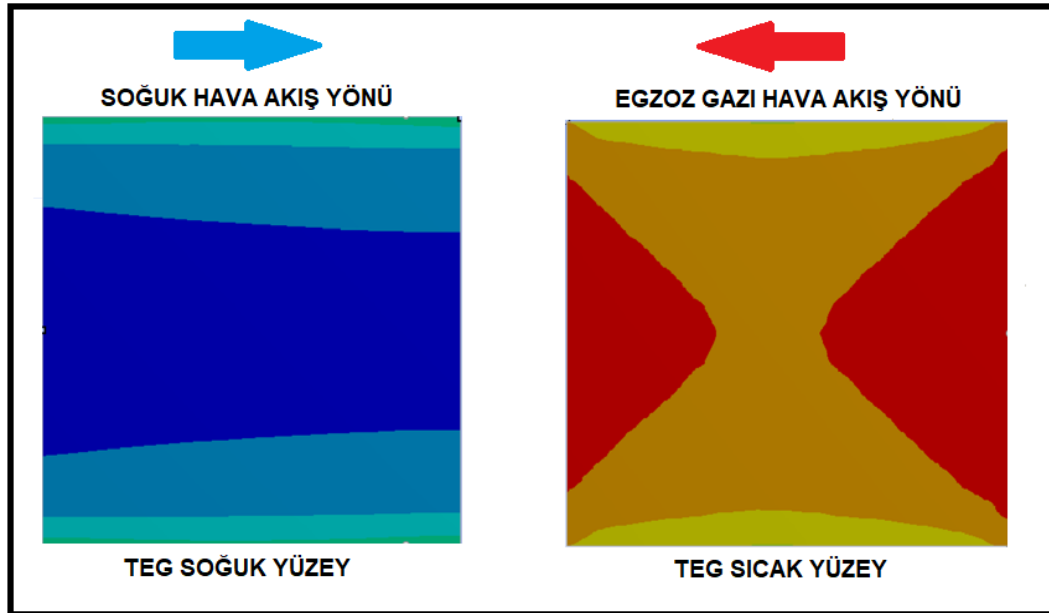
Şekil 3.2. Egzoz akış hızı



Şekil 3.3. Egzoz gazı sıcaklığı

Bütün analizlerde aracın 100 N.m yük altında çalıştığı varsayılmıştır. Farklı hızlarda ve sabit motor devrinde yapılan analizlerde 30, 60, 90, 120 km/h hızlar için motor 2500 devir/dakika hızında, farklı hızlarda ve farklı devirlerde yapılan testlerde ise 30 km/h, 60km/h ve 90 km/h için motor 2500 devir/dakika hızında, 120 km/h için ise 3000 devir/dakika hızında kabul edilmiştir. Taşıtın hareket etmediği durum için motor 1500 devir/dakika hızında kabul edilmiştir. Rüzgar hızları 10, 30, 60, 90 ve 120 km/h araç hızları için sırasıyla 3, 8, 17, 25 ve 33 m/s hızları kullanılmıştır. Rüzgar sıcaklığı 20 °C kabul edilmiştir.

Bu tez çalışması için 10 farklı tasarım yapılmış ve bu tasarımlar üzerinden analiz yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Bütün tasarımlarda 42 mm'lik egzoz borusu dış çapı ve 1 mm egzoz borusu kalınlığı dikkate alınmıştır. Modellerin üretimi sırasında alüminyum bloklardan talaşlı imalat yöntemi kullanılması öngörülerek tasarım yapılmıştır. Modüllerin yerleştirilebilmesi için bloklar üzerinde her tasarımda aynı olacak şekilde, içine modül yerleştirildiğinde blok ve modül arasında yüzeylerin tamamen temas edebileceği şekilde boşluklar açılmıştır. Bu boşlukların genişliği ve yüksekliği modülün boyutlarıyla aynıdır. Tez çalışmasının ilerleyen kısımlarındaki analiz sonuçlarında modüller için sıcaklık dağılımı gösterimlerinde akışkan akış yönleri Şekil 3.4.'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Akış yönlerinin modül üzerinde gösterimi

3.5. Termoeleman Ayak Geometrilerinin Etkileri

Termoelemanlarda p ve n tipi termoelektrik ayakların geometrilerinin termoelektrik güç üzerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, çeşitli geometrilere ve aynı geometride farklı yüksekliklerde, sonlu elemanlar analizi yazılımı ANSYS programı kullanılarak sayısal hesaplamalar yapılmıştır.

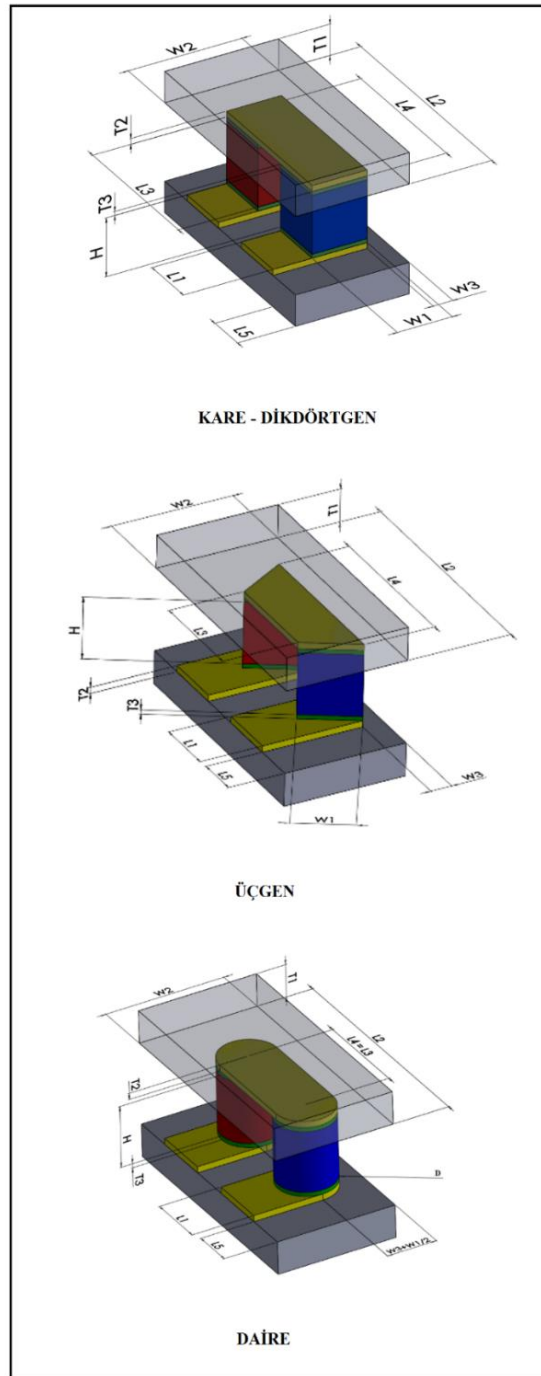
Tablo 3.6. Termoeleman malzeme özellikleri [33]

Özellikler	P Tipi	N Tipi	Cu	63Sn-37Pb	Al ₂ O ₃
	BiTe- alaşımı	BiTe- alaşımı	İletken	Lehim	Seramik yalıtkan
Isı iletim katsayısı	1,22 - 5,24	1,78 - 3,5	398 - 382	3 - 46	37,2 - 17,2
k (W/m K)	(300 - 500 K)	(300 - 500 K)	(293 - 600 K)	(273 - 423 K)	(293 - 600 K)
Elektrik öz direnci	13,8 - 25,0	9,8 - 14,9	0,18 - 0,38	0,12 - 0,23	1,00E+19
ρ ($\mu\Omega$ m)	(300 - 500 K)	(300 - 500 K)	(300 - 600 K)	(293 - 473 K)	
Seebeck katsayısı	190 - 218	-196 - (-204)			
S (μ V/K)	(300 - 423 K)	(300 - 423 K)			

P ve n tipi ayaklarda piyasada genel olarak kullanılan bizmut-tellürid malzemeler seçilmiştir. Bu materyallerin yaygın kullanım sıcaklığında göz önüne alınarak, modülün sıcak tarafı için $T_H = 150$ °C ve soğuk tarafı için $T_L = 50$ °C kabul edilmiştir. Ortam sıcaklığı 20 °C ve ısı taşınım katsayısı 10 W/m²K kabul edilmiştir. Analizleri yapılan termoeleman çiftlerinin oluşturulması sırasında kullanılan tüm malzemelerin özellikleri Tablo 3.6.'da gösterilmiştir. Burada belirtilen özellikler ANSYS programında tanımlanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. [33]

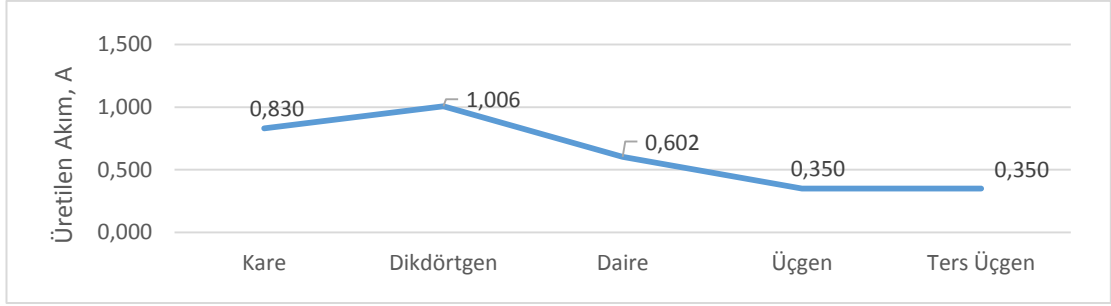
Tablo 3.7. Prizma ayaklı termoelektrik ayak çiftlerinin ölçüleri [33]

MODELLER \ ÖLÇÜLER (mm)	H	W1	W2	W3	L1	L2	L3	L4	L5	T1	T2	T3
Kare	1	1,4	2,9	0,5	1,4	5,8	3,8	3,8	1	0,8	0,15	0,1
Kare	1,5	1,4	2,9	0,5	1,4	5,8	3,8	3,8	1	0,8	0,15	0,1
Kare	2	1,4	2,9	0,5	1,4	5,8	3,8	3,8	1	0,8	0,15	0,1
Dikdörtgen	1,5	1,9	2,9	0,5	1,4	5,8	3,8	3,8	1	0,8	0,15	0,1
Daire	1,5	1,4	2,9	0,5	1,4	5,8	3,8	3,8	1	0,8	0,15	0,1
Üçgen	1,5	1,4	2,9	0,5	1,4	5,8	2,4	3,8	1	0,8	0,15	0,1
Ters Üçgen	1,5	1,4	2,9	0,69	1,4	5,8	3,8	2,4	1	0,8	0,15	0,1



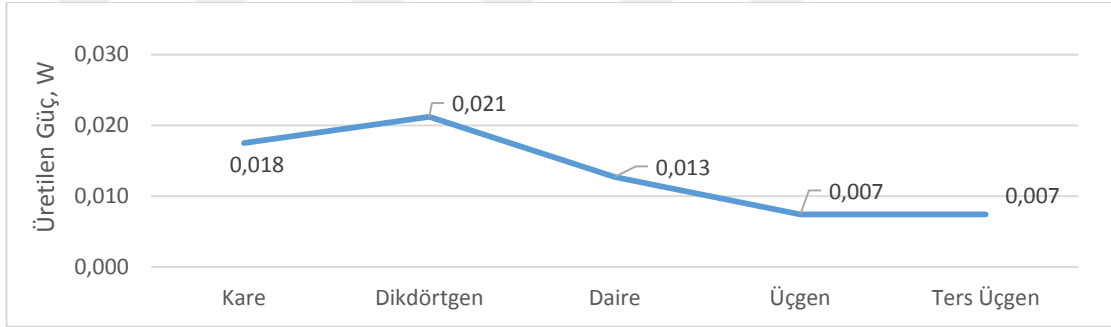
Şekil 3.5. Prizma ayaklı termoelektrik çiftlerin parametrik ölçülendirme [33]

Tasarlanan modellerin ölçüleri parametrik olarak Şekil 3.5.'de gösterilmiş ve karşılık gelen değerler Tablo 3.7.'de belirtilmiştir. Ayak yüksekliğinin performansa olan etkisini görebilmek amacıyla kare kesitli ayaklarda yükseklik dışındaki bütün ölçüleri aynı tutarak farklı ayak yükseklikleriyle analizler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



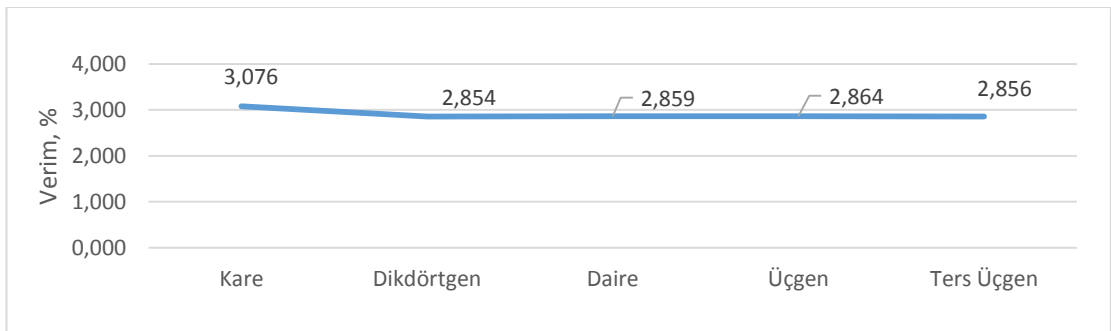
Şekil 3.6. Prizma ayaklı termoelektrik çiftlerde üretilen akım grafiği [33]

Termoelektrik çiftlerin ürettiği akım değerleri Şekil 3.6.'da gösterilmiştir. Burada yapılan karşılaştırma sonucunda en yüksek akımın dikdörtgen kesitli çift tarafından üretildiği görülmüştür.



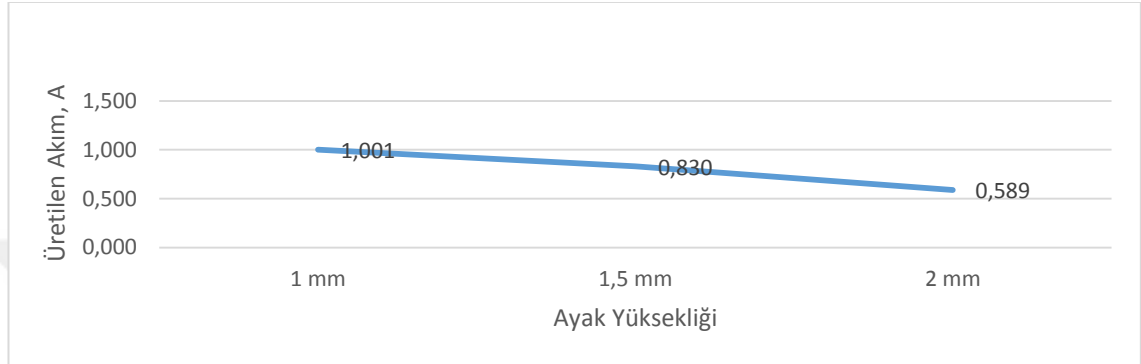
Şekil 3.7. Prizma ayaklı termoelektrik çiftlerde üretilen güç grafiği [33]

Termoelektrik çiftlerin ürettiği güç değerleri Şekil 3.7.'de gösterilmiştir. Burada yapılan karşılaştırma sonucunda en yüksek gücün dikdörtgen kesitli çift tarafından üretildiği görülmüştür.



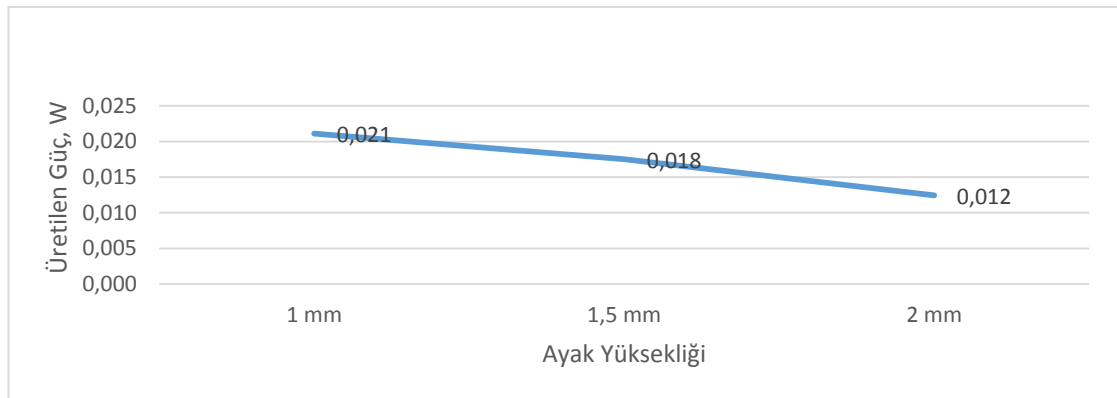
Şekil 3.8. Prizma ayaklı termoelektrik çiftlerde verim grafiği [33]

Termoelektrik ayak çiftlerinin verimleri Şekil 3.8.'de gösterilmiştir. Burada yapılan karşılaştırmada en yüksek verimin kare kesitli çifte ait olduğu görülmüştür. Dikdörtgen ayaklı çiftin en yüksek akım ve güç üretimi değerlerine sahip olmasına rağmen absorbe ettiği ısının da yüksek olması sebebiyle verim karşılaştırmasında kare kesitli çiftin gerisinde kaldığı gözlemlenmiştir.



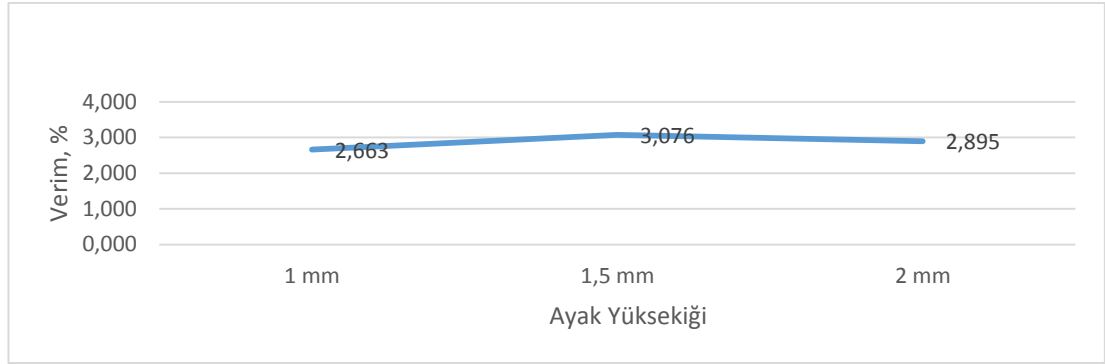
Şekil 3.9. Kare prizma ayaklı çiftlerde ayak yüksekliğine bağlı akım grafiği

Kare kesitli fakat farklı ayak yüksekliklerine sahip çiftlerin ürettiği akım değerleri Şekil 3.9.'da gösterilmiştir. En yüksek üretilen akım değerinin 1 mm'lik ayak yüksekliğine sahip çifte ait olduğu görülmüştür.



Şekil 3.10. Kare prizma ayaklı çiftlerde ayak yüksekliğine bağlı güç grafiği

Kare kesitli fakat farklı ayak yüksekliklerine sahip çiftlerin ürettiği güç değerleri Şekil 3.10.'da gösterilmiştir. En yüksek üretilen güç değerinin 1 mm'lik ayak yüksekliğine sahip çifte ait olduğu görülmüştür.



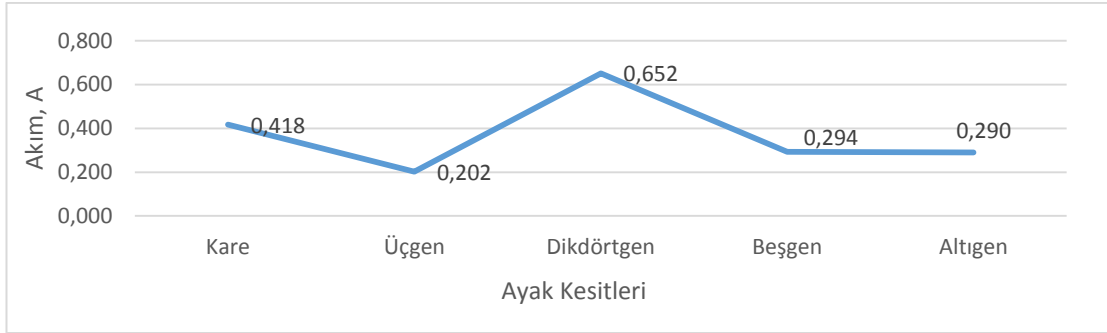
Şekil 3.11. Kare prizma ayaklı çiftlerde ayak yüksekliğine bağlı verim grafiği

Kare kesitli çiftlerin verimleri Şekil 3.11.'de gösterilmiştir. En yüksek verimin 1,5mm ayak yüksekliğine sahip olan çifte ait olduğu görülmüştür. Farklı kesitlerdeki prizma çiftlerinin karşılaştırılmasında görülen duruma benzer olarak burada da, 1mm'lik yüksekliğe sahip çiftin en yüksek güç ve akım üretimine sahip olmasına rağmen, en yüksek absorbe eden ayak çifti olması sebebiyle verim konusunda 1,5mm'lik yüksekliğe sahip ayak çiftinin gerisinde kalmıştır.

Trapez tipteki modellerin ölçüleri parametrik olarak Şekil 3.15.'de gösterilmiş ve karşılık gelen değerler Tablo 3.8.'de belirtilmiştir.

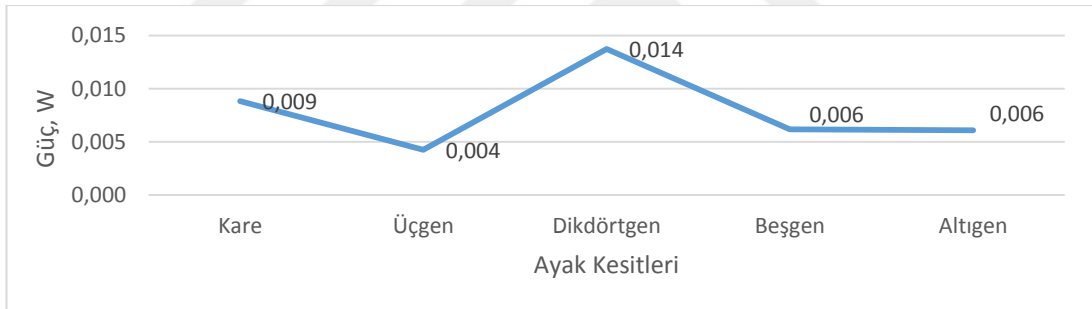
Tablo 3.8. Trapez ayaklı termoelektrik ayak çiftlerinin ölçüleri

MODELLER \ ÖLÇÜLER (mm)	H	W1	W2	W3	W4	W5	L1	L2	L3	L4	L5	T1	T2	T3
Trapez Kare	1,5	0,8	2,9	0,5	1,4		1,4	5,8	3,8	3,8	1,3	0,8	0,15	0,1
Trapez Dikdörtgen	1,5	0,8	2,9	0,5	1,4	1,8	1,2	5,8	3,8	3,8	1,3	0,8	0,15	0,1
Trapez Üçgen	1,5	0,8	2,9	0,5	1,4		0,8	5,8	3,8	3,8	1,3	0,8	0,15	0,1
Trapez Beşgen	1,5	0,5	2,9	0,5	0,86		0,8	5,8	3,8	3,8	1,3	0,8	0,15	0,1
Trapez Altıgen	1,5	0,4	2,9	0,5	0,7		0,8	5,8	3,8	3,8	1,3	0,8	0,15	0,1

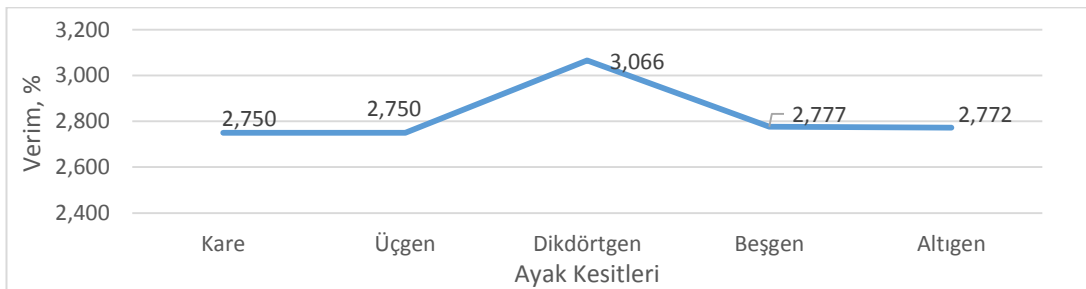


Şekil 3.12. Trapez ayaklı termoelektrik çiftlerde üretilen akım grafiği

Termoelektrik çiftlerin ürettiği akım değerleri Şekil 3.12.'de gösterilmiştir. Burada yapılan karşılaştırma sonucunda en yüksek akımın dikdörtgen kesitli çift tarafından üretildiği görülmüştür. Termoelektrik çiftlerin ürettiği güç değerleri Şekil 3.13.'te gösterilmiştir. Burada yapılan karşılaştırma sonucunda en yüksek gücün dikdörtgen kesitli çift tarafından üretildiği görülmüştür.

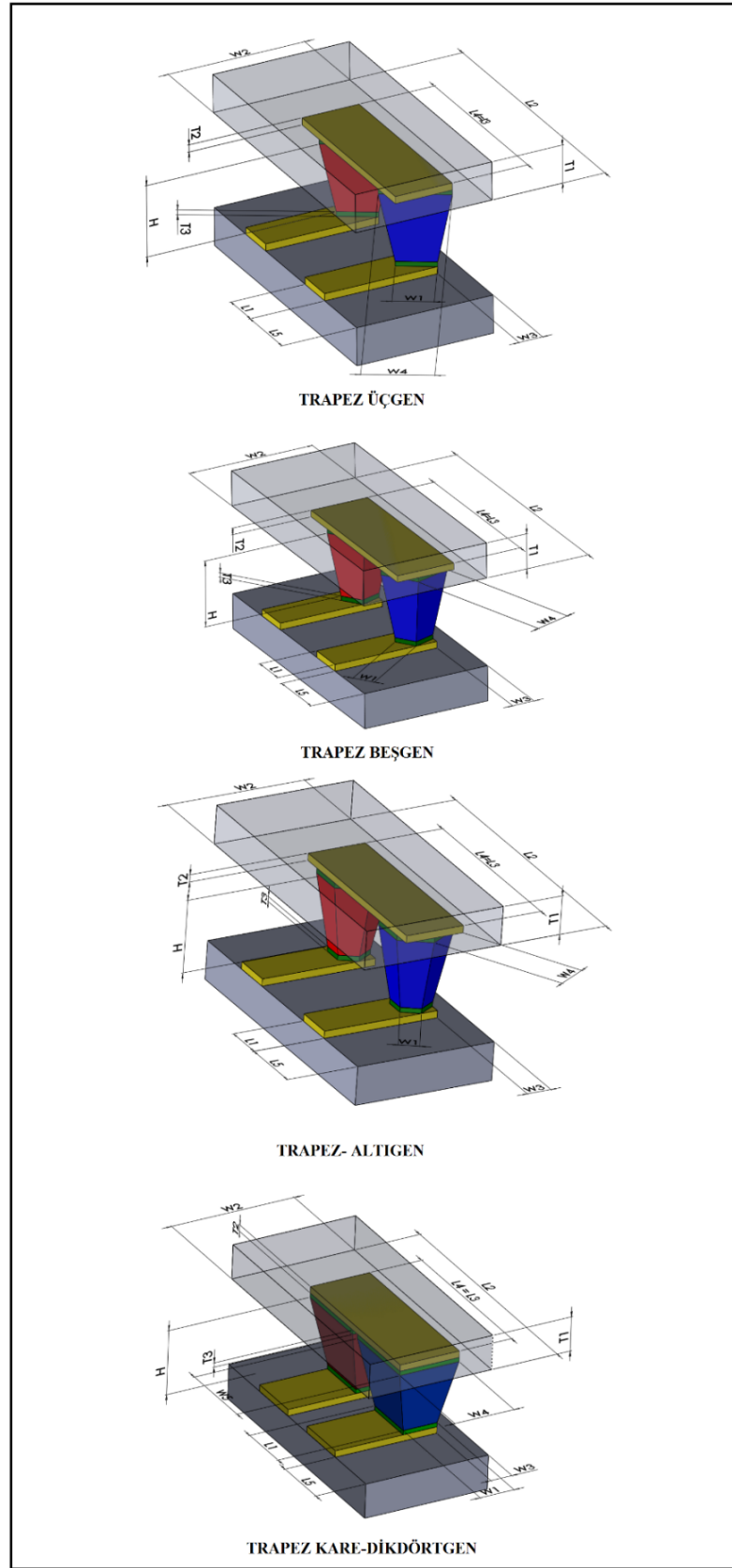


Şekil 3.13. Trapez ayaklı termoelektrik çiftlerde üretilen güç grafiği



Şekil 3.14. Trapez ayaklı termoelektrik çiftlerde verim grafiği

Termoelektrik çiftlerin verimleri Şekil 3.14.'te gösterilmiştir. Burada yapılan karşılaştırmada en yüksek verimin dikdörtgen kesitli çifte ait olduğu görülmüştür.

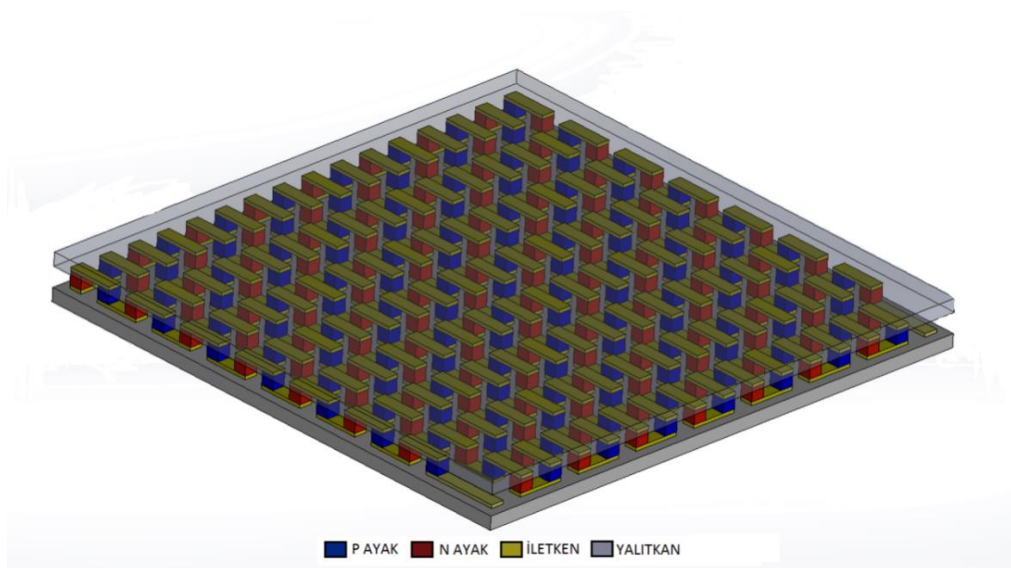


Şekil 3.15. Trapez ayaklı termoelektrik çiftlerin parametrik ölçülendirme

3.6. Tasarlanan Isı Değiştirici Modelleri

Tez çalışması sırasında, termoelektrik jeneratörler ile egzoz gazından elektrik enerjisi üretilmesi amacıyla çeşitli tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Farklı boyutlarda ve tiplerde kanatlar, farklı oryantasyonda ve sayıda termoelektrik modül kullanımları ve ısı boruları kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Isı değiştirici tasarımı sırasında öncelikle sade kanatlı ısı alıcı içeren tasarımlar kullanılmış, bu tasarımlar üzerinde çeşitli değişiklikler yapılarak en iyi tasarım tespit edilmeye çalışılmıştır. Tasarım çalışmaları sırasında, ısı değiştirici taşıtın altında soğutma için rüzgardan faydalanılacak ve egzoz borusu dışına takılacak şekilde düşünülmüştür. Bu sebeple ısı değiştiriciler, araç altında sığacak şekilde, ısı borusunun etrafında 2 (yere paralel) veya 3 (yere paralel ve egzoz borusunun altında 1 adet) modül konumlandırılacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarımlar sırasında egzoz borusu etrafına bir adet modül seti yerleştirilmesi düşünülmüştür. Bütün tasarımlar 42 mm'lik egzoz borusuna yerleştirilecek şekilde yapılmıştır.

Bütün tasarımlarda 126 p ve n termoelektrik ayak çifti içeren termoelektrik modüller kullanılmıştır. Bu modülün 3B tasarımı sırasında Şeki 3.16.'da gösterilen SP1848-27145SA kodlu modül referans alınmıştır. Tasarım sırasında Tablo 3.9.'da gösterilen ölçüler kullanılmıştır.

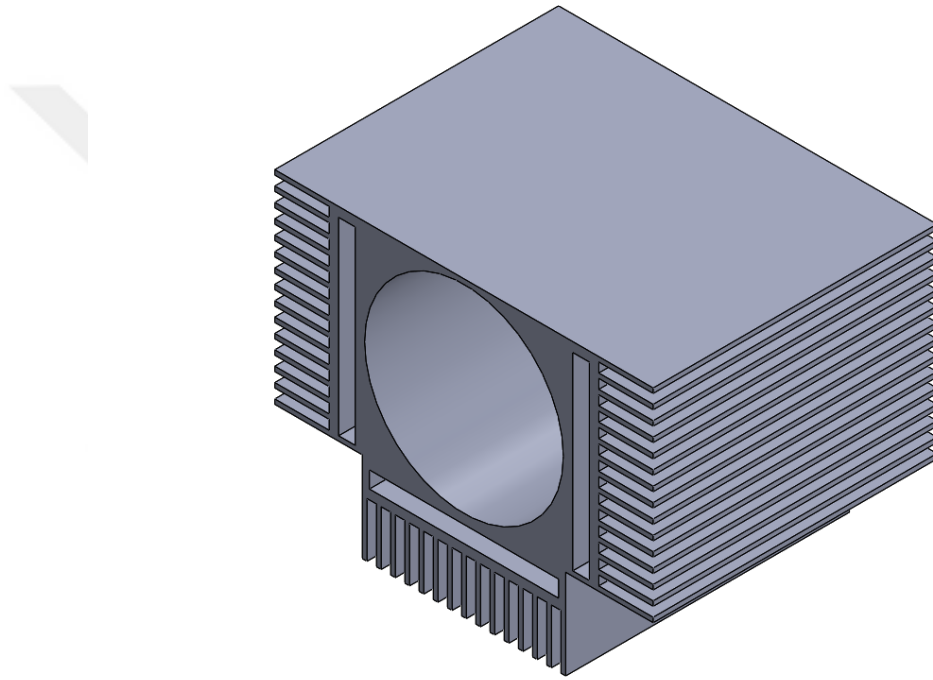


Şekil 3.16. SP1848-27145SA modül görüntüsü

Tablo 3.9. Deneysel ve sayısal çalışmamızda kullandığımız modül (SP1848-27145SA) ölçüleri

	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
Yalıtkan	40	40	1
İletken	3,5	1	0,25
İletken Giriş-Çıkış	6	1	0,25
P Ayak	1	1	1
N Ayak	1	1	1

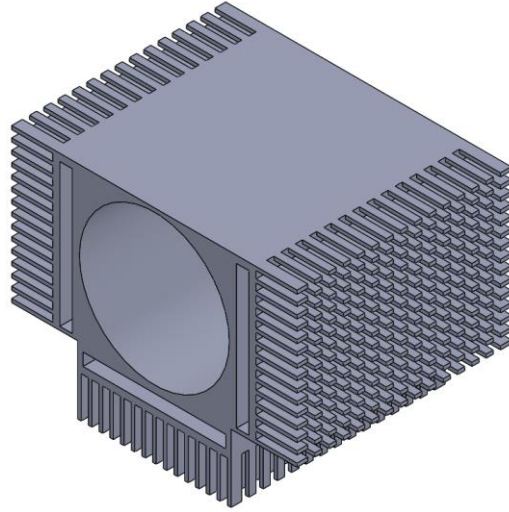
3.6.1. Model 1



Şekil 3.17. Model 1

Bu tasarımda Şekil 3.17.'de gösterildiği üzere yanlarda ve alt kısımda olmak üzere 3 adet termoelektrik modül kullanılmıştır. Modüllerin soğutulması amacıyla 60 mm uzunluğunda 11,5 mm yüksekliğinde ve 1 mm kalınlığında kanatlardan yararlanılmıştır. Kanatlar arası boşluk 2 mm olarak belirlenmiştir. Her modül'ün soğutulması için 15 adet kanat kullanılmıştır. Modüllerin yerleştirileceği kısımlarda modül sıcak ve soğuk yüzeylerine tm temas olabilmesi için modül kalınlığında boşluklar bırakılmıştır.

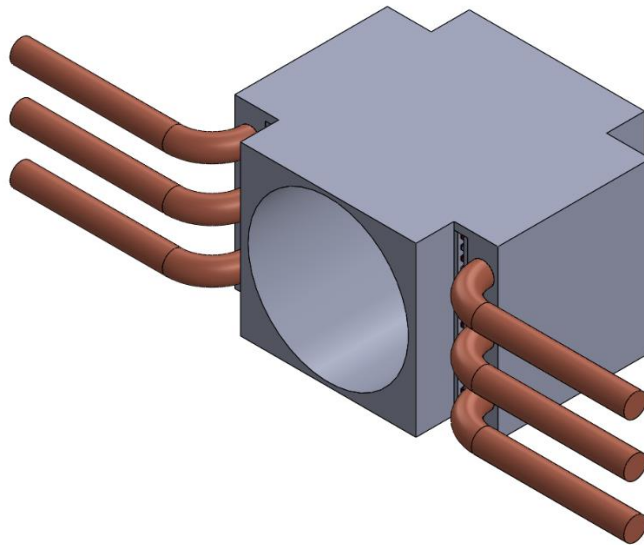
3.6.2. Model 2



Şekil 3.18. Model 2

Bu tasarımda Şekil 3.18.'de gösterildiği üzere model 1'de olduğu gibi üç adet termoelektrik modül kullanılmıştır. Modüllerin soğutulması için levha şeklinde kanat yerine orta kısımlarda 2mm uzunluğunda 1 mm kalınlığında 11,5 mm yüksekliğinde ve akış yönüne göre uç kısımlarda birer sıra olmak üzere 3 mm uzunluğunda dikdörtgen pim şeklinde kanatlar kullanılmıştır. Kanatlar arası boşluk 2 mm bırakılmıştır. Her modül'ün soğutması için 225 adet pim kanat yerleştirilmiştir.

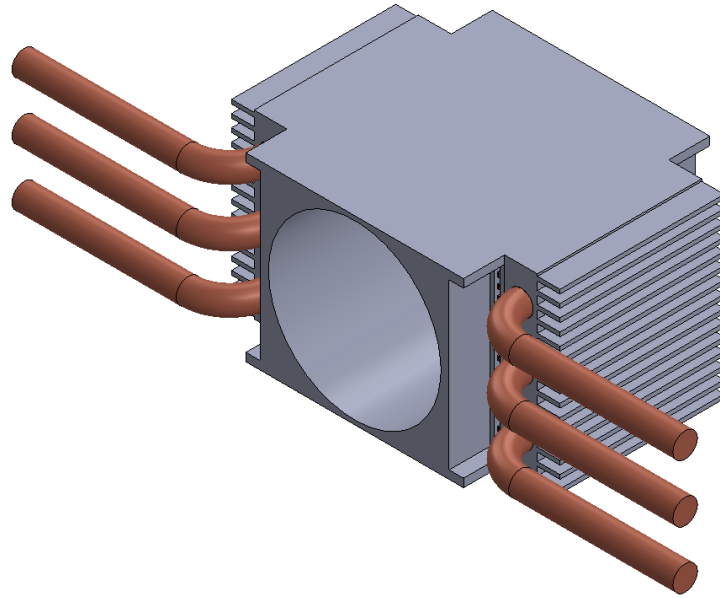
3.6.3. Model 3



Şekil 3.19. Model 3

Bu tasarımda Şekil 3.19.'da gösterildiği üzere sadece yanlarda olmak üzere 2 adet termoelektrik modül kullanılmıştır. Modülleri soğutulması amacıyla kanat yerine yalnızca 6 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda ısı boruları kullanılmıştır. Isı boruları tam ortasından 90 derece açıyla bükülerek yarısı termoelektrik modülün soğuk tarafından ısı alacak şekilde yarısı da rüzgar doğrultusuna dik olup ortama ısı verecek şekilde yerleştirilmiştir. Isı boruları termoelektrik modülün soğuk kısmında alüminyum blok'un 8 mm kalınlığındaki kısmın içine yerleştirilmiştir. Her termoelektrik modül için 3 adet ısı borusu kullanılmıştır. Isı boruları arasında 8mm boşluk bırakılmıştır.

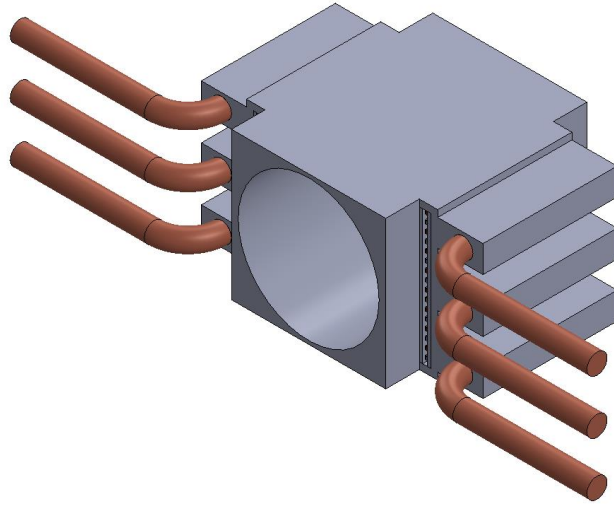
3.6.4. Model 4



Şekil 3.20. Model 4

Bu tasarımda Şekil 3.20.'de gösterildiği üzere önceki model 3'e ek olarak ısı borularının alüminyum blokta içinde bulunduğu kısmın devamına 5,50 mm yüksekliğinde 40 mm uzunluğunda 1 mm kalınlığında kanatlar eklenmiştir. Kanatlar arasında 2 mm boşluk bırakılmıştır. Her termoelektrik modülün soğutucu kısmında 15 adet kanat bulunmaktadır.

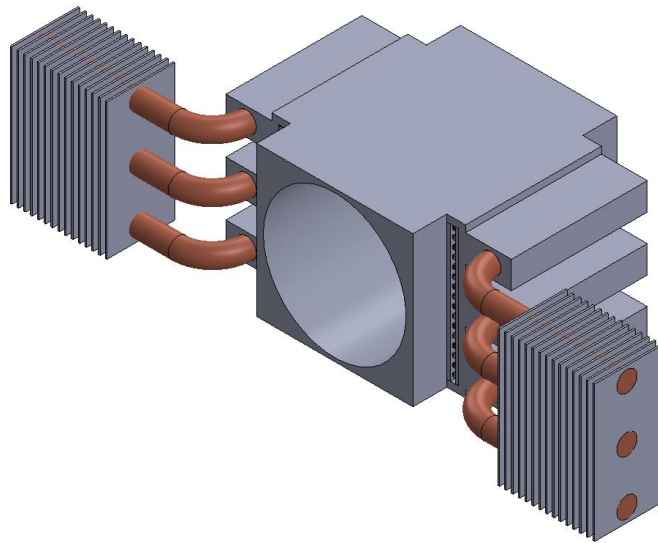
3.6.5. Model 5



Şekil 3.21. Model 5

Bu tasarımda Şekil 3.21.'de gösterildiği üzere 3 ve 4 no'lu modelden farklı olarak ısı boruları alüminyum blok içerisinde 13,5 mm yüksekliğinde 8 mm kalınlığında ve 40 mm uzunluğundaki ısı geçişini arttırmak amaçlı tasarlanmış kısımların içine yerleştirilmiştir. Bu kısımlar arasında 8 mm boşluk bırakılmıştır.

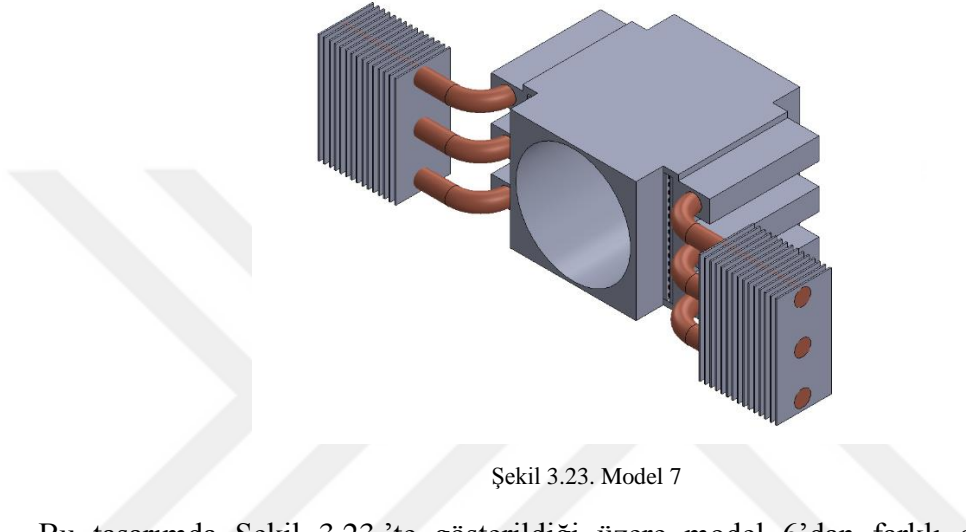
3.6.6. Model 6



Şekil 3.22. Model 6

Bu tasarımda Şekil 3.22.'de gösterildiği üzere model 5'e ilavetenısı borularının yoğunlaştırıcı kısımlarına 1,5 mm aralıklarla he üç ısı borusuna 15 adet gelecek şekilde toplamda 30 adet 0,5mm kalınlığında 40 mm uzunluğunda 20 mm genişliğinde levhalar eklenmiştir.

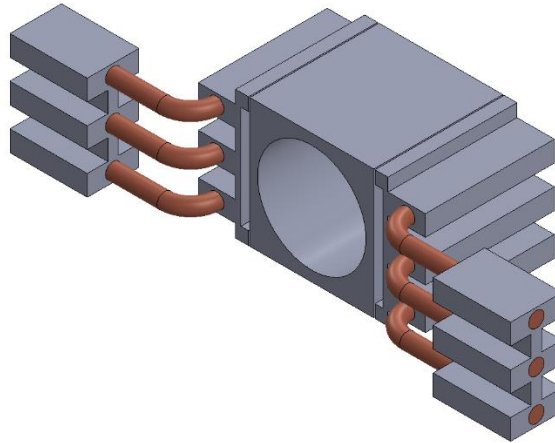
3.6.7. Model 7



Şekil 3.23. Model 7

Bu tasarımda Şekil 3.23.'te gösterildiği üzere model 6'dan farklı olarak gövde yüzeylerindeki ısı geçişini artırıcı kısımların yükseklikleri, yükseklik büyüklüğünün performansa etkisini belirlemek amacı ile 13,5 mm yerine 11,5 mm olarak belirlenip analiz yapılmıştır.

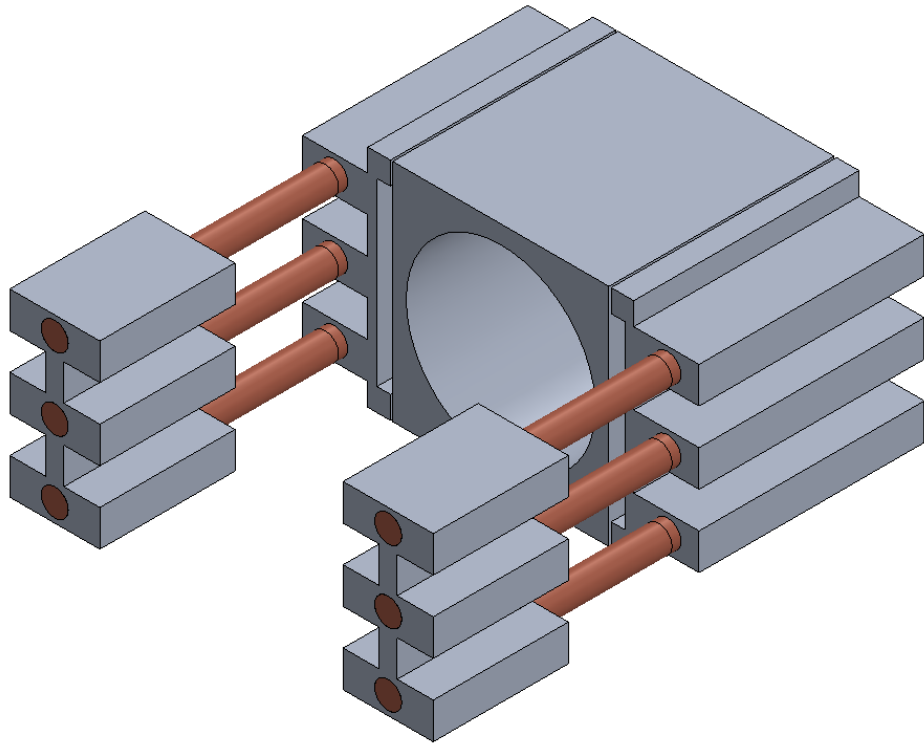
3.6.8. Model 8



Şekil 3.24. Model 8

Bu tasarımda Şekil 3.24.'te gösterildiği üzere önceki tasarımlardan farklı olarak egzoz borusunun bulunduğu kısım ile ısı borularının gövde üzerinde içinden geçirildiği gövde yüzeylerindeki ısı geçişini artırıcı kısımlar birbirinden bağımsız olarak tasarlanmıştır. Bu iki kısım arasında 0,5 mm'lik boşluk bırakılmıştır. Bu şekilde, arada hava ile direnç oluşturularak sıcak ve soğuk parçalar arasında ısı geçişinin azaltılması yani modülün soğuk yüzünün daha soğuk olabilmesi amaçlanılmıştır. Bu iki kısım 4 adet cıvata ile köşe kısımlarından bağlanmıştır. Gövde yüzeylerindeki ısı geçişini artırıcı kısımların yüksekliği 14,5 mm olarak belirlenmiştir. Isı borularının uzunlukları piyasada daha kolay bulunan 120 mm'lik borular baz alınarak arttırılmıştır. Isı borularının yoğunlaştırıcı kısımlarına daha kolay üretim amacı ile levhalar yerine 20 mm uzunluğunda alüminyum bloktan işlenecek şekilde ısı geçişini artırıcı parçalar eklenmiştir.

3.6.9. Model 9

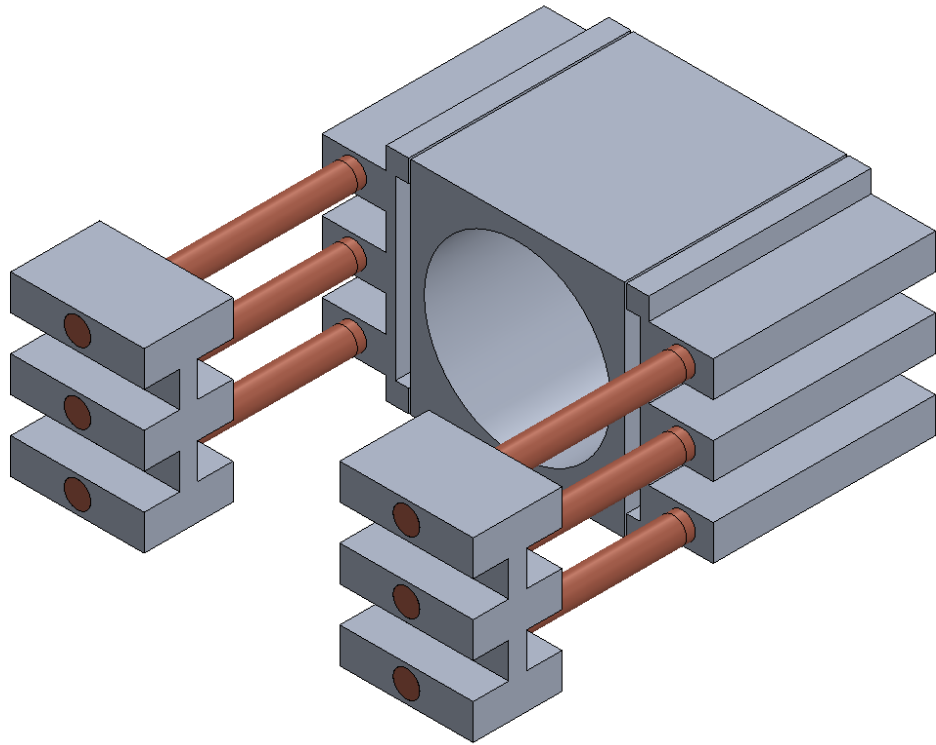


Şekil 3.25. Model 9

Bu tasarımda Şekil 3.25.'te gösterildiği üzere üretime kolaylık getirmesi amacı ile ısı boruları büküm yerine düz olarak kullanılmıştır.

Model 9 baz alınarak prototip üretilmiş ve bu prototip ile laboratuvar ortamında deneyler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.6.10. Model 10

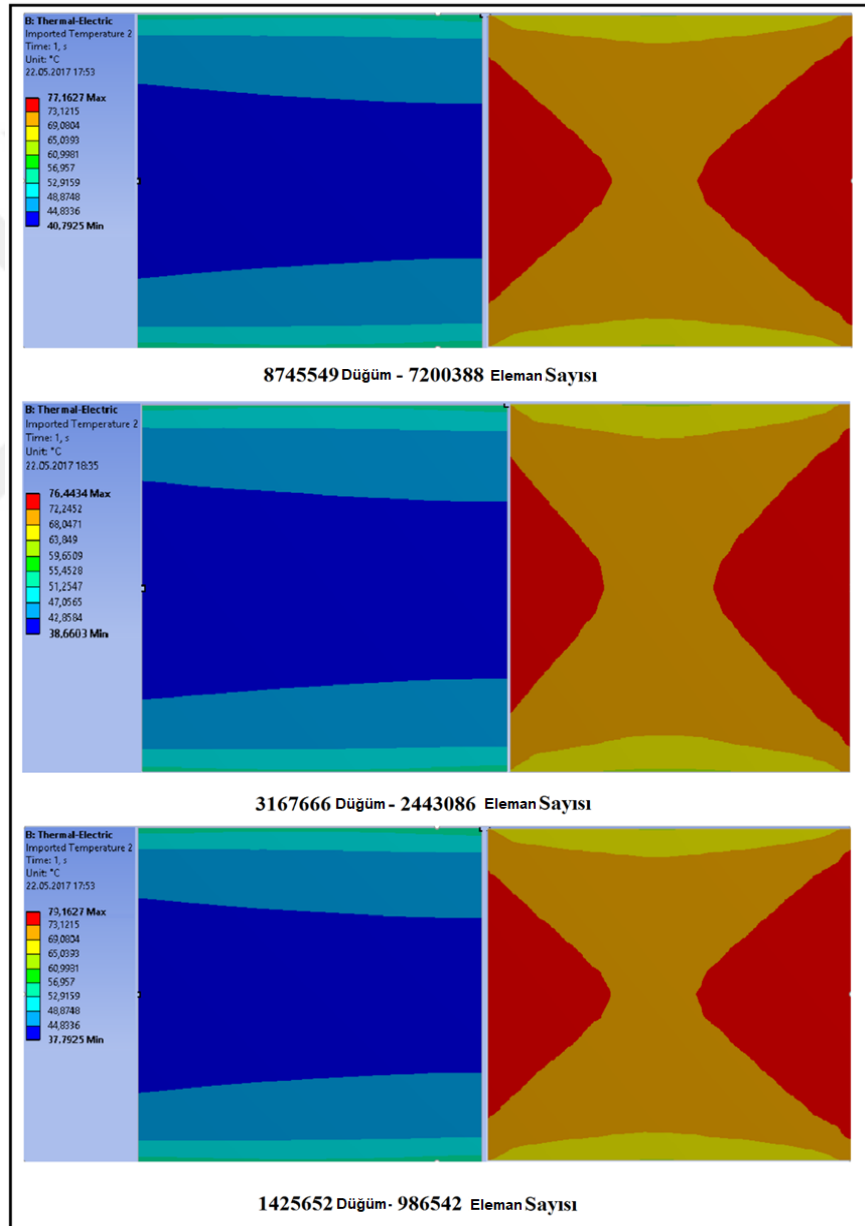


Şekil 3.26. Model 10

Bu tasarımda Şekil 3.26.'da gösterildiği üzere model 9'dan farklı olarak ısı borularının yoğunlaştırıcı kısımlarındaki geometriler, oryantasyonun elektrik üretimine etkisini gözlemleyebilmek amacı ile rüzgar yönüne dik olarak konumlandırılmıştır.

3.7. Ağ Yapıları İçin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırması

Aynı model üzerinde aynı şartlarda 3 farklı ağ yoğunluğu ile analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere ağ yoğunluğu azaldıkça sıcaklık dağılımındaki aralık genişlemekte, ağ yoğunluğu arttıkça çözüm süresi Tablo 3.1.'de görüldüğü üzere kayda değer miktarda artmaktadır. Bu sebeple analizlerin tamamında Şekil 3.27.'de görülmekte olan “3167666 düğüm – 2443086 eleman” sayılı analiz gerçekleştirildiği, Şekil 3.83.'deki ağ yapısı konfigürasyonu kullanılmıştır.

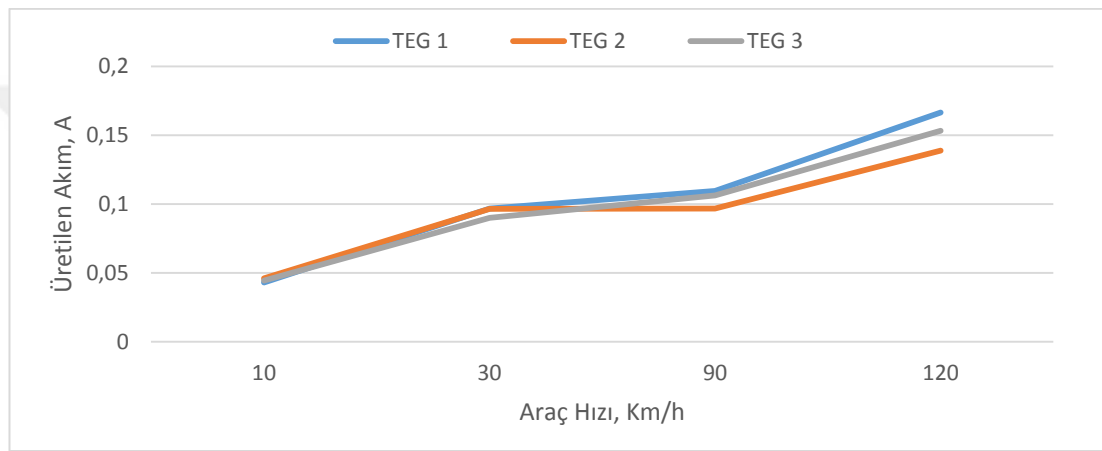


Şekil 3.27. Farklı düğüm ve eleman sayılarında sıcaklık dağılımları

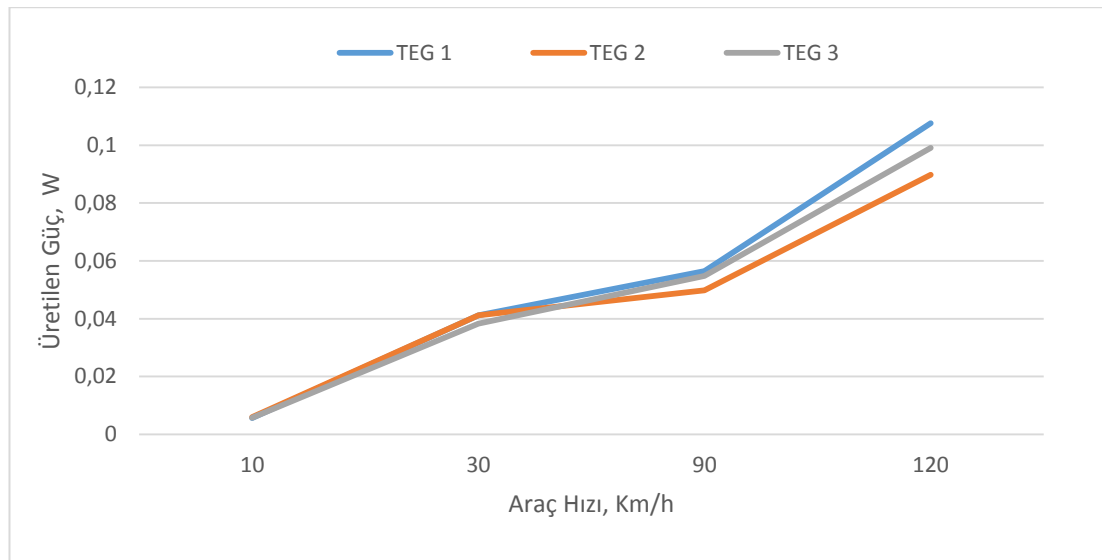
3.8. Model 1 İçin Analiz Sonuçları

3.8.1 Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları

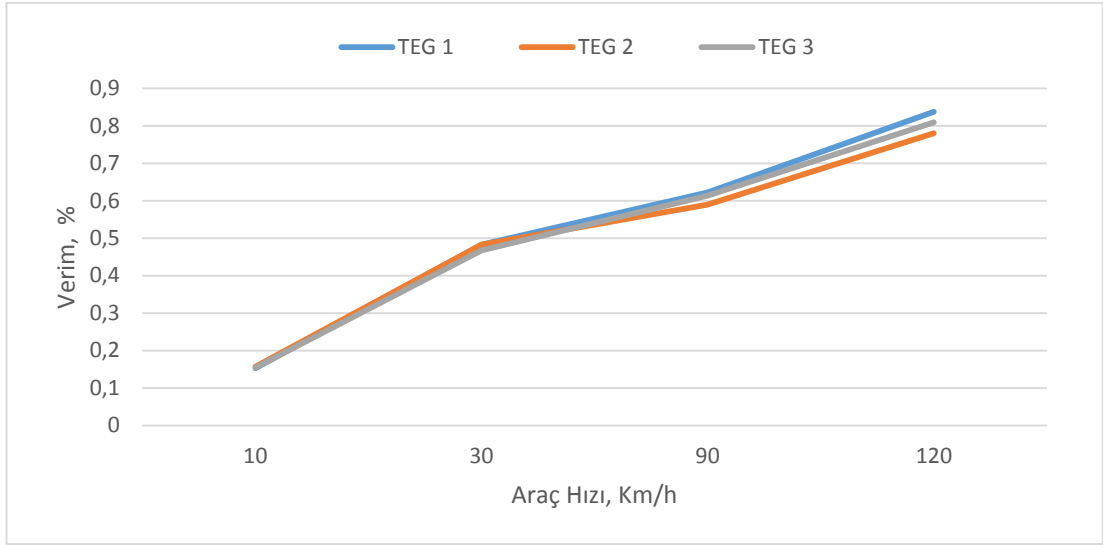
Yapılan analizler sonucunda araç hızı arttıkça, motor devrinin artışının ve buna bağlı olarak egzoz gazı sıcaklığının artışının etkisi ile modüllerin iki yüzü arasındaki sıcaklık farkının artması ile üretilen akım, üretilen güç ve verimin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.28. Model 1 için farklı hız ve değişken motor devrinde akım grafiği



Şekil 3.29. Model 1 için farklı hız ve değişken motor devrinde güç grafiği



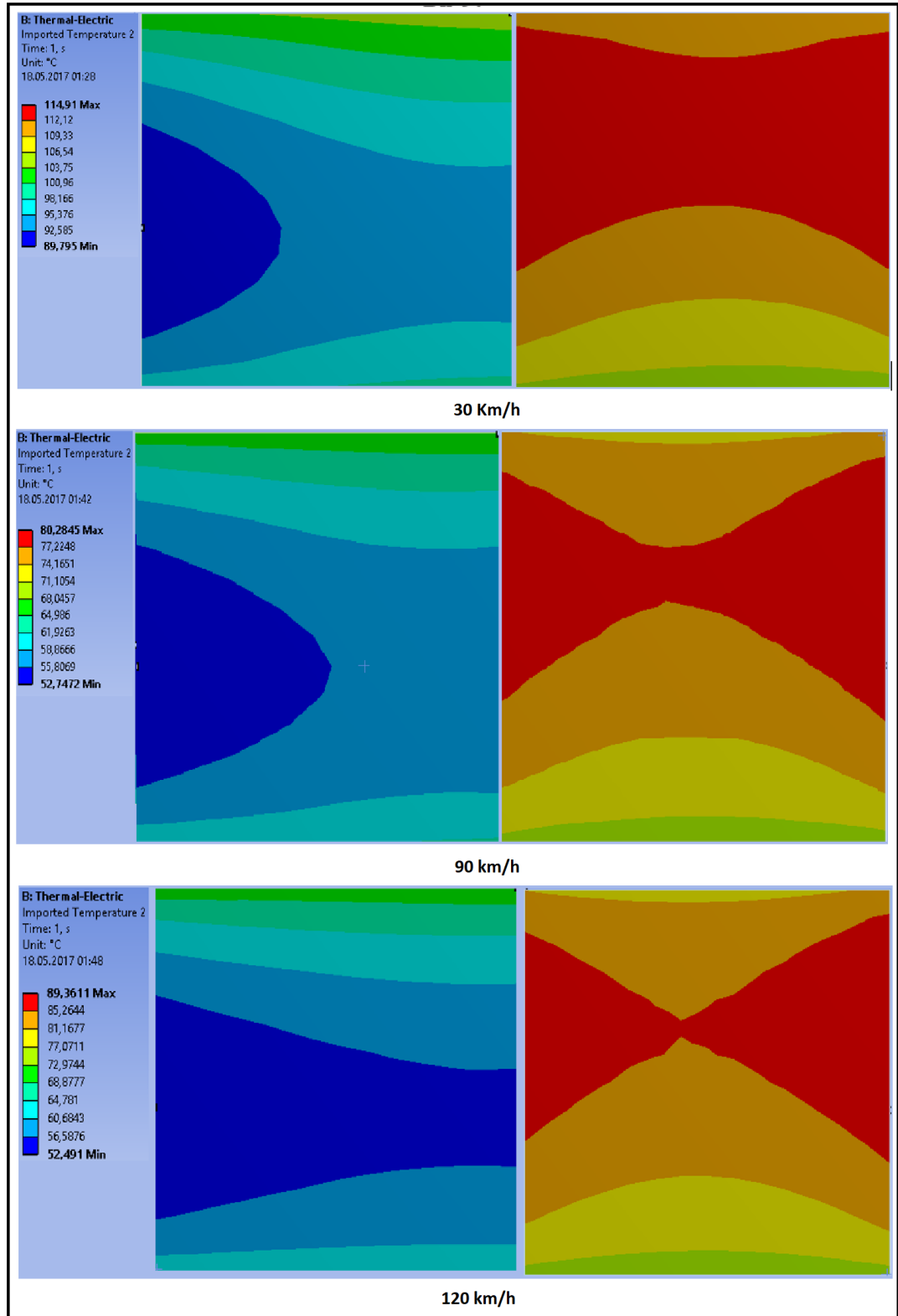
Şekil 3.30. Model 1 için farklı hız ve değişken motor devrinde verim grafiği

Şekil 3.28., 3.29. ve 3.30.'da gösterildiği üzere üretilen akım, üretilen güç ve verim'de aracın 10 km/h ile 120 km/h hızlarındaki hareketleri arasında 5 kata yakın fark olduğu gözlemlenmiştir. 120 km/h hızda yaklaşık %1'lik verime ulaşılmıştır.

Soğutma kısmı için; kanatlı ısı alıcı'nın tek başına modülün soğuk yüzeyi üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamakta başarısız olduğu gözlemlenmiştir. Rüzgarın ısı alıcıya giriş ve ısı alıcıdan çıkış yaptığı noktalar arasında, düşük araç hızlarında rüzgar hızının düşmesi ile birlikte 5 °C'ye yaklaşan farkların oluştuğu, araç hızı arttıkça bu farkın azaldığı gözlemlenmiştir.

Araç hızı arttıkça rüzgarın etkisinin, rüzgarın ısı alıcıdan aktığı yönde arttığı ve rüzgarın ısı alıcıdan çıktığı noktaya doğru sıcaklıkların düşme eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklıkların daha yüksek yüzey alanına yayılması ile TEG performansı artmıştır.

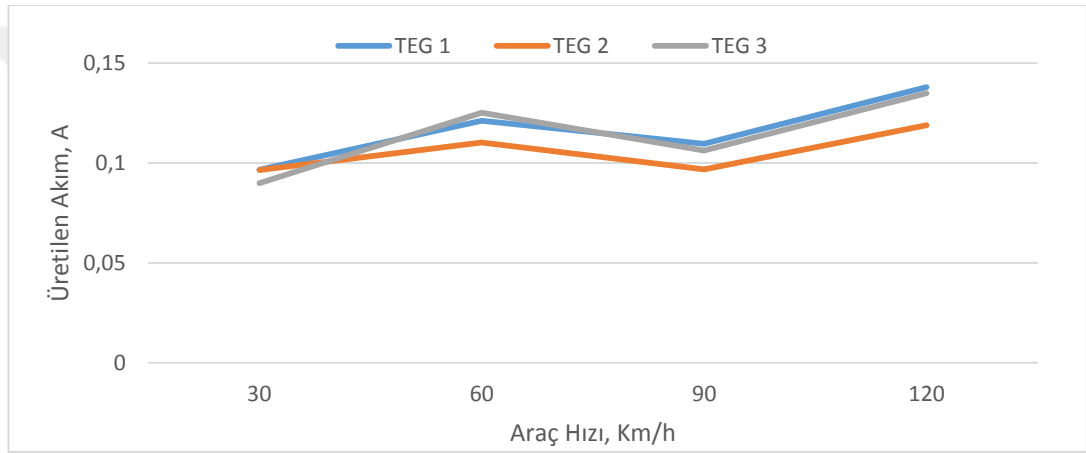
Sırasıyla 10 km/h, 30 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.31.'de görülebileceği üzere ortalama 5 °C, 16 °C, 20 °C ve 25 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.



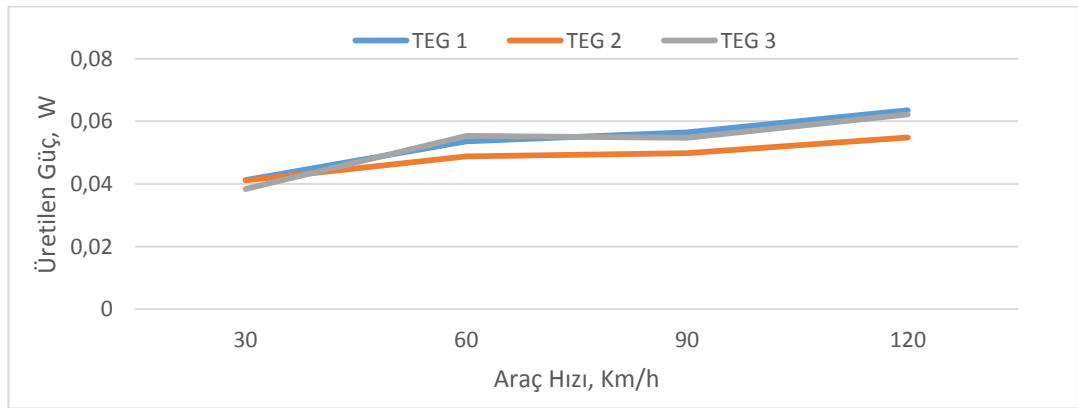
Şekil 3.31. Model 1 için farklı hız ve motor devrinde sıcaklık dağılımları

3.8.1. Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları

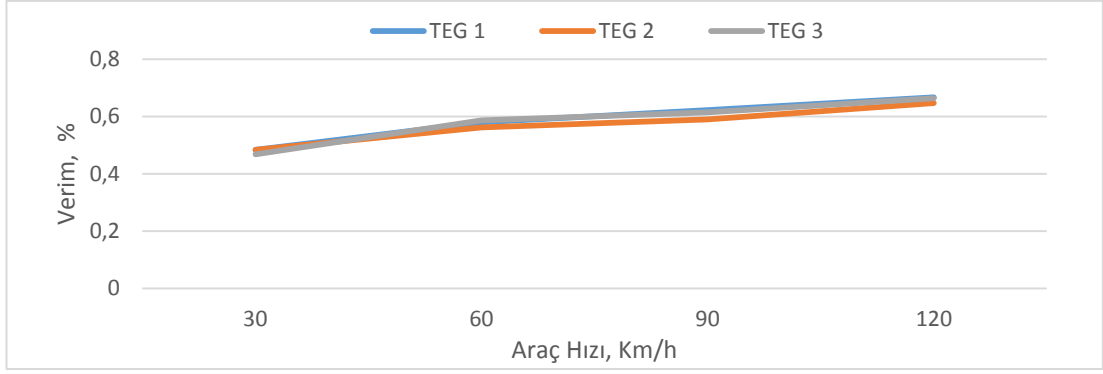
Yapılan analizler sonucunda araç hızı arttıkça, modüllerin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkında ufak artışlar ile (1 °C - 2 °C) ve bazı hızlar arasında sıcaklık farkı sabit kalmasına rağmen (90 km/h ve 120 km/h arasında) rüzgar etkisi ile birlikte modüllerin iki yüzeyinin sıcaklıklarının birlikte düşmesi ve düşük sıcaklıklarda modüllerin daha performanslı çalışmasından ötürü Şekil 3.32., Şekil 3.33. ve Şekil 3.34.'de gösterildiği üzere üretilen akım, üretilen güç ve verimin artma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.32. Model 1 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği

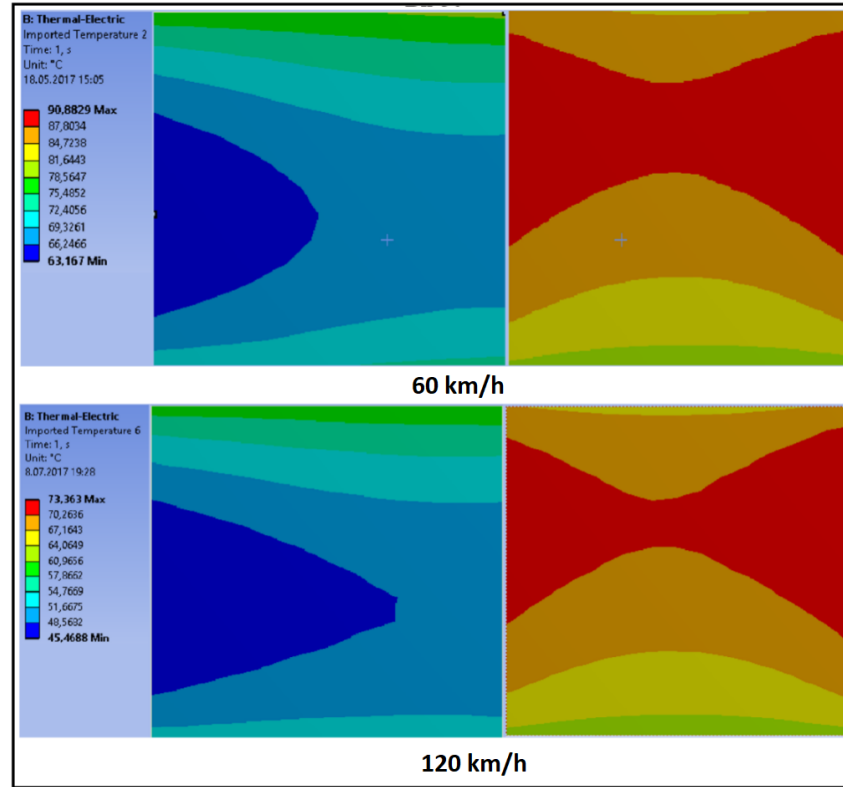


Şekil 3.33. Model 1 için farklı hız ve sabit motor devrinde güç grafiği



Şekil 3.34. Model 1 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği

2500 devir/dakika sabit motor devrinde yapılan analizler sonucunda bulunan verimin hız artışı ile birlikte değişiminin aynı model ile aynı hızlarda fakat farklı motor devirlerinde yapılan analizlerdeki değişimler ile benzer olduğu, aracın 120 km/h hızındaki hareketinde motor devrindeki 500 devir/dakika, egzoz gazı sıcaklığındaki 50 °C ve egzoz gazı hızındaki 5 m/s farkın yaklaşık % 20 verim, % 40 güç ve % 20'lik üretilen akım farkına neden olduğu görülmüştür.



Şekil 3.35. Model 1 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları

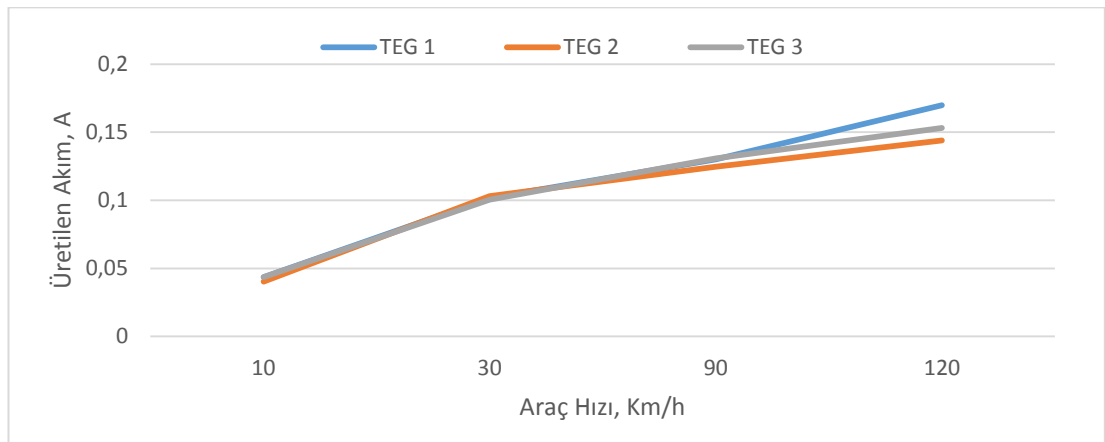
Sırasıyla 2500 devir/dakika motor devrinde 60 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.35.'te görülebileceği üzere ortalama 17 °C ve 20 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.

3.9. Model 2 İçin Analiz Sonuçları

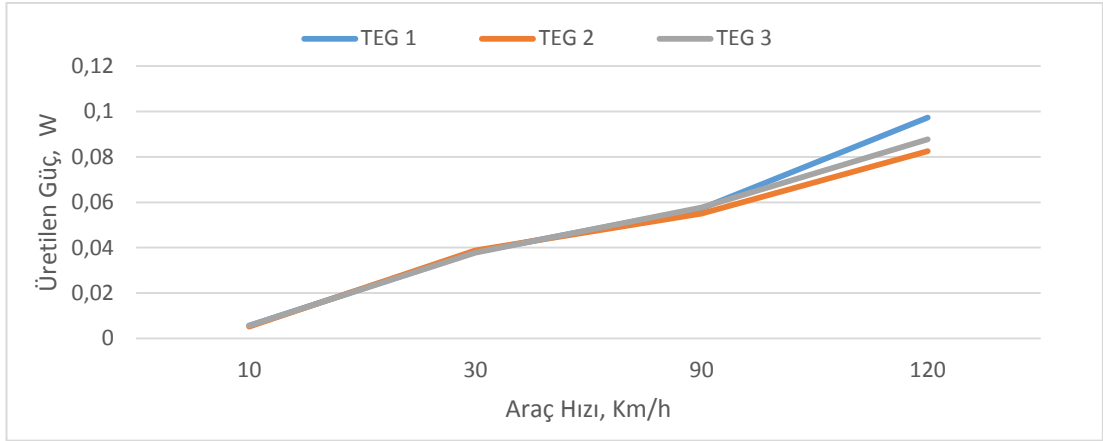
3.9.1 Farklı hız ve değişken motor devrinde analiz sonuçları

Yapılan analizler sonucunda araç hızı arttıkça, motor devrinin artışının ve buna bağlı olarak egzoz gazı sıcaklığının artışının etkisi ile TEG'in iki yüzü arasındaki sıcaklık farkının artması ile üretilen akım, üretilen güç ve verimin arttığı gözlemlenmiştir. Model 1'e göre aynı araç hızlarında Şekil 3.36., Şekil 3.37. ve Şekil 3.38.'de gösterildiği üzere, üretilen akım, güç ve verimde negatif yönde % 3-4 gibi çok ufak miktarlarda değişiklikler olmuştur.

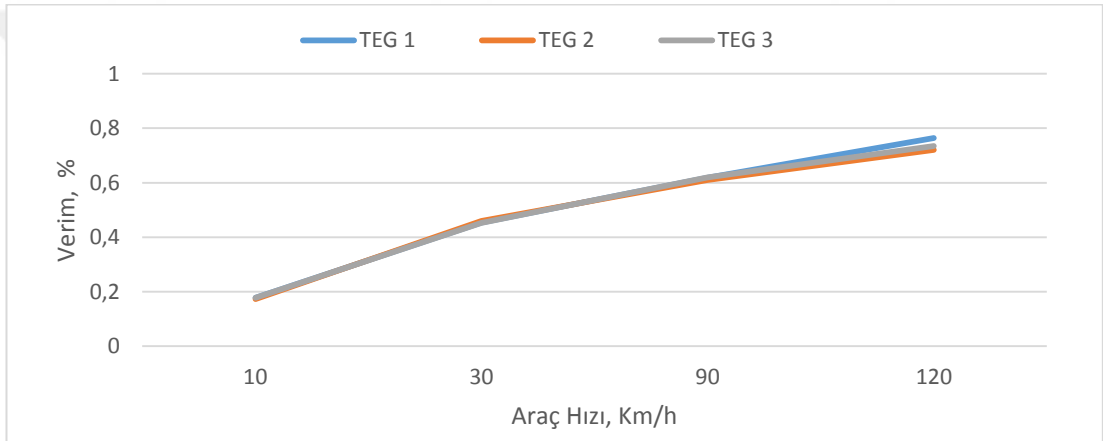
Soğutma gücünün kayda değer bir şekilde düştüğü görülmektedir. (Aynı noktalar baz alındığında Model 1'e göre 5 °C -10 °C arasında.) Bu da pim şeklinde kanatlı ısı alıcı performansının bu çalışmadaki kullanım tarzında levha kanatlı ısı alıcıya göre daha verimsiz olduğunu göstermektedir. Aynı model 1'deki gibi tek başına modülün soğuk yüzeyi üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamakta başarısız olduğu gözlemlenmiştir



Şekil 3.36. Model 2 için farklı hız ve değişken motor devrinde akım grafiği



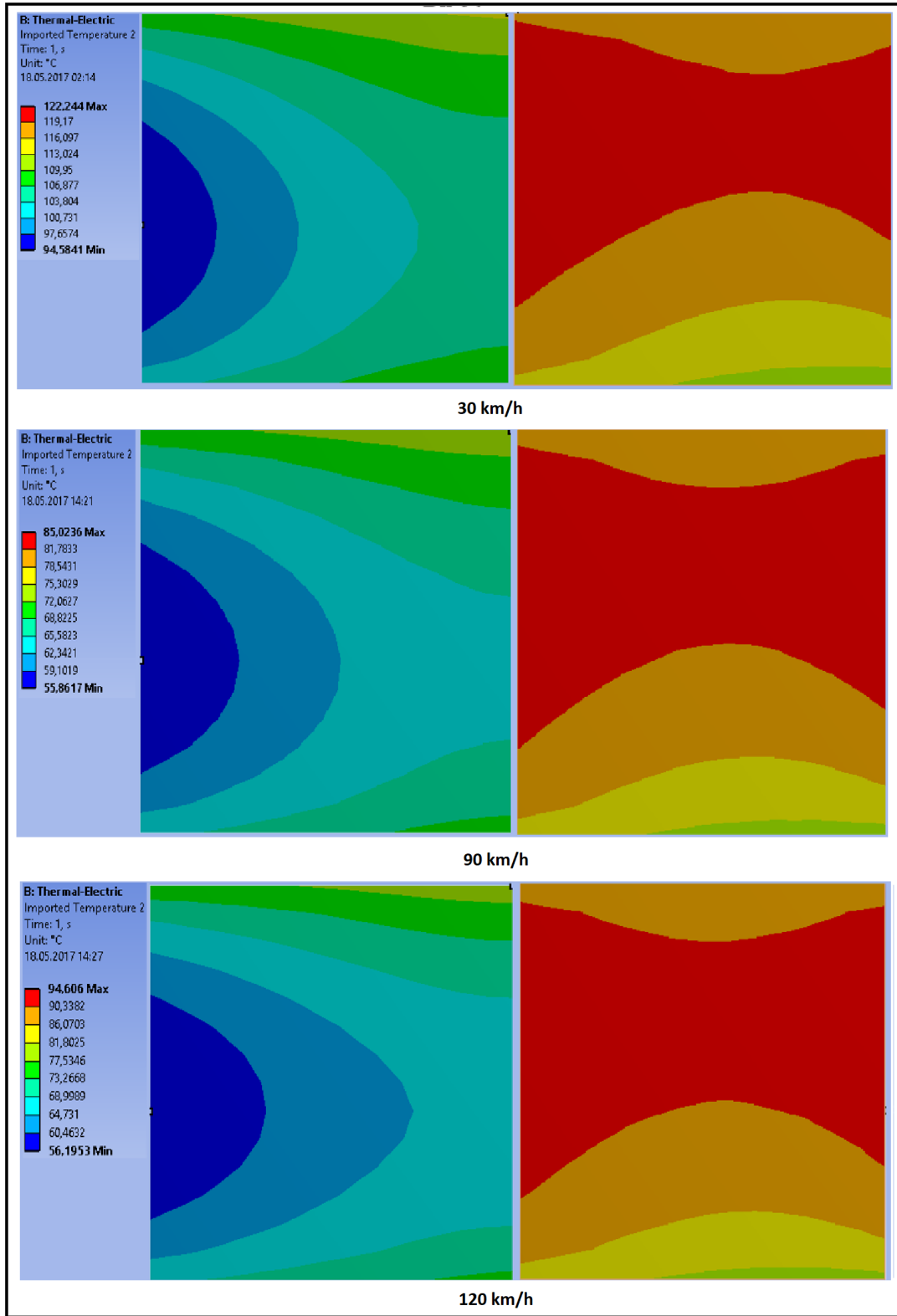
Şekil 3.37. Model 2 için farklı hız ve değişken motor devrinde güç grafiği



Şekil 3.38. Model 2 için farklı hız ve değişken motor devrinde verim grafiği

Sırasıyla 10 km/h, 30 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.39.'da görülebileceği üzere ortalama 5 °C, 14 °C, 17 °C ve 22 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur. Aynı araç hızlarındaki sıcaklık farkları Model 1'e göre 2 °C – 3 °C arasında azalma göstermiştir.

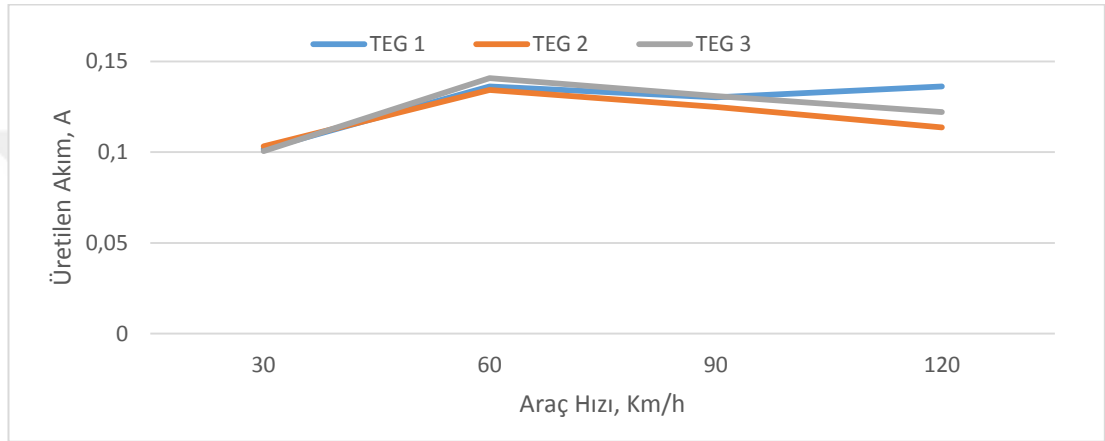
Model 1'de olduğu gibi araç hızı arttıkça rüzgarın etkisinin, rüzgarın ısı alıcıdan aktığı yönde arttığı ve rüzgarın ısı alıcıdan çıktığı noktaya doğru sıcaklıkların düşme eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Fakat bu oran model 1'e göre oldukça düşük kalmış ve özellikle 120 km/h hızda karşılaştırılma yapıldığında soğuk yüzde rüzgarın ısı alıcıdan çıkış yaptığı taraftaki etkisinin model 1'e göre oldukça geride kaldığı, soğutma gücünün azaldığı görülmüştür.



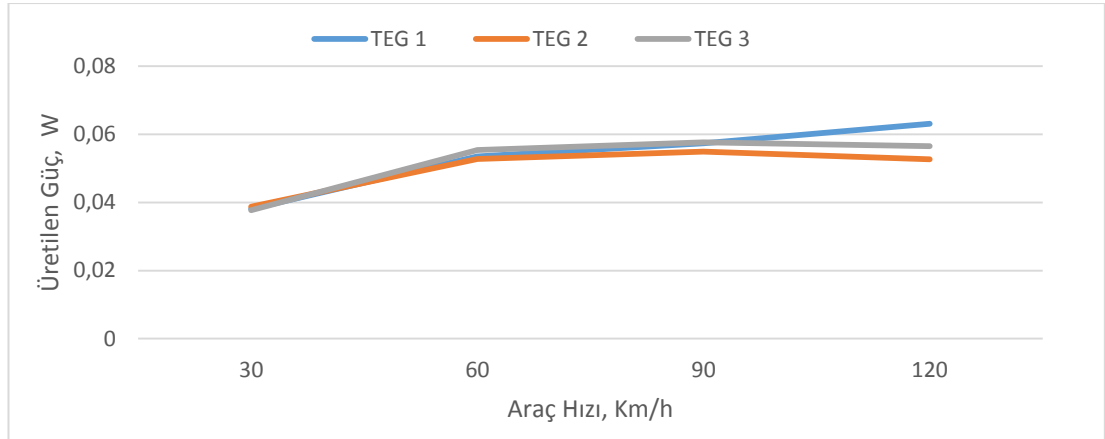
Şekil 3.39. Model 2 için farklı hız ve motor devrinde sıcaklık dağılımları

3.9.1. Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları

Yapılan analizler sonucunda araç hızı arttıkça, modüllerin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkında ufak artışlar ($1^{\circ} - 2^{\circ}\text{C}$) ve rüzgar etkisi ile modüllerin iki yüzeyinin sıcaklıklarının birlikte düşmesi ve düşük sıcaklıklarda TEG'lerin daha performanslı çalışmasından ötürü Şekil 3.40., Şekil 3.41. ve Şekil 3.42.'de gösterildiği üzere üretilen akım, üretilen güç ve verimin artma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir

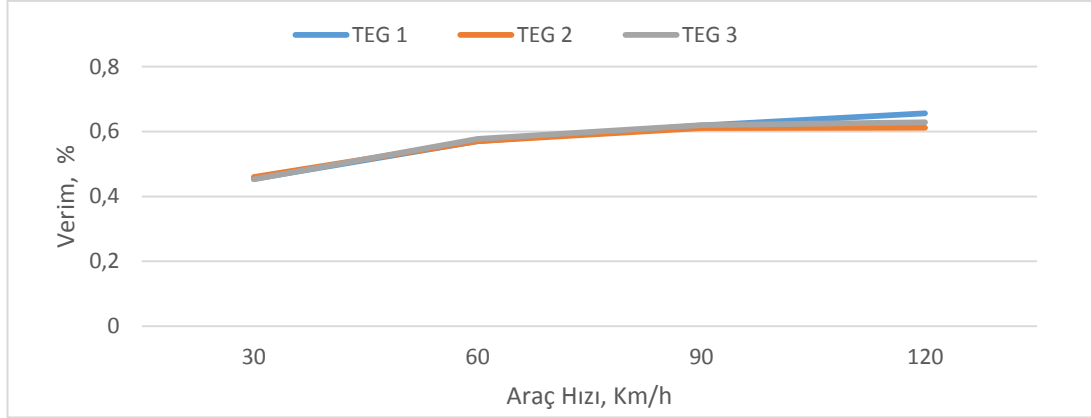


Şekil 3.40. Model 2 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği



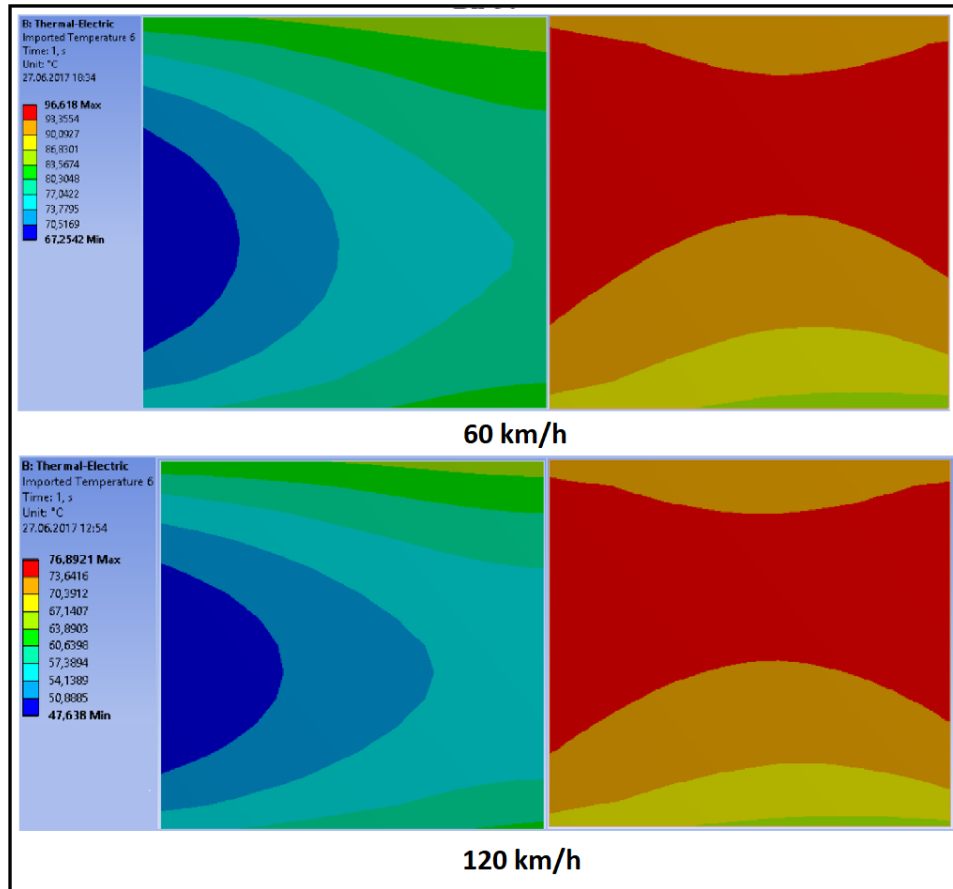
Şekil 3.41. Model 2 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği

Aynı şartlarda (aynı motor devri ve araç hızı) model 1'e göre verim, üretilen güç ve akım'da yaklaşık %3 'lük azalmalar gözlemlenmiştir.



Şekil 3.42. Model 2 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği

Sırasıyla 2500 devir/dakika motor devrinde 60 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.43.'de görülebileceği üzere ortalama 15 °C ve 18 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur. Aynı araç hızlarındaki sıcaklık farkları model 1'e göre 2 °C azalma göstermiştir.



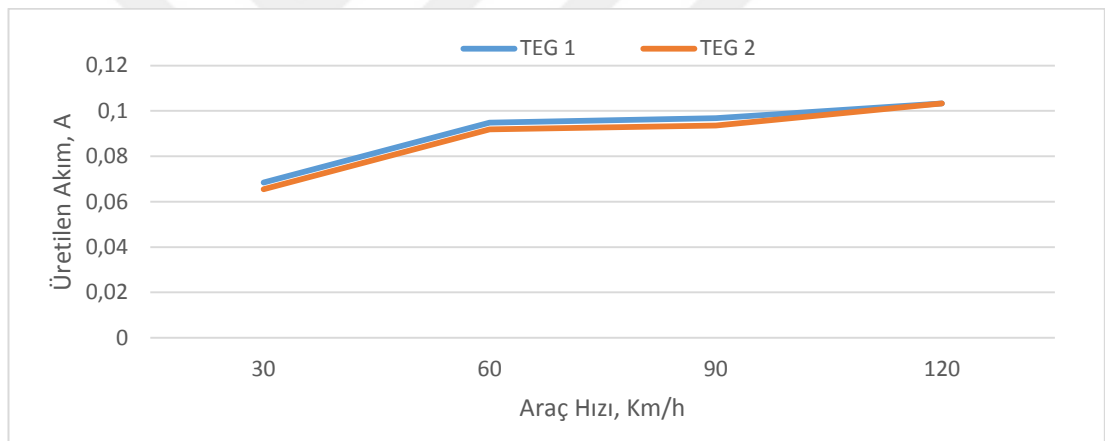
Şekil 3.43. Model 2 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları

3.10. Model 3 İçin Analiz Sonuçları

3.10.1 Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları

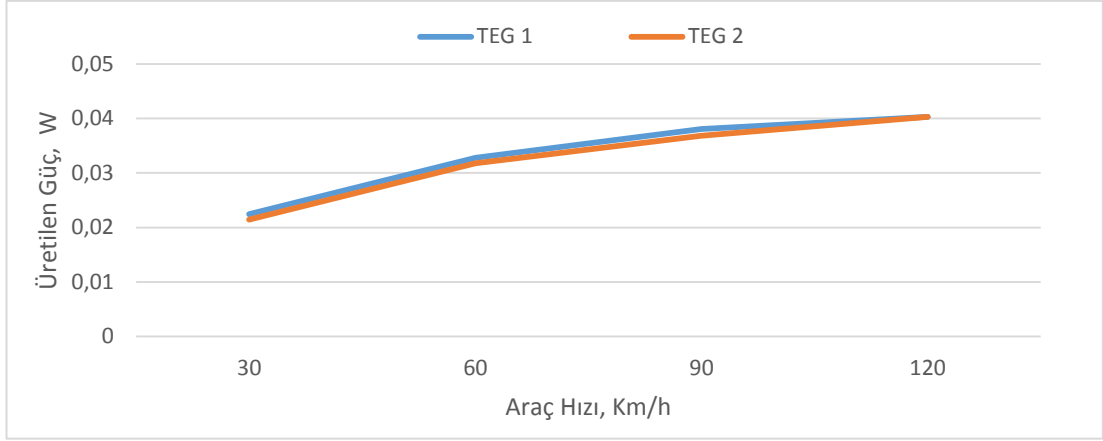
Yapılan analizler sonucunda kullanılan ısı borularının modüllerin soğuk yüzeylerinde oldukça homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığı görülmüş olmasına rağmen boruların gövde içerisine girdiği kısımda bir ısı alıcıya yer verilmemesi sebebiyle sıcaklıkların Model 1'e göre soğuk yüzeyde 30 ° C- 35 ° C, sıcak yüzeyde 15 ° C - 20 ° C arasında artış gösterdiği görülmüştür.

Bu model için yapılan analizlerden sonra nihai modelde kesin olarak ısı borusu kullanılmasına karar verilmiştir.

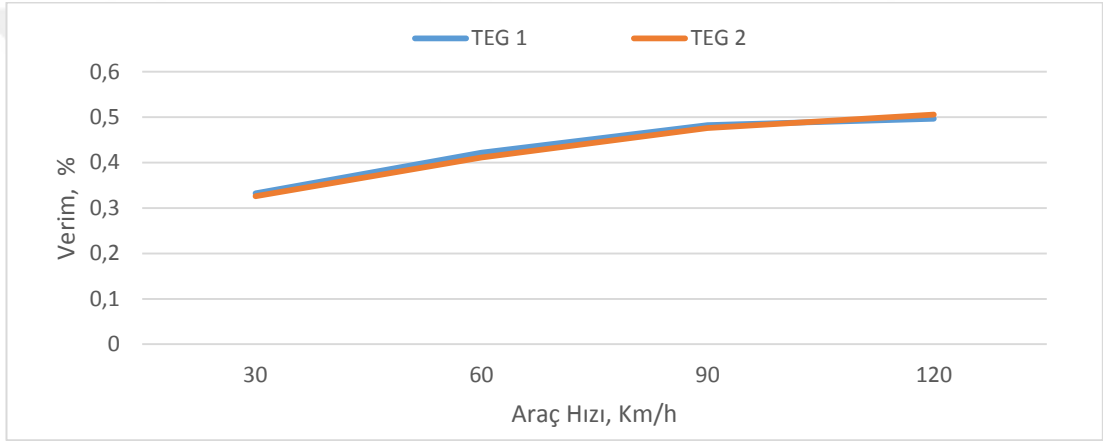


Şekil 3.44. Model 3 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği

Araç hızı arttıkça, TEG'lerin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkında ufak artışlar ile (1 °C - 2 °C) ve bazı hızlar arasında sıcaklık farkı sabit kalmasına rağmen (90-120 km/h arasında) rüzgar etkisi ile birlikte modüllerin iki yüzeyinin sıcaklıklarının birlikte düşmesi ve düşük sıcaklıklarda modüllerin daha performanslı çalışmasından ötürü Şekil 3.44., 3.45. ve 3.46.'da gösterildiği üzere, üretilen akım, üretilen güç ve verimin artma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir.

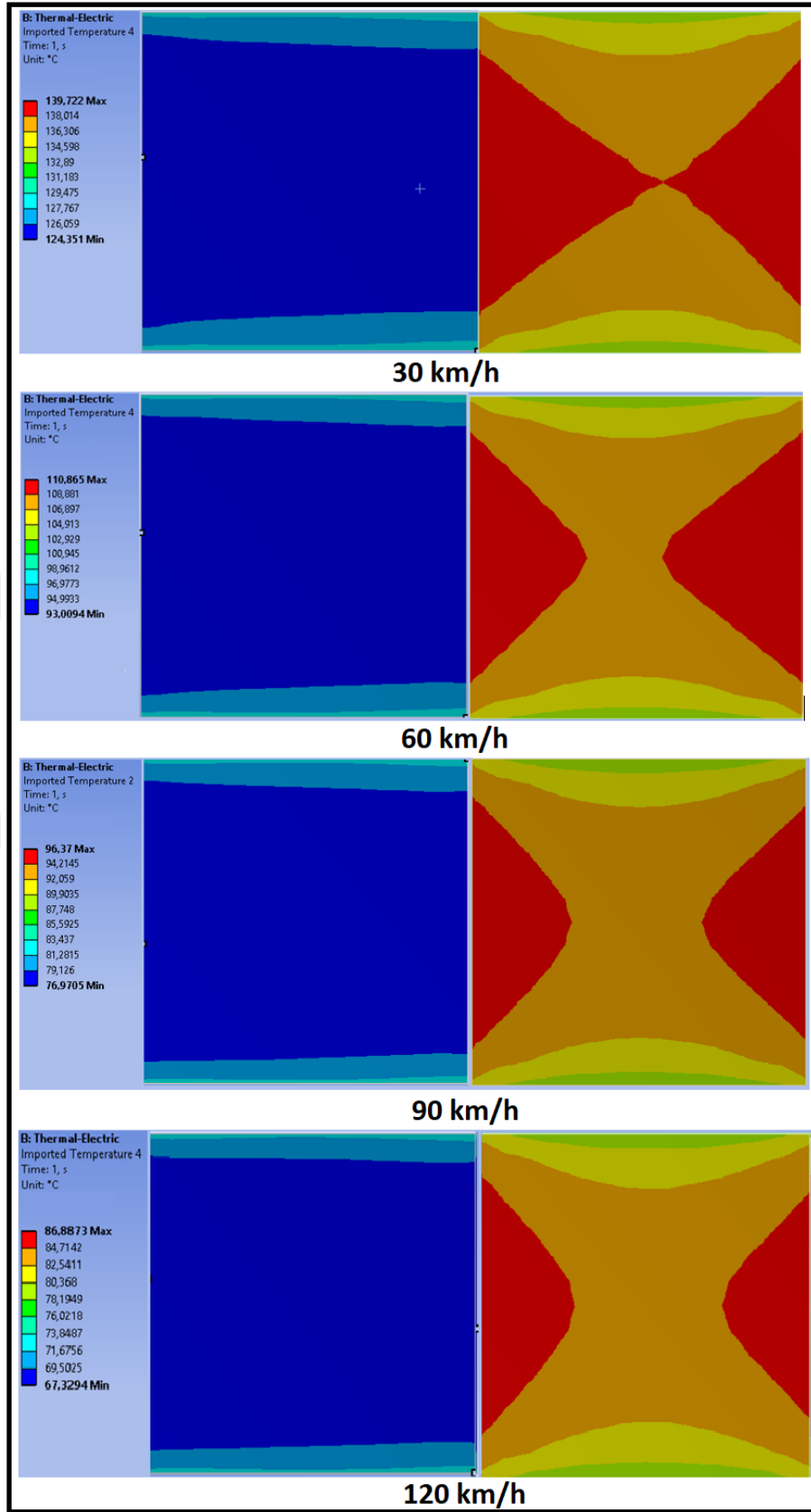


Şekil 3.45. Model 3 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği



Şekil 3.46. Model 3 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği

Yükselen sıcaklıklar ve yüzeyler arasında düşen sıcaklık farklarından ötürü modüllerin genel performansında bazı noktalarda model 1'e göre %30'a yakın düşüşler olmuştur. Artan araç hızı ile sıcaklıkların modüllerin iki yüzünde de düştüğü fakat sıcaklık dağılım görüntülerinin benzer olduğu, ısı borularının sıcaklık dağılımında stabiliteyi sağlamada etkili olduğu gözlemlenmiştir. Sırasıyla 10 km/h, 30km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.47.'de görülebileceği üzere ortalama 5 °C, 12 °C, 13 °C, 15 °C ve 15 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.



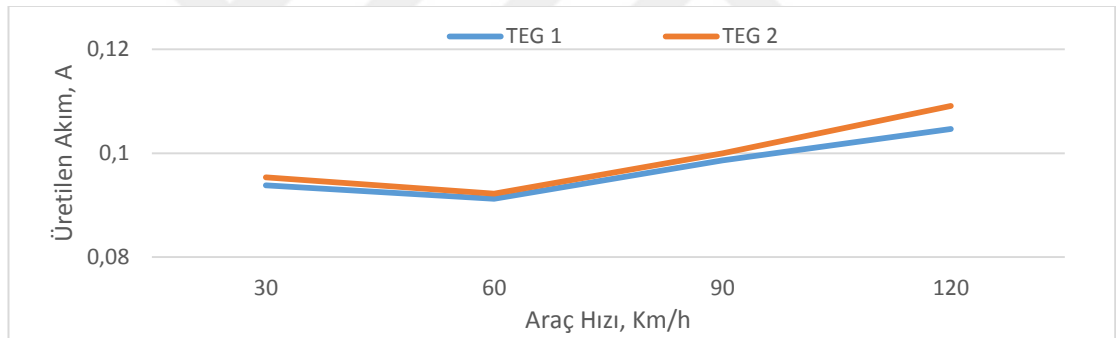
Şekil 3.47. Model 3 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları

3.11. Model 4 İçin Analiz Sonuçları

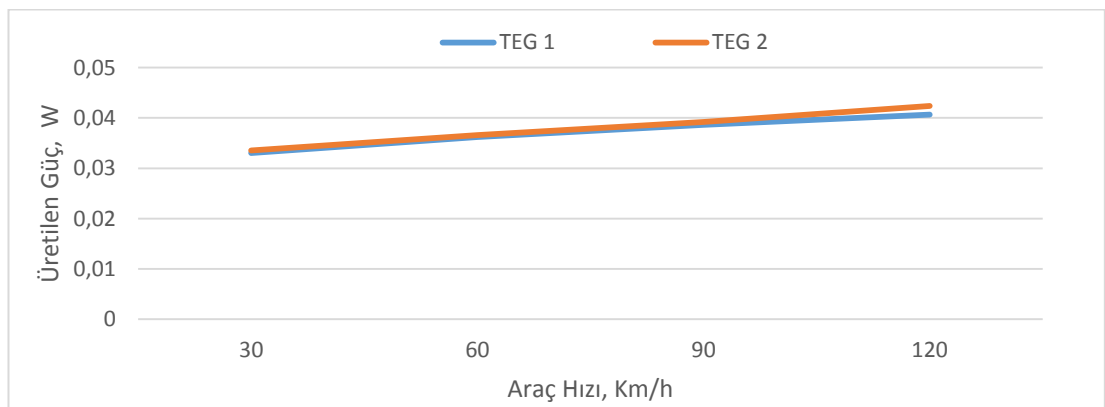
3.11.1 Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları

Yapılan analizler sonucunda kullanılan ısı borularının modüllerin soğuk yüzünde yine sıcaklık dağılımında homojenlik sağladığı ve Model 1'deki kullanılan ısı alıcı kanatlardan 6mm daha kısa olan 5,5 mm yüksekliğindeki kanatların modüllerin soğuk ve sıcak yüzünde model 3'e göre yaklaşık 8 °C - 10 °C sıcaklık düşüşü sağladığı görülmüştür.

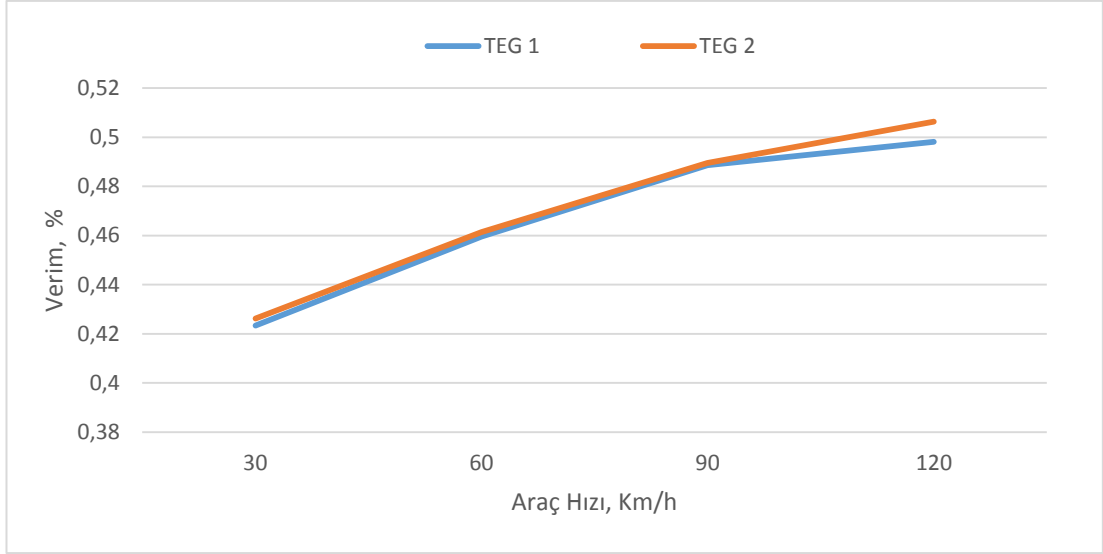
Ayrıca Model 3'e göre bütün hızlarda üretilen akımda belirli artışlar olduğu gözlemlenmiş. Özellikle 30 km/h hızda eklenen kanatlar'ın bir sonucu olarak akımın %40'a yakın arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.48. Model 4 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği



Şekil 3.49. Model 4 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği

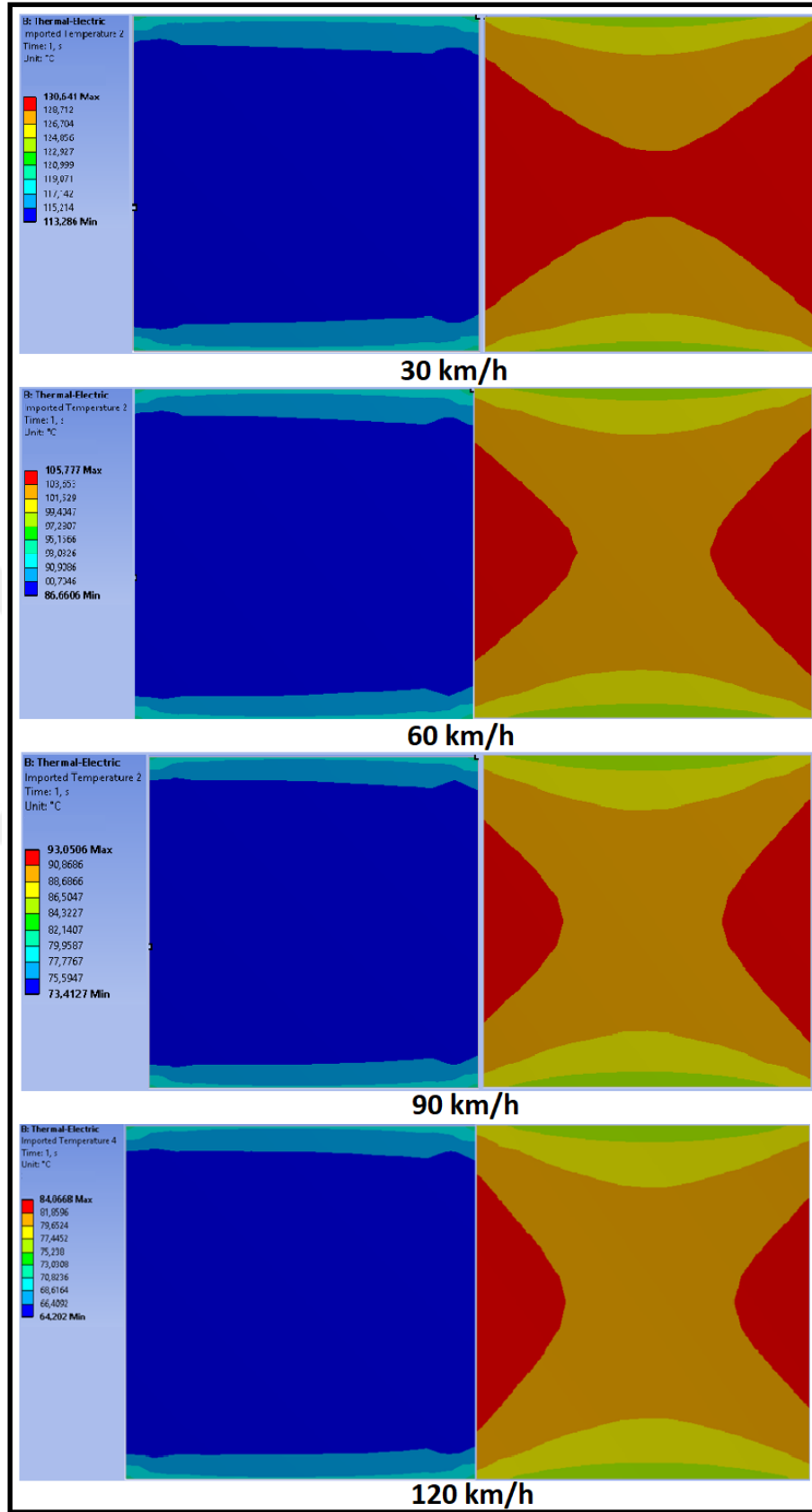


Şekil 3.50. Model 4 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği

Araç hızı arttıkça, modüllerin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkında ufak artışlar ile (2 °C) ve bazı hızlar arasında sıcaklık farkı sabit kalmasına rağmen (60-90-120 km/h arasında) rüzgar etkisi ile birlikte modüllerin iki yüzeyinin sıcaklıklarının birlikte düşmesi ve düşük sıcaklıklarda modüllerin daha performanslı çalışmasından ötürü Şekil 3.48., Şekil 3.49. ve Şekil 3.50.'de gösterildiği üzere üretilen akım, üretilen güç ve verimin artma eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir.

60 km/h hızdan itibaren araç hızındaki artışın yüzler arasındaki sıcaklık farkını etkilemediği gözlemlenmiştir. Yinede 90 km/h ve 120 km/h 'de her iki yüzdede yaklaşık 10 °C sıcaklık düşüşü meydana gelmiş bu da modüllerin performansını arttırmıştır.

Sırasıyla 10 km/h, 30km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.51.'de görülebileceği üzere ortalama 6 °C, 13 °C, 15 °C, 15 °C ve 15 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.

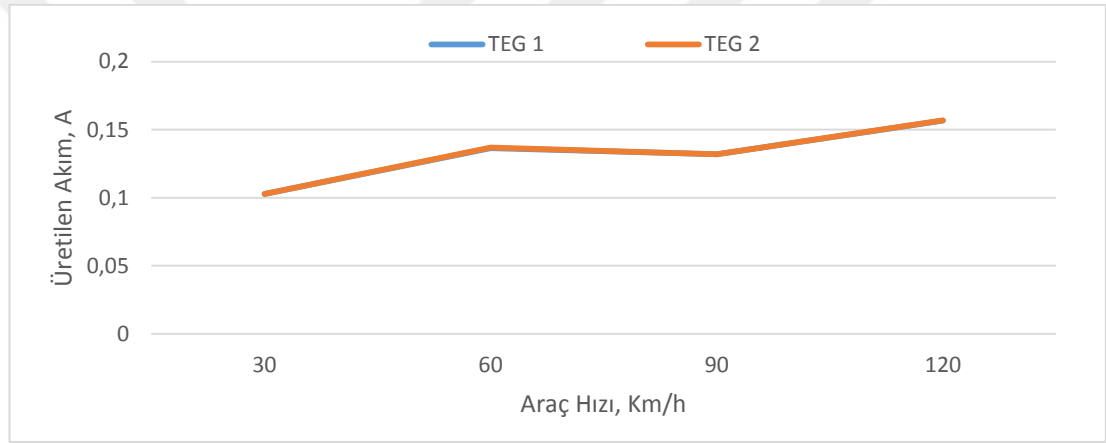


Şekil 3.51. Model 4 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları

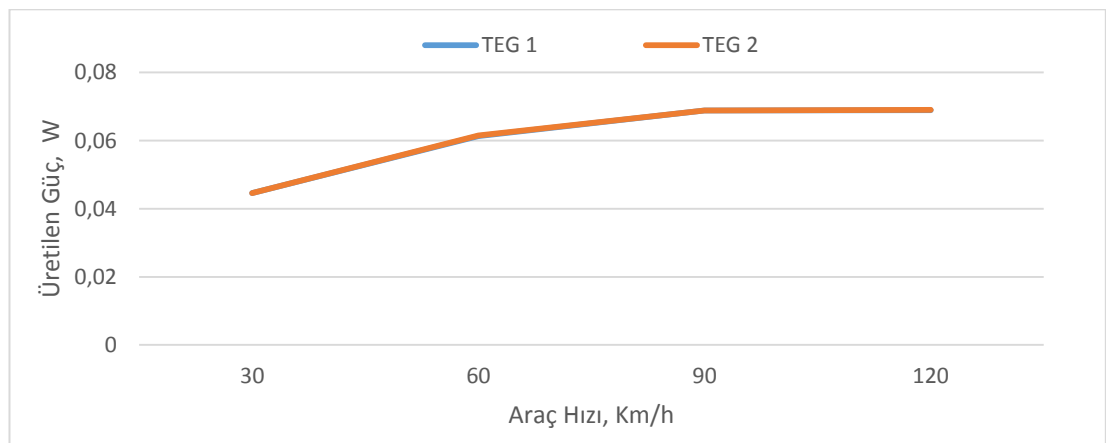
3.12. Model 5 İçin Analiz Sonuçları

3.12.1 Farklı hız ve Sabit motor devrinde analiz sonuçları

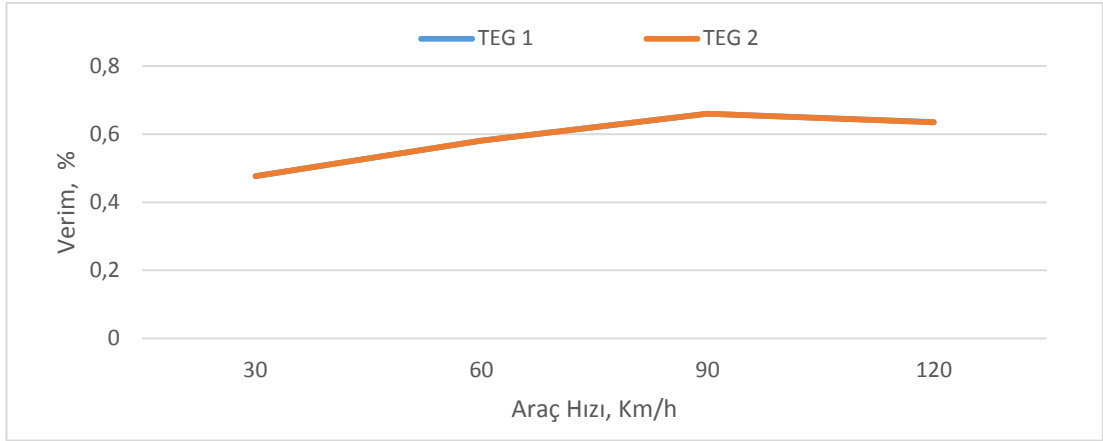
Yapılan analizler sonucunda ısı borularının modüllerin soğuk yüzeyinden uzaklaşp ısı geçişi için eklenmiş bölümlerin içine konulması sıcaklık dağılımındaki homojenliğı bozsa da, ısı geçişinin artması sebebiyle modüllerin soğuk yüzeyindeki ortalama sıcaklığın model 4'e göre 8 °C - 10 °C düştüğü gözlemlenmiştir. Yine de sıcaklık dağılımındaki homojenlik Model 1'dekine göre oldukça iyi durumda kalmıştır.



Şekil 3.52. Model 5 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiğı



Şekil 3.53. Model 5 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiğı



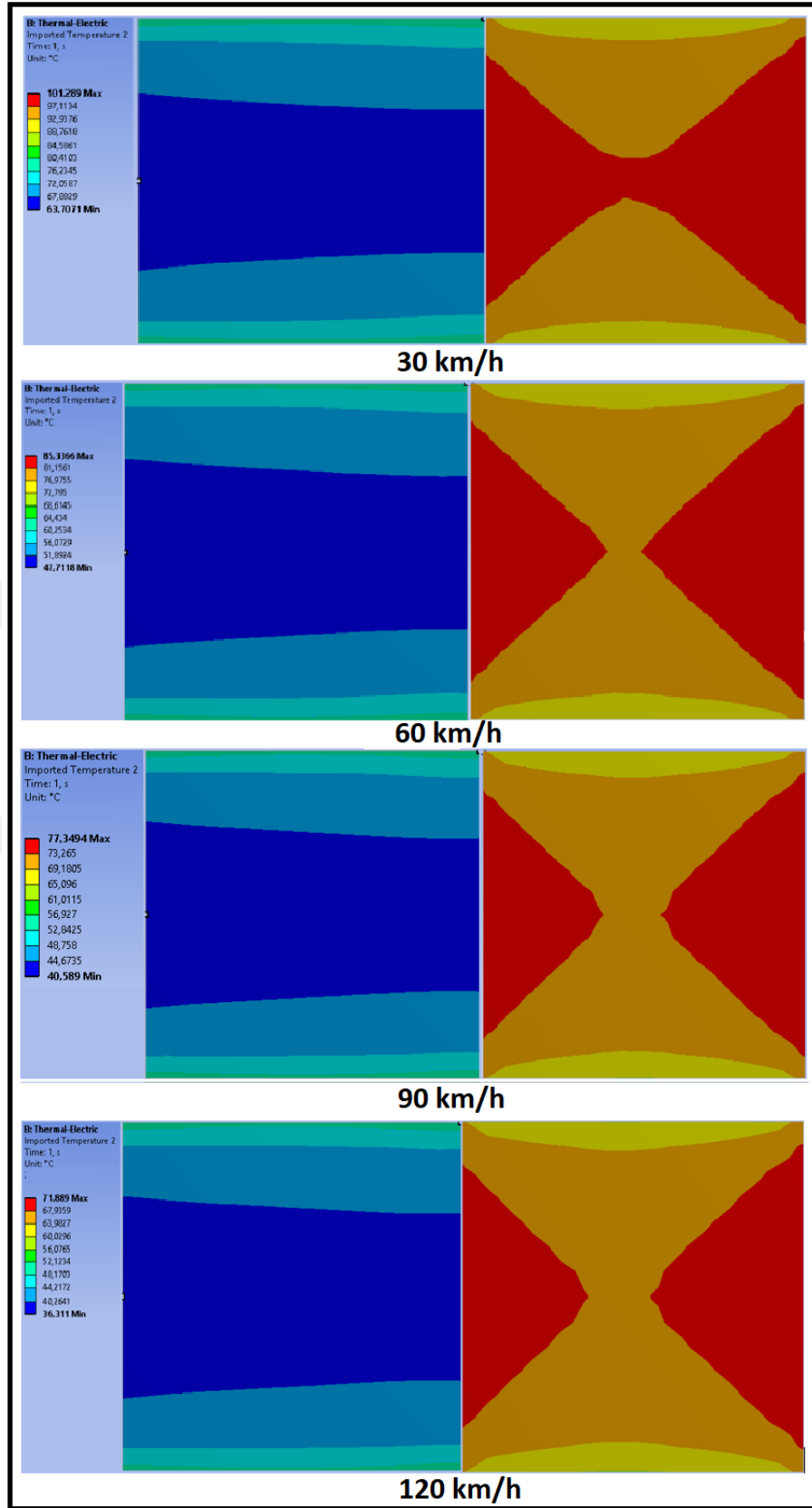
Şekil 3.54. Model 5 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği

Araç hızı arttıkça, modüllerin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkında bir artış olmamasına rağmen rüzgar etkisi ile birlikte modüllerin iki yüzeyinin sıcaklıklarının birlikte düşmesi ve düşük sıcaklıklarda modüllerin daha performanslı çalışmasından ötürü Şekil 3.52., Şekil 3.53. ve Şekil 3.54.'de gösterildiği üzere üretilen akım, üretilen güç ve verimin arttığı gözlemlenmiştir.

Üretilen akım, üretilen güç ve verimde model 4'e göre ciddi bir yükseliş görülmüş. Üretilen akımda özellikle 60 km/h araç hızında % 80 civarında artış olmuş, üretilen güç'te 90 km/h hızda yine % 80'e yakın artış görülmüş ve verimde yine 30 km/h dışındaki hızlarda artış % 50'yi bulmuştur.

Bu belirtilenlerin dışındada diğer hızlarda bütün verilerde iyileşme görülmüştür. Bu veriler ışığında ısı geçişini artırıcı kısımların ve içlerindeki ısı borularının nihai modelde yer almasına karar verilmiştir.

Sırasıyla 10 km/h, 30km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.55.'de görülebileceği üzere ortalama 5 °C, 16 °C, 17 °C, 18 °C ve 17 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.



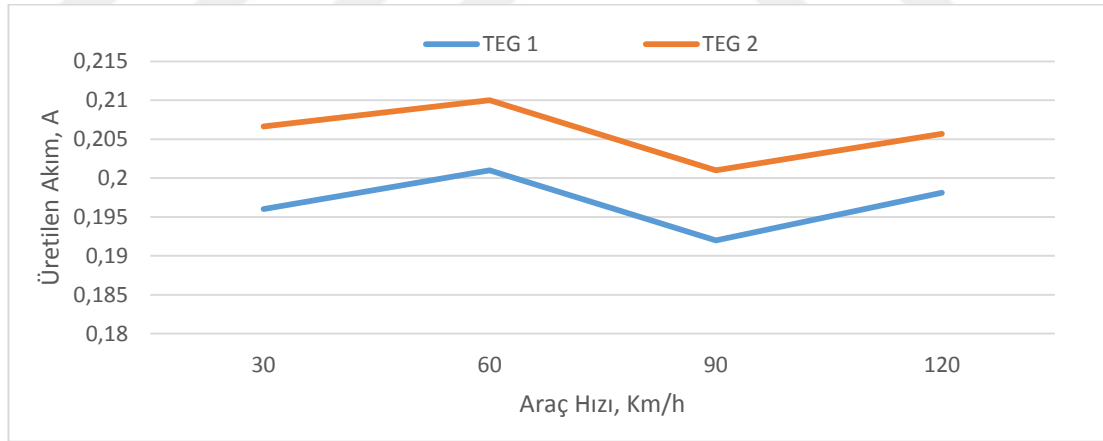
Şekil 3.55. Model 5 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları

3.13. Model 6 İçin Analiz Sonuçları

3.13.1 Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları

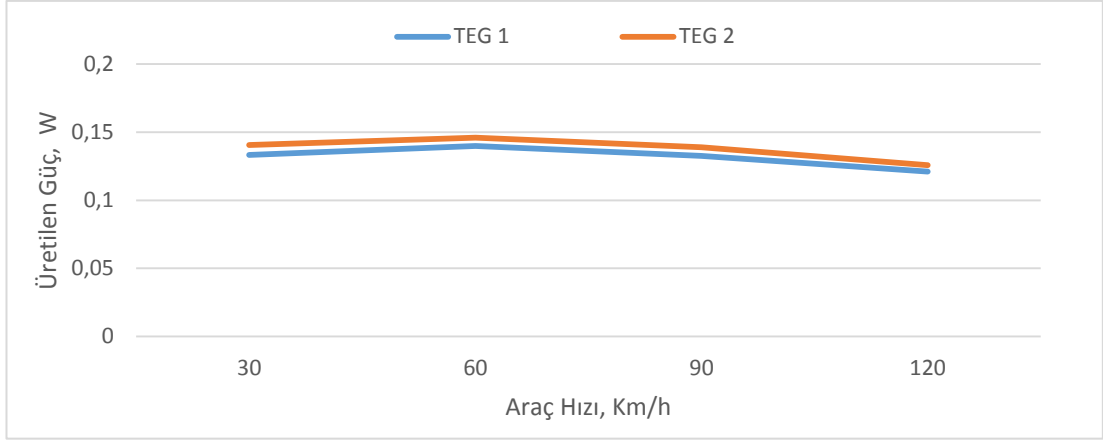
Yapılan analizler sonucunda ısı borularının uçlarına eklenen kanatlar ile birlikte soğutma performansının belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Modüllerin soğuk yüzeylerinde 45 °C, soğuk yüzeylerinde 20 °C 'lere varan sıcaklık düşüşleri gözlemlenmiştir. Önceki Model 5'de görülen TEG'in iki yüzeyi arasındaki yaklaşık 17-20 °C sıcaklık farkları, bu model ile yaklaşık 25 °C - 27 °C sıcaklık farklarına çıkmıştır. Soğuk yüzlerdeki sıcaklık dağılımındaki homojenlik model 5'dekine göre oldukça artmıştır.

Araç hızı arttıkça, modüllerin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkında bir miktar azalma olması sebebiyle yüksek hızlarda (90 km/h - 120 km/h) Şekil 3.56., Şekil 3.57. ve Şekil. 3.58.'de gösterildiği üzere, akım, üretilen güç ve verimin bir miktar azaldığı gözlemlenmiştir.

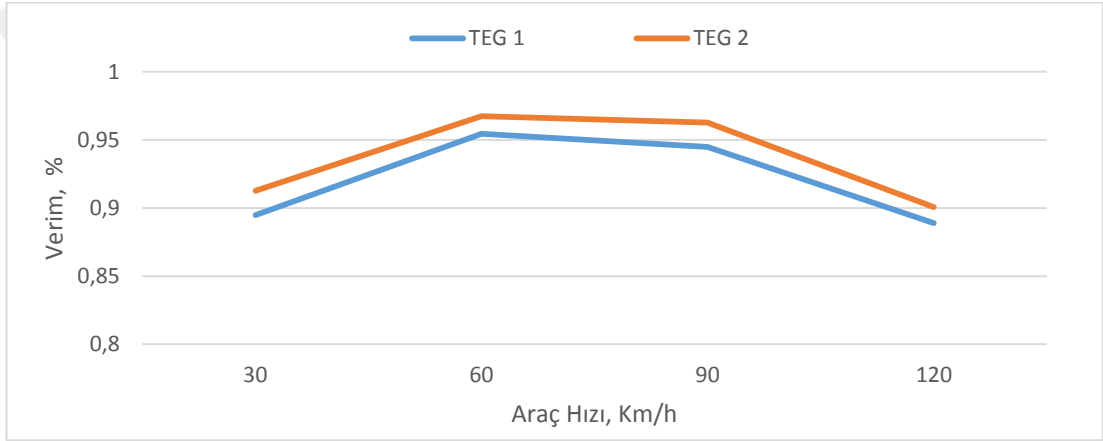


Şekil 3.56. Model 6 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği

Üretilen akım, üretilen güç ve verimde model 5'e göre belirgin bir artış görülmüş. Artış üretilen akım'da bazı noktalarda % 100'lere, üretilen güç'te % 130'lara verim'de % 110'lara ulaşmıştır.



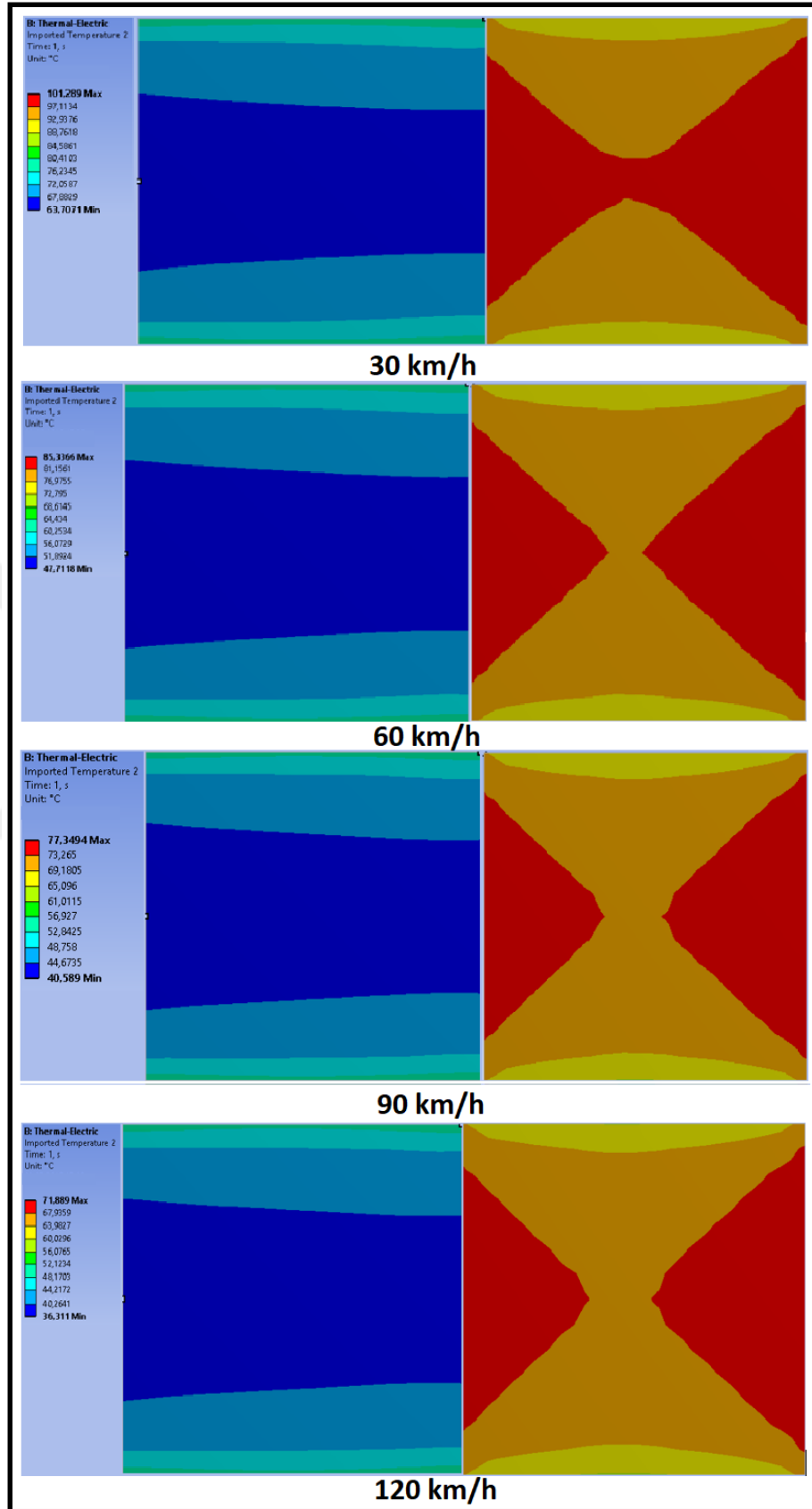
Şekil 3.57. Model 6 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği



Şekil 3.58. Model 6 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği

Isı borularının ucuna kanat eklemenin bütün hızlarda performansı artırımın sağlamasının yanı sıra, 30 km/h ve 60 km/h gibi diğer hızlara göre daha düşük hızlarda ısı geçişini oldukça arttırdığı ve bu hızlardaki modül performanslarında görülmeye değer artış sağladığı gözlemlenmiştir. Bu veriler ışığında nihai modelde ısı boruları ucunda kanat veya başka bir formda bir ısı geçişini arttırıcı kısım olmasına karar verilmiştir.

Sırasıyla 10 km/h, 30 km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.59.'da görülebileceği üzere ortalama 11°C, 26 °C, 27 °C, 26 °C ve 24 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.

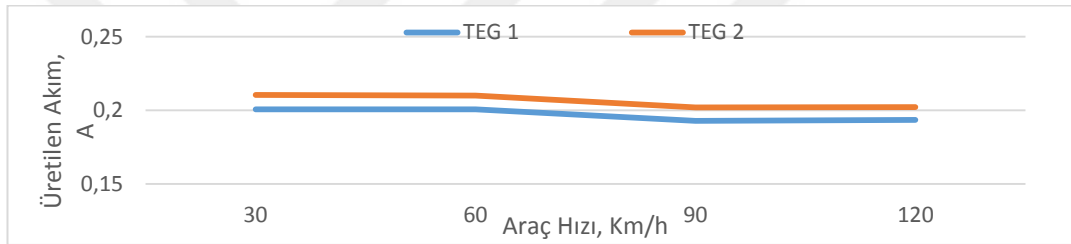


Şekil 3.59. Model 6 için farklı hız ve sabit motor devrinde modül sıcaklık dağılımları

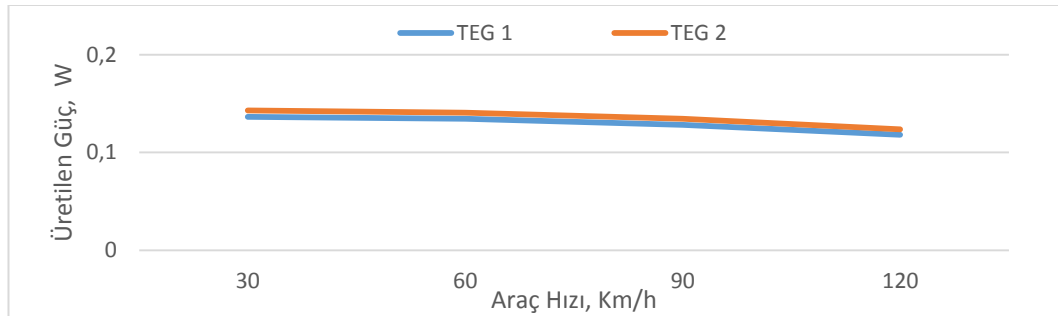
3.14. Model 7 İçin Analiz Sonuçları

3.14.1 Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları

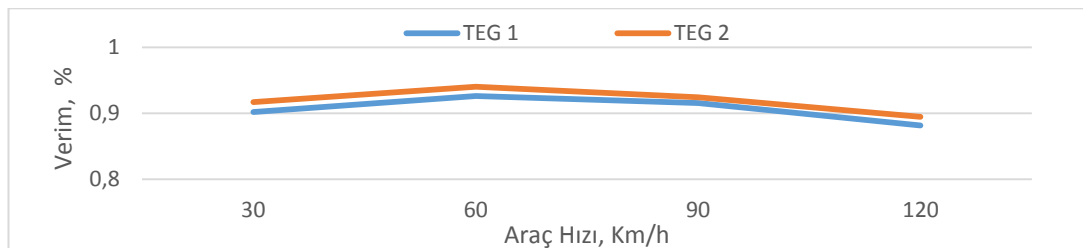
Yapılan analizler sonucunda model 6'ya göre ısı geçişini arttırıcı kısım yüksekliklerinin 2 mm azaltılması genel olarak Şekil 3.60., Şekil 3.61. ve Şekil 3.62.'de gösterildiği üzere, üretilen akım, üretilen güç ve verim'de çok az miktarda negatif yönde değişime yol açmıştır. Genel olarak sıcaklık farklarında belirgin bir değişiklik olmamış, sırasıyla 10 km/h, 30 km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.63.'te görülebileceği üzere ortalama 11°C, 26 °C, 26 °C, 26 °C ve 24 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.



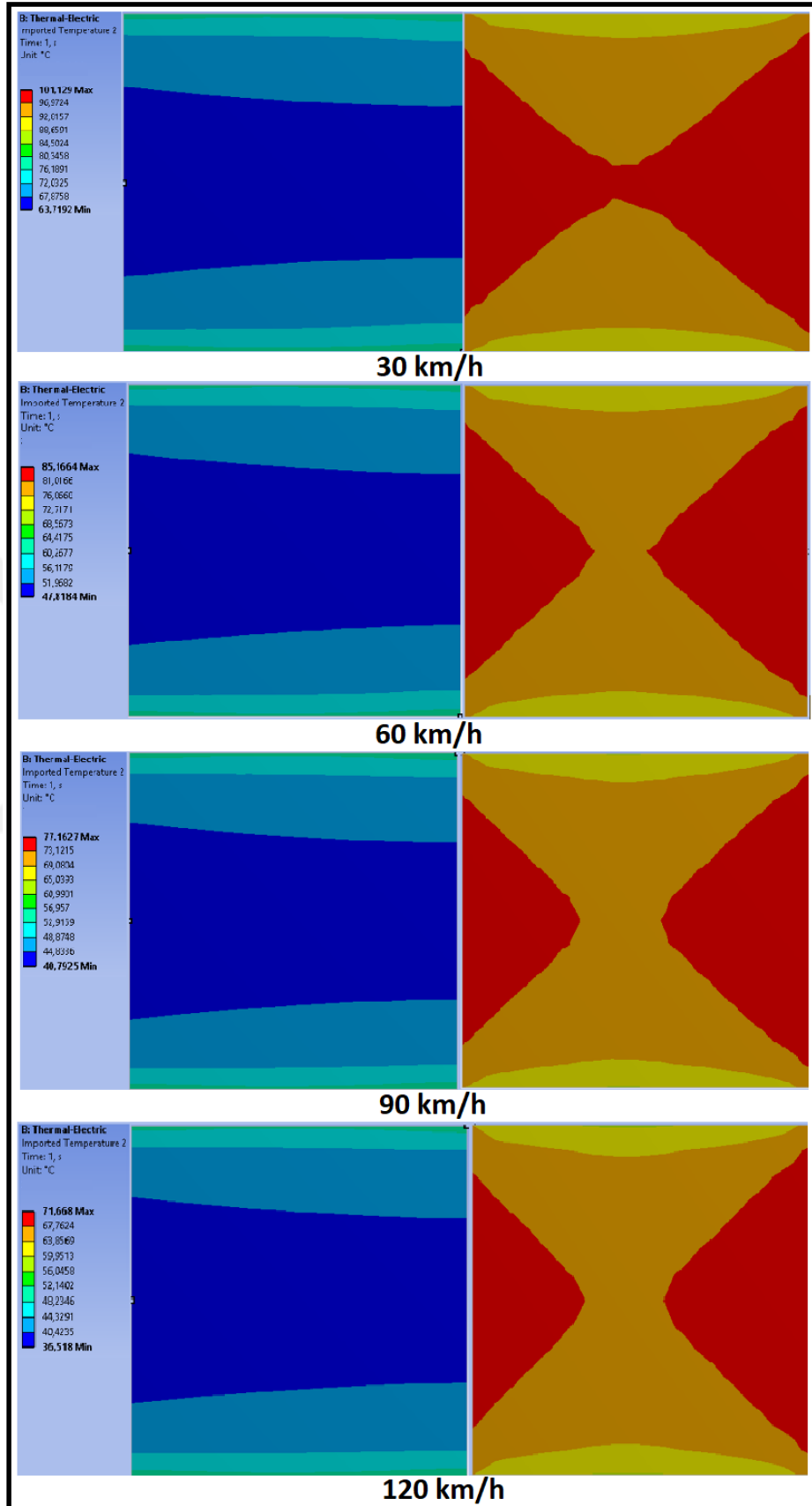
Şekil 3.60. Model 7 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği



Şekil 3.61. Model 7 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği



Şekil 3.62. Model 7 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği

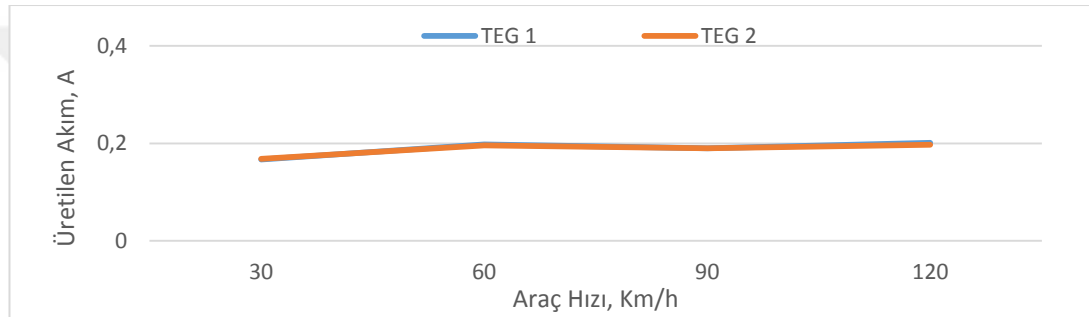


Şekil 3.63. Model 7 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları

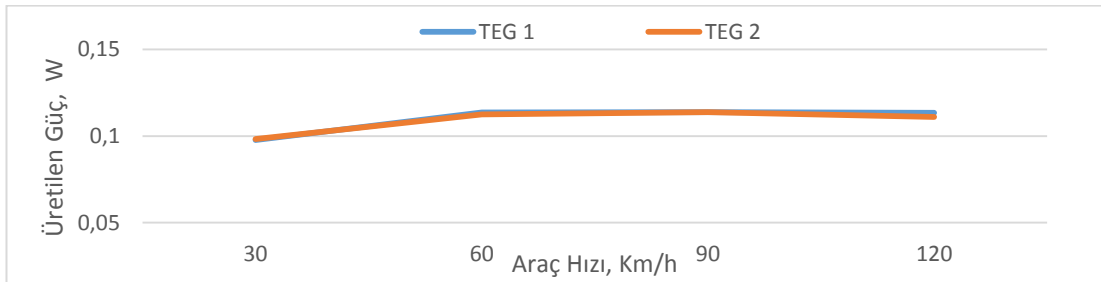
3.15. Model 8 İçin Analiz Sonuçları

3.15.1 Sabit devirde analiz sonuçları

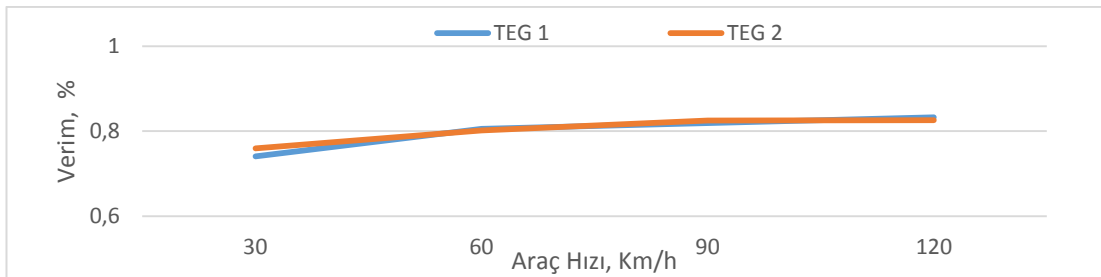
Yapılan analizler sonucunda Şekil 3.64., Şekil 3.65. ve Şekil 3.66.'da gösterildiği üzere, üretilen akımın özellikle 30 km/h gibi dŐuk hızda yaklaşık olarak % 20 azaldığı, diğer hızlarda model 7'ye yakın olduğu, üretilen gücün davranıŐ olarak üretilen akımla benzerlik gösterdiği, verimin ise tüm hızlarda yaklaşık % 5 ile % 20 arasında dŐuŐ gösterdiği gözlemlenmiştir.



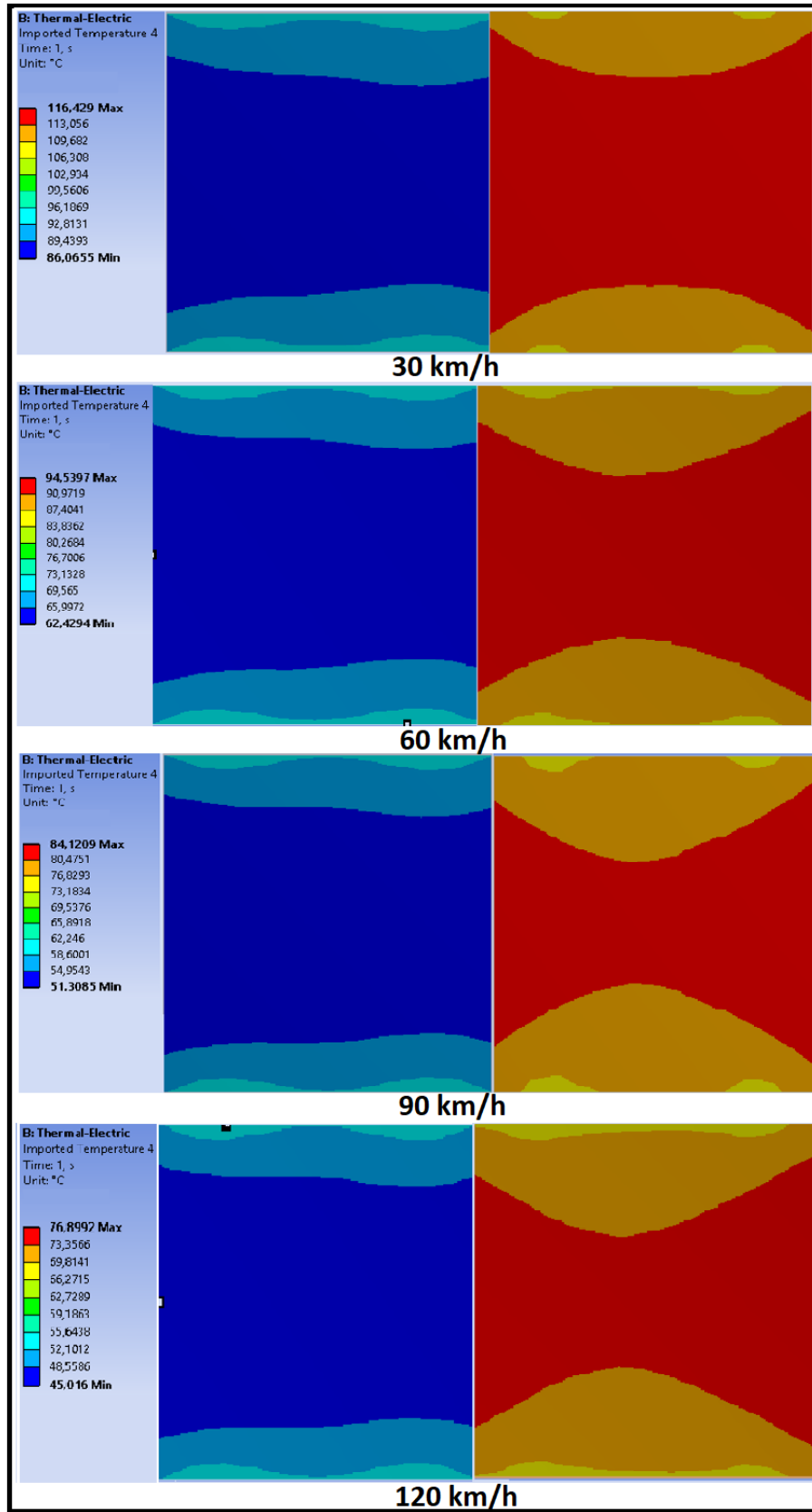
Şekil 3.64. Model 8 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği



Şekil 3.65. Model 8 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen gücü grafiği



Şekil 3.66. Model 8 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği



Şekil 3.67. Model 8 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları

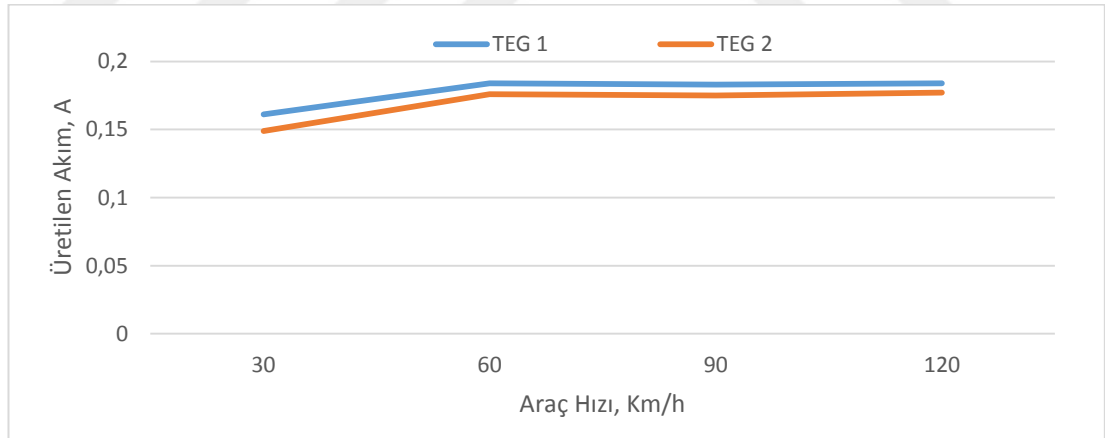
Model 7'ye göre sırasıyla 30 km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda modüllerin sıcak yüzeylerinde , ortalama 23 °C, 11 °C, 8 °C, ve 10 °C'lik, soğuk yüzeylerinde ise 15 °C, 12 °C, 10 °C, ve 5 °C'lik sıcaklık artışı olmuştur.

Sırasıyla 10 km/h, 30km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.67.'de görülebileceği üzere ortalama 8 °C, 22 °C, 23 °C, 23 °C ve 22 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.

3.16. Model 9 İçin Analiz Sonuçları

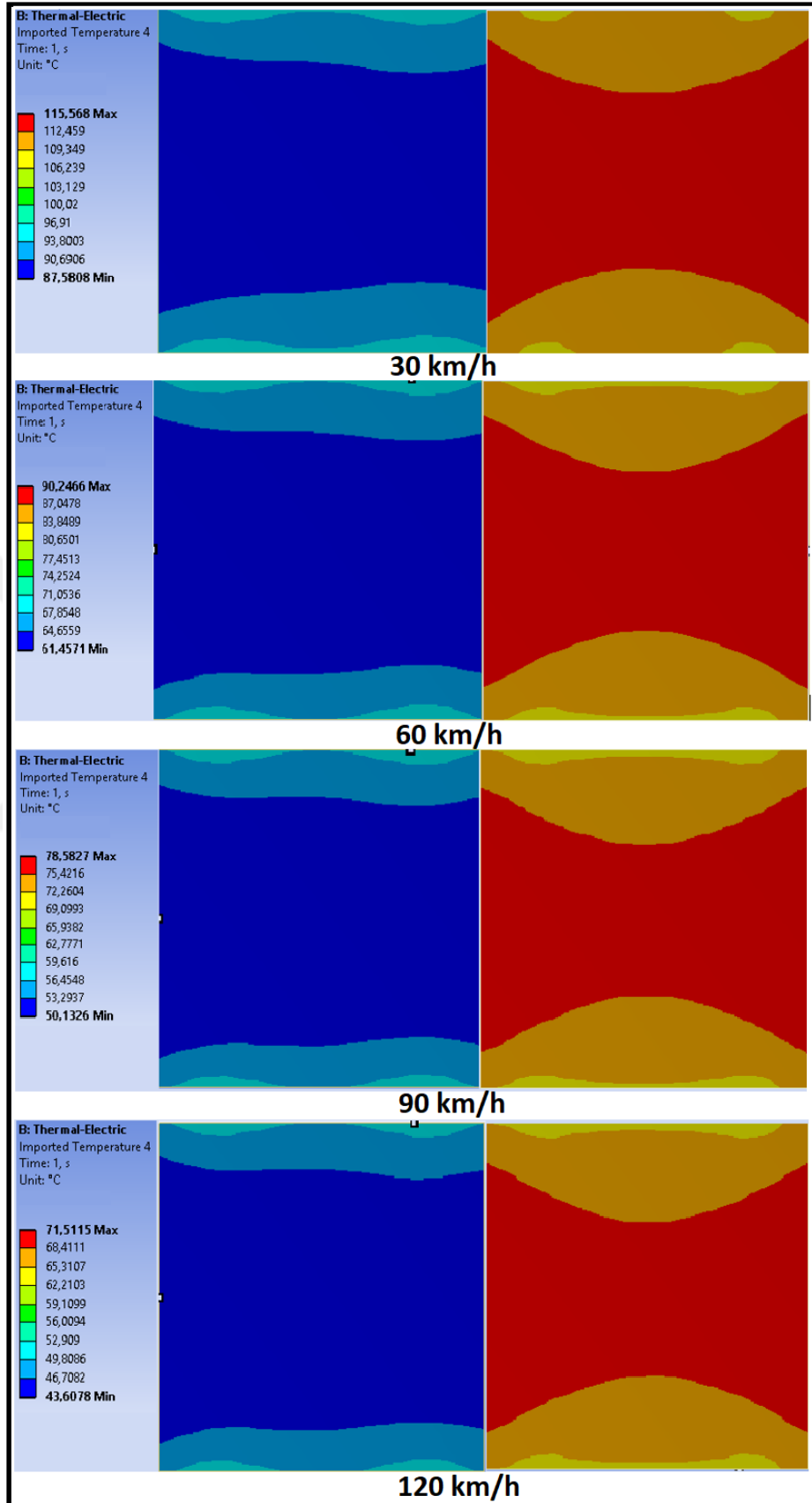
3.16.1 Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları

Yapılan analizler sonucunda Şekil 3.68., Şekil 3.70. ve Şekil 3.71.'de gösterildiği üzere, Model 8'e göre üretilen akımın bütün hızlarda % 3-5 arası azaldığı, üretilen güçte bu oranın özellikle 30 km/h hızında % 20'lere ulaştığı, verimin ise ortalama % 10 azaldığı gözlemlenmiştir.

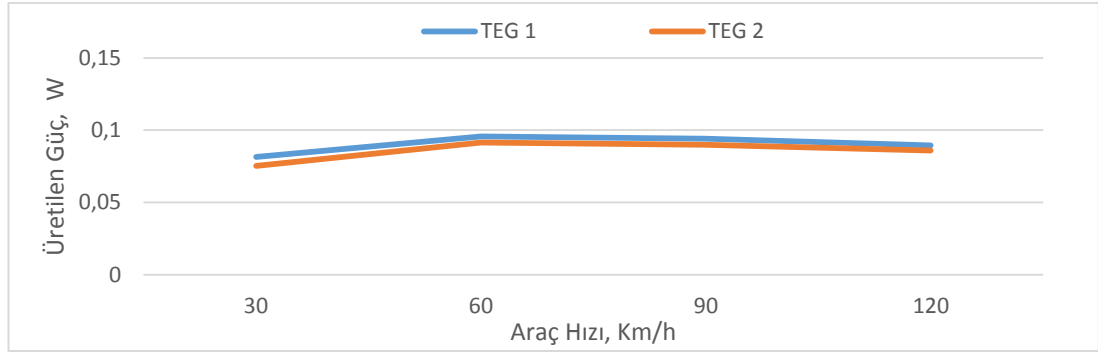


Şekil 3.68. Model 9 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği

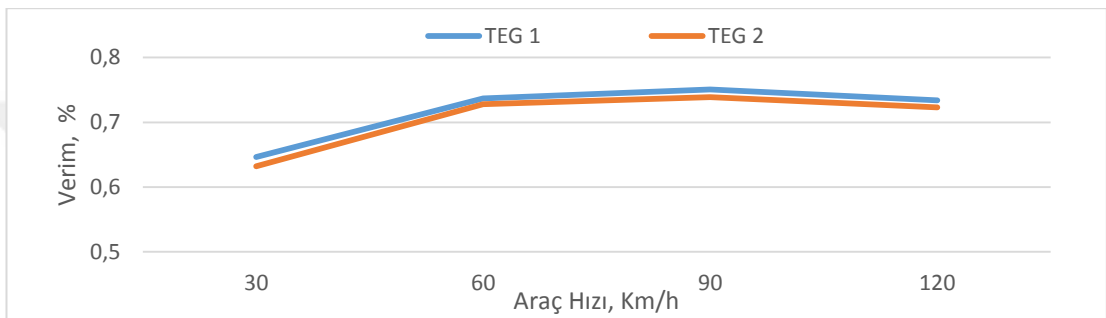
Model 8'e göre sırasıyla 30 km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda modüllerin sıcak yüzeylerinde ortalama 1 °C düşüş, 2 °C, 4 °C ve 6 °C düşüş, soğuk yüzeylerinde 2 °C, 4 °C, 4 °C ve 2 °C düşüş olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.69. Model 9 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları



Şekil 3.70. Model 9 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği



Şekil 3.71. Model 9 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği

Sırasıyla 10 km/h, 30 km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.69.'da görülebileceği üzere ortalama 8°C, 19 °C, 20 °C, 20 °C ve 19 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.

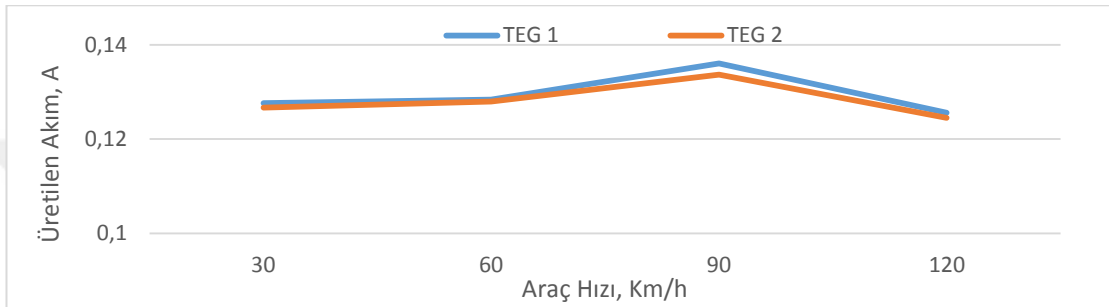
3.17. Model 10 İçin Analiz Sonuçları

3.17.1. Farklı hız ve sabit motor devrinde analiz sonuçları

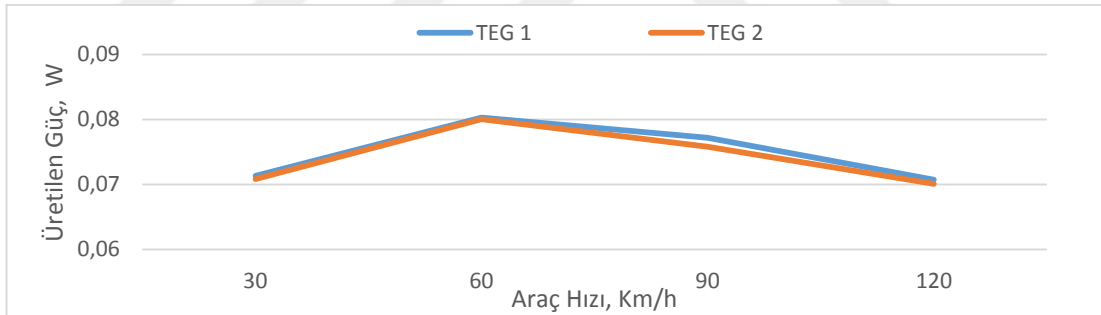
Yapılan analizler sonucunda Şekil 3.72., Şekil 3.73. ve Şekil 3.74.'de gösterildiği üzere, Model 9'e göre üretilen akımın bütün hızlarda % 30-% 40 arası azaldığı, üretilen güçte bu oranın özellikle 120 km/h hızında % 30'lara ulaştığı, verimin ise 30 km/h ve 60km/h hızlarda oldukça yakın olduğu fakat 90 km/h ve 120 km/h hızlarda yaklaşık % 5 düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Model 9'a göre bütün hızlarda modüllerin en düşük ve en yüksek yüzey sıcaklıklarında belirgin bir değişiklik olmamış, fakat soğuk yüzde sıcaklık dağılımında homojenlik kaybedilmiş ve bunun sonucu olarak performansta düşüşler meydana gelmiştir.

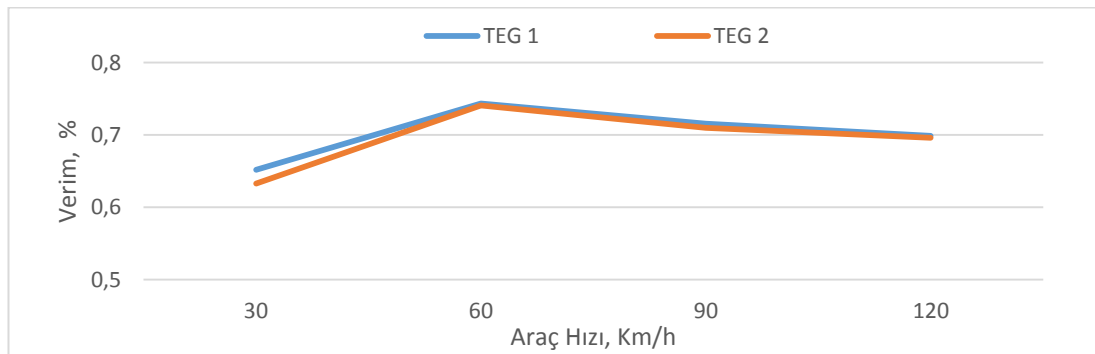
Sırasıyla 10 km/h, 30 km/h, 60 km/h, 90 km/h ve 120 km/h hızlarda, modüllerin yüzeyleri arasında Şekil 3.75'de görülebileceği üzere ortalama 8 °C, 19 °C, 21 °C, 19 °C ve 20 °C'lik sıcaklık farkları oluşmuştur.



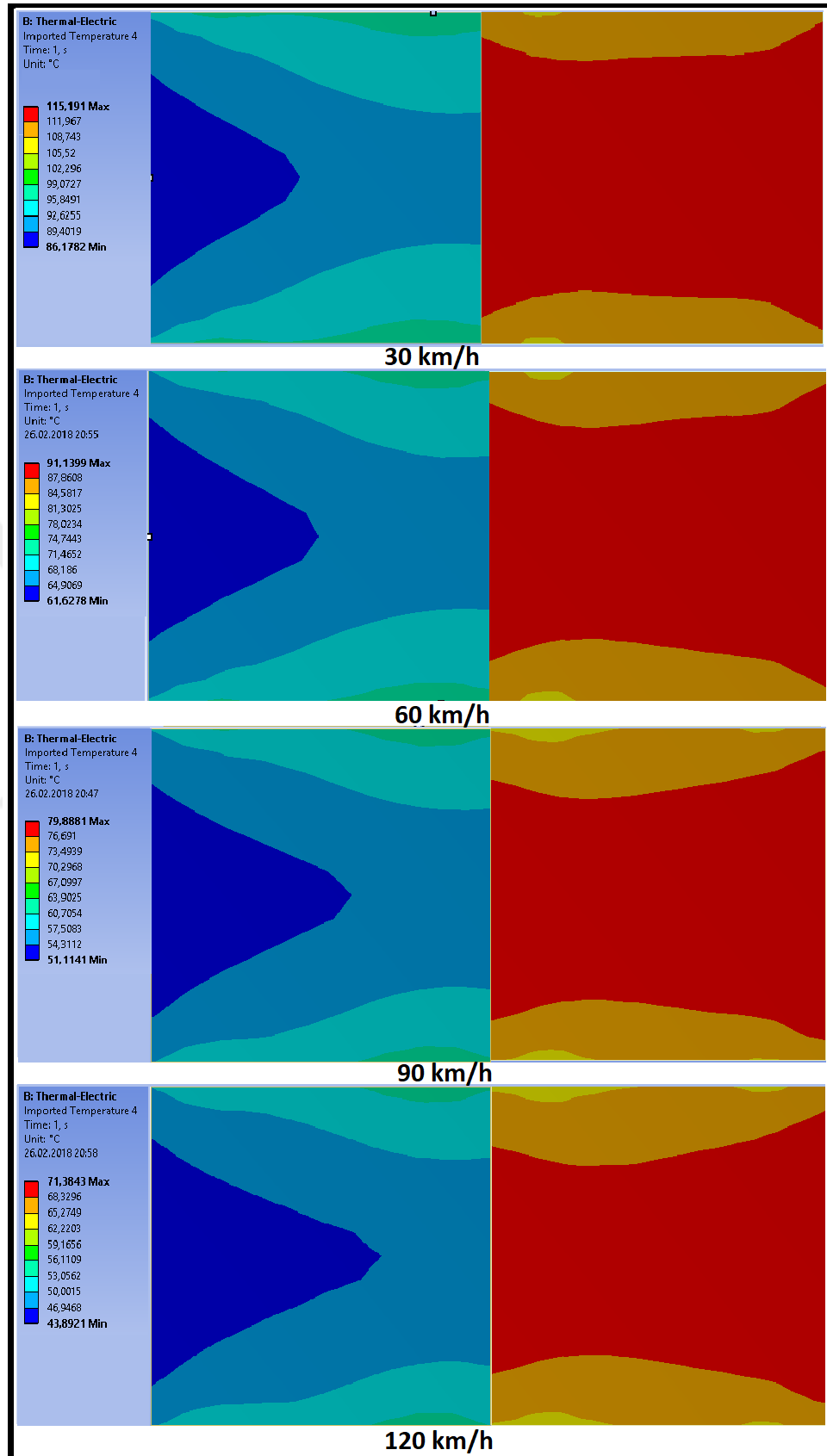
Şekil 3.72. Model 10 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen akım grafiği



Şekil 3.73. Model 10 için farklı hız ve sabit motor devrinde üretilen güç grafiği



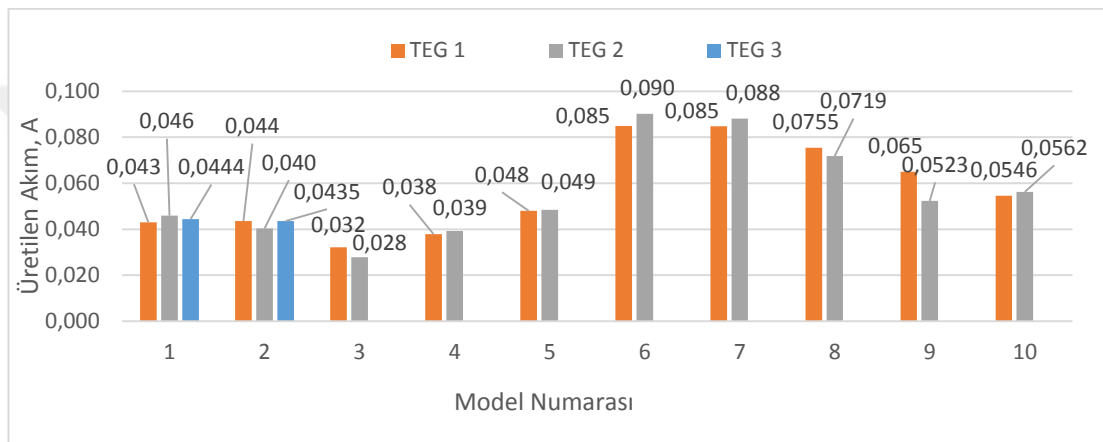
Şekil 3.74. Model 10 için farklı hız ve sabit motor devrinde verim grafiği



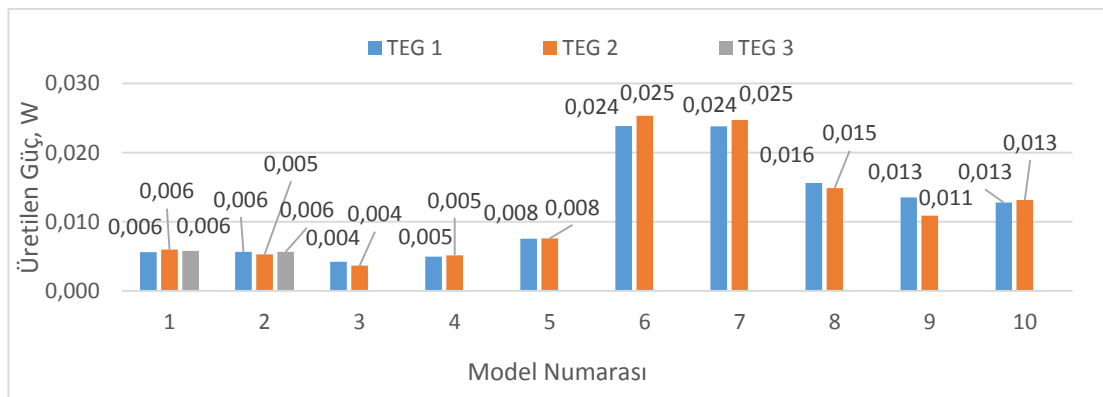
Şekil 3.75. Model 10 için farklı hız ve sabit motor devrinde sıcaklık dağılımları

3.18. Taşıt Hareketsiz Durumdaki Analiz Sonuçları

Taşıtın hareketsiz durumu için motor hızı 1500 d/evirdakika ve rüzgar hızı 3 m/s ile yapılan analizlerde Şekil 3.76., Şekil 3.77. ve Şekil 3.81.'de gösterildiği üzere üretilen akım, üretilen güç ve verimin modeller üstündeki yapılan eklentiler ve geliştirmeler ile arttığı model 8 ve 9'da modül yüzeylerindeki sıcaklık dağılımlarının diğerlerine göre oldukça homojen bir yapıya büründüğü görülmüştür. Model 1-2-3 ve 6-7 arasında 4 ile 5 kat arasında performans iyileştirmesi meydana geldiği gözlemlenmiştir.

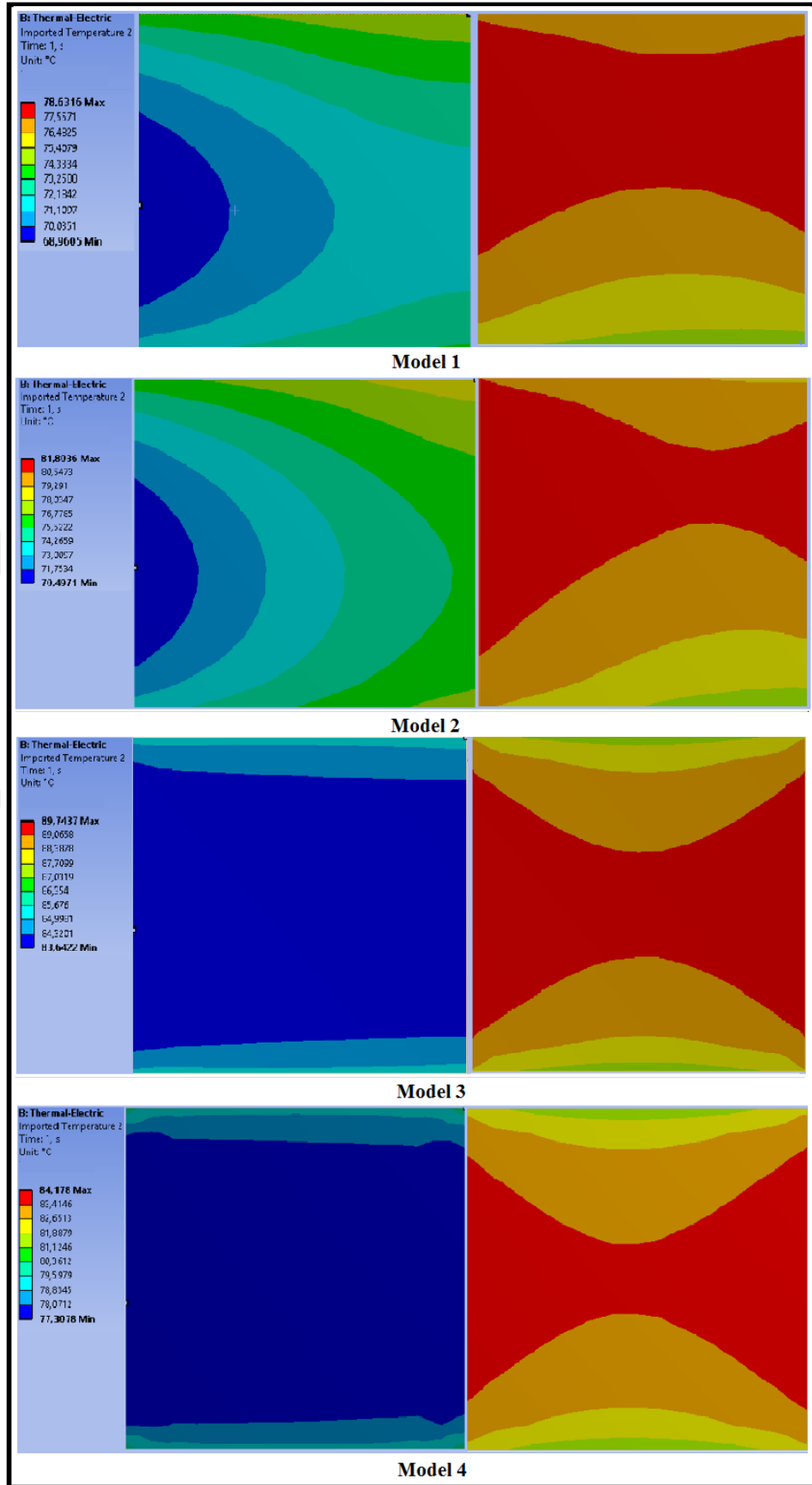


Şekil 3.76. Taşıt hareketsizken bütün modellerde üretilen akım grafiği

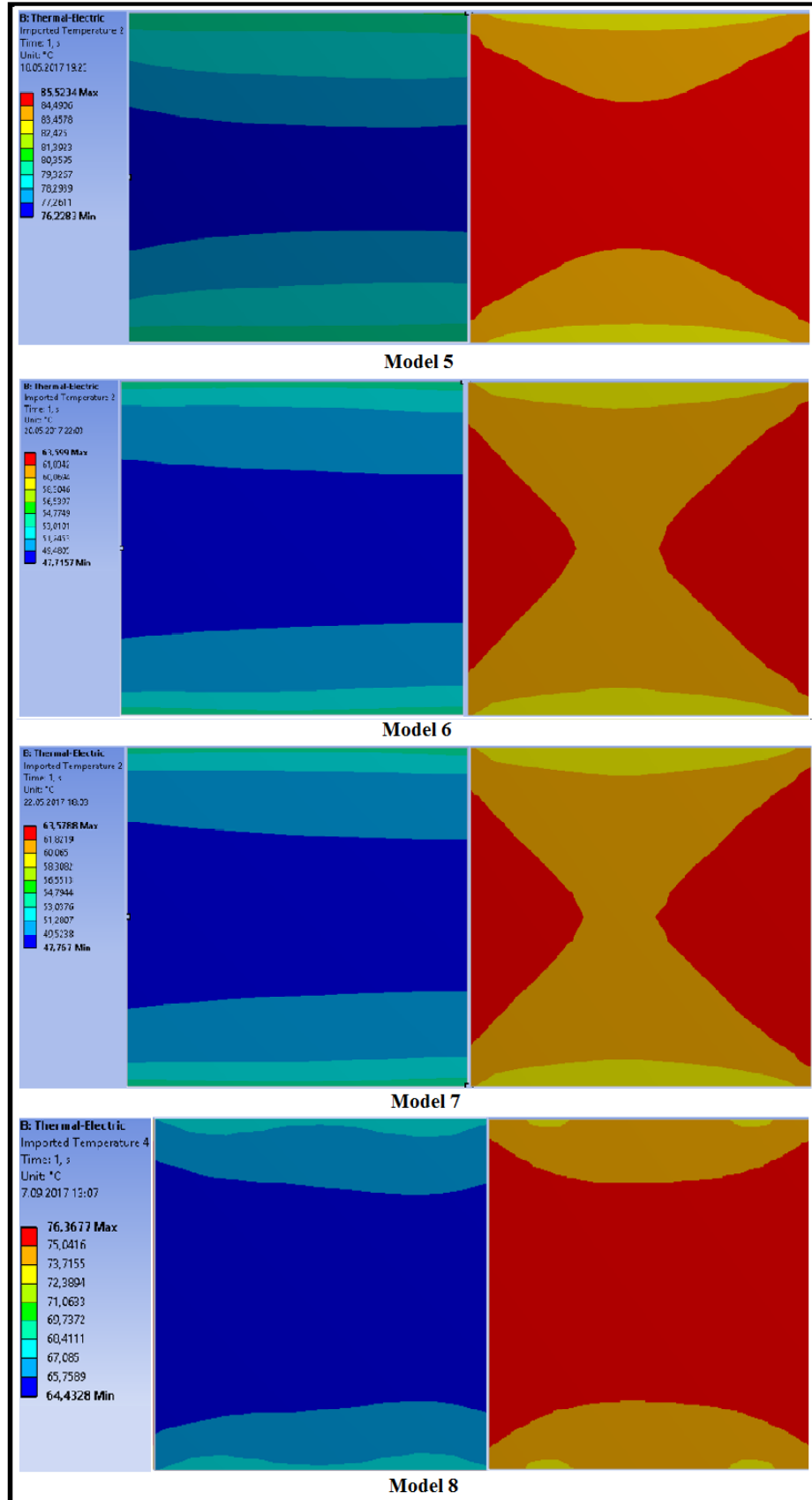


Şekil 3.77. Taşıt hareketsizken bütün modellerde üretilen güç grafiği

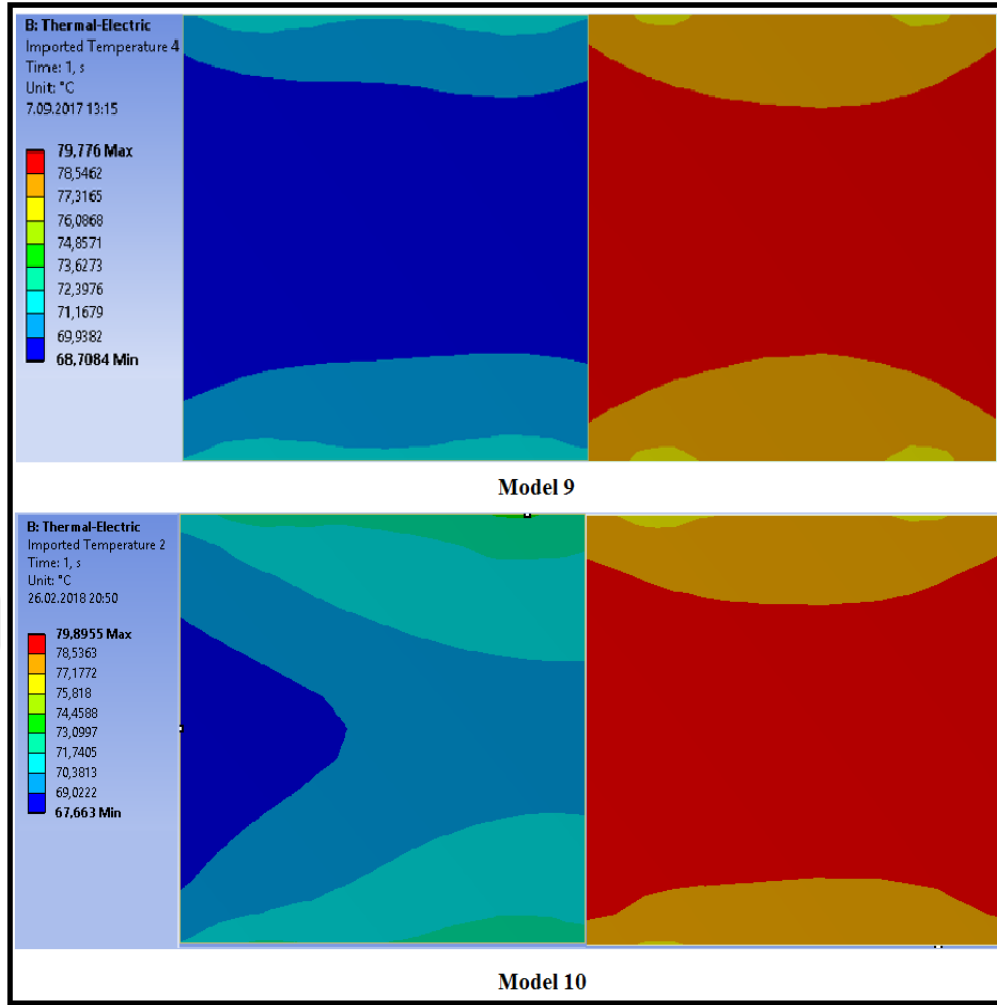
Bütün modeller için ısı borusu kullanımı ile birlikte modül sıcak ve soğuk yüzlerindeki sıcaklık dağılımları kısmen de olsa homojenleşme eğilimi göstermiştir. Performansa olumlu etkileri bütün sonuçlar için belirgin olmuştur. Bütün modüller için yüzey sıcaklık dağılımları Şekil 3.78., Şekil 3.79. ve Şekil 3.80.'de gösterilmiştir.



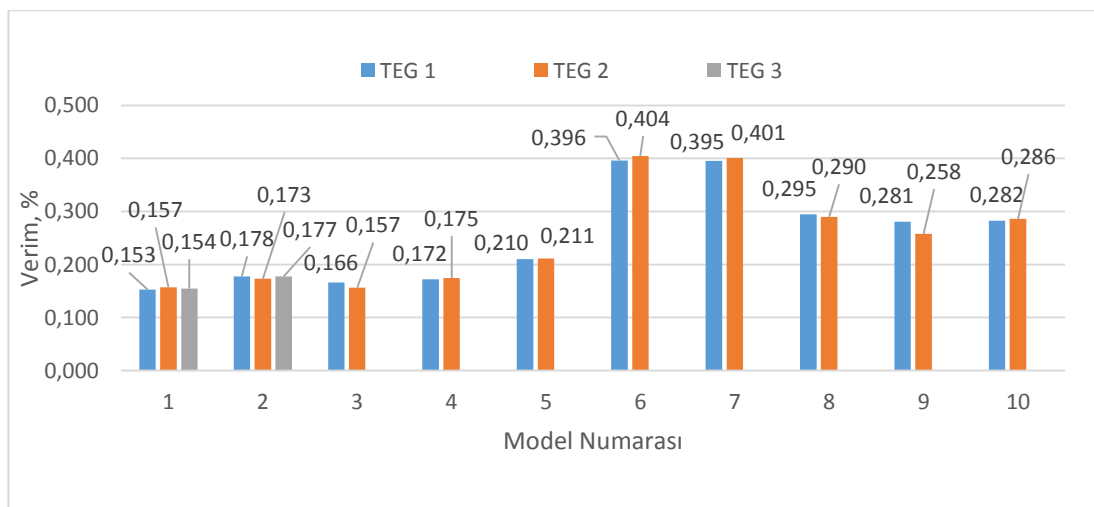
Şekil 3.78. Taşıtlı hareketsizken model 1-2-3-4 için sıcaklık dağılımları



Şekil 3.79. Taşıt hareketsizken model 5-6-7-8 için sıcaklık dağılımları



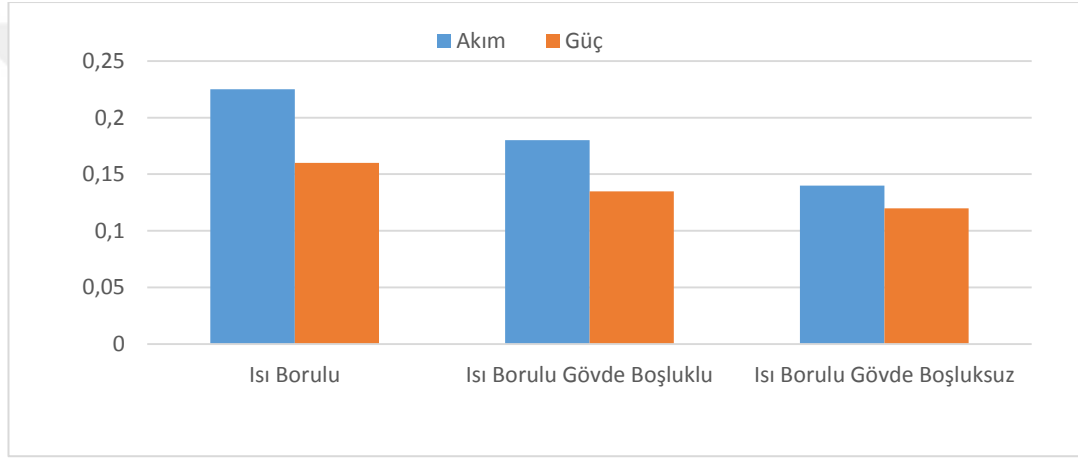
Şekil 3.80. Taşıt hareketsizken model 9-10 için sıcaklık dağılımları



Şekil 3.81. Taşıt hareketsizken bütün modellerde üretilen verim grafiği

3.19. Isı Borusu Etkisinin Karşılaştırılması

Model 9 üzerinde ısı borusunun etkisini daha net görebilmek için karşılaştırma amacı ile analiz yapılmıştır. 120 km/h araç hızı ve 3000 devir/dakika dikkate alınarak yapılan çalışmada Şekil 3.82.'de gösterildiği üzere ısı borularının kaldırılması ile üretilen akımda yaklaşık olarak % 23, üretilen güçte ise % 13 azalma meydana gelmiştir. Çıkarılan ısı borularının, ısı alıcı içerisindeki yerlerinin doldurulması ve soğutucu hava ile temas halinde olan yüzey alanının azalması ile birlikte toplam düşüş üretilen akımda % 36, üretilen güçte % 27 seviyelerine çıkmıştır.



Şekil 3.82. Isı borulu ve borusuz durum karşılaştırma grafiği

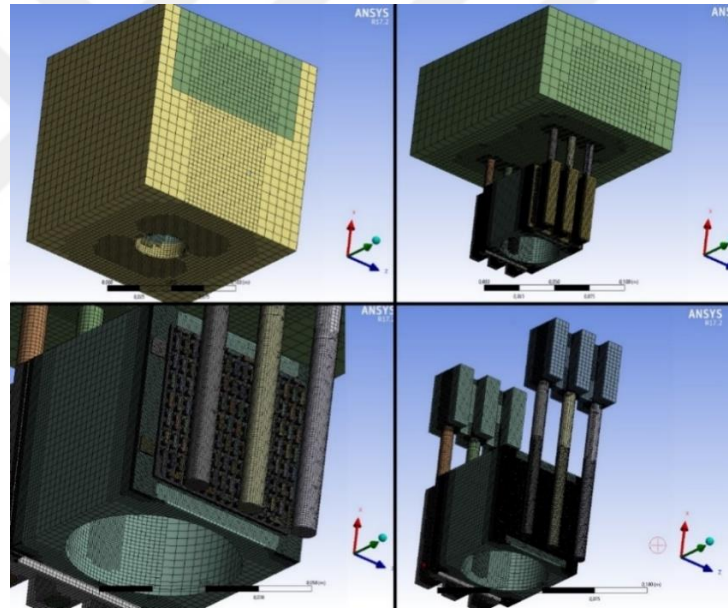
3.20. Prototip Termoelektrik Jeneratörün Sayısal Analizi ve Deneysel Doğrulaması

Bilgisayar üzerinde gerçekleştirilen tasarımlarla yapılan analizleri doğrulamak amacı ile deney düzeneği bilgisayar üzerinde modellenmiştir. Yapılan diğer sonlu elemanlar analizleri ile daha önce belirtilmiş olan metotlar izlenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda Tablo 3.10.'da gösterilen özellikle sıcaklık ölçüm noktalarındaki değerlerin laboratuvar ortamında yapılan deneylere oldukça yakın olduğu, ısı değiştirici üzerindeki sıcaklık dağılımında benzer karakteristik gösterdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 3.10. Prototip termoelektrik jeneratör sistemi için sonlu elemanlar analiz sonuçları

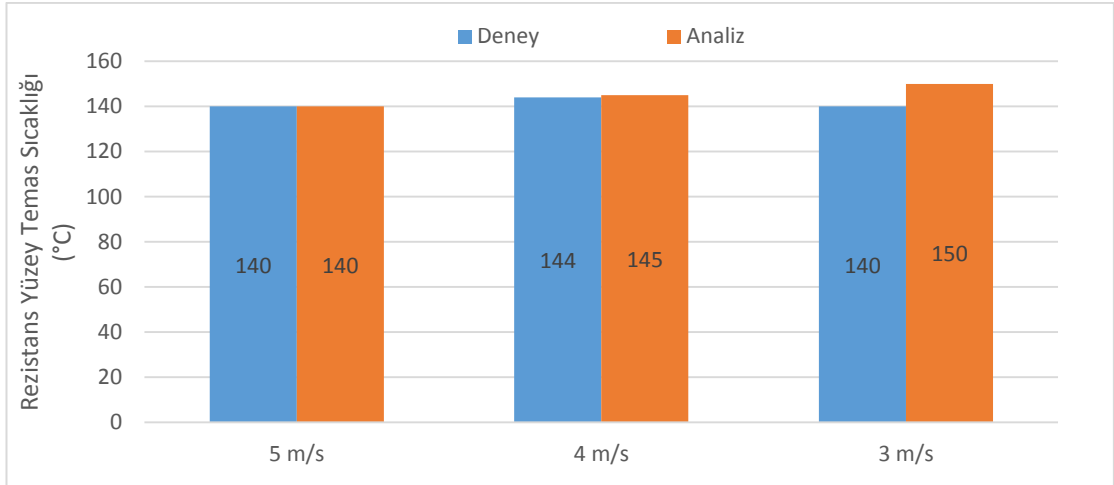
Hava Giriş Hızı (m/s)	Hava Giriş Sıcaklığı (°C)	Rezistansa Temas Eden Yüzey Sıcaklığı (°C)	Isı Alıcı Yüzey Sıcaklığı (°C)	Üretilen Voltaj (V)	Üretilen Akım (A)
5	21	140	93	1,6	0,312
4	21	145	106	1,5	0,286
3	20	150	115	1,43	0,275

Yapılan diğer sonlu elemanlar analizleri ile daha önce belirtilmiş olan metodlar izlenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Rezistans yüzey sıcaklığı 150 °C olarak giriş yapılmıştır. Analizler sıcaklık dağılımı sonucu Şekil 3.89.'de gösterilen 5 m/s, 4 m/s ve Şekil 3.90.'da gösterilen 3 m/s hava hızları ile gerçekleştirilmiştir.

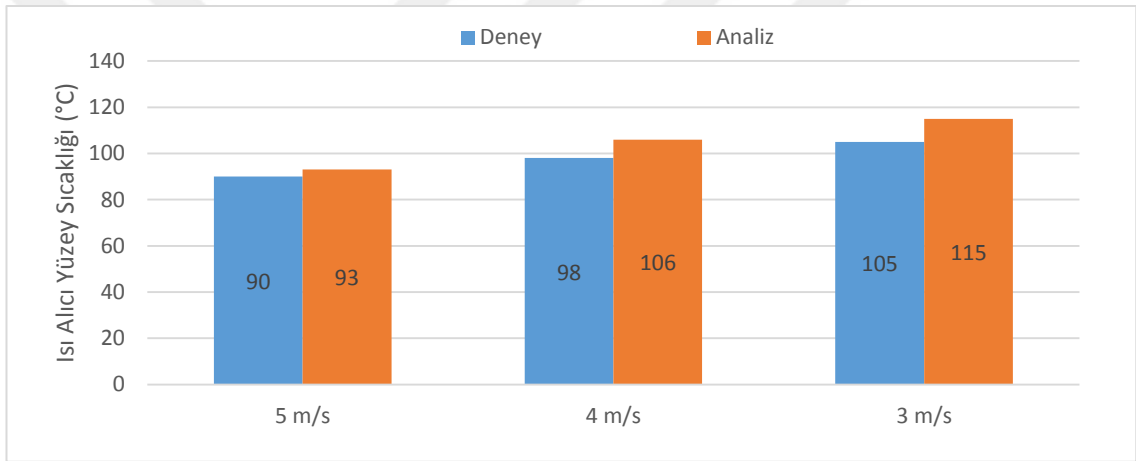


Şekil 3.83. Deneyde kullanılan model için ağ yapısı

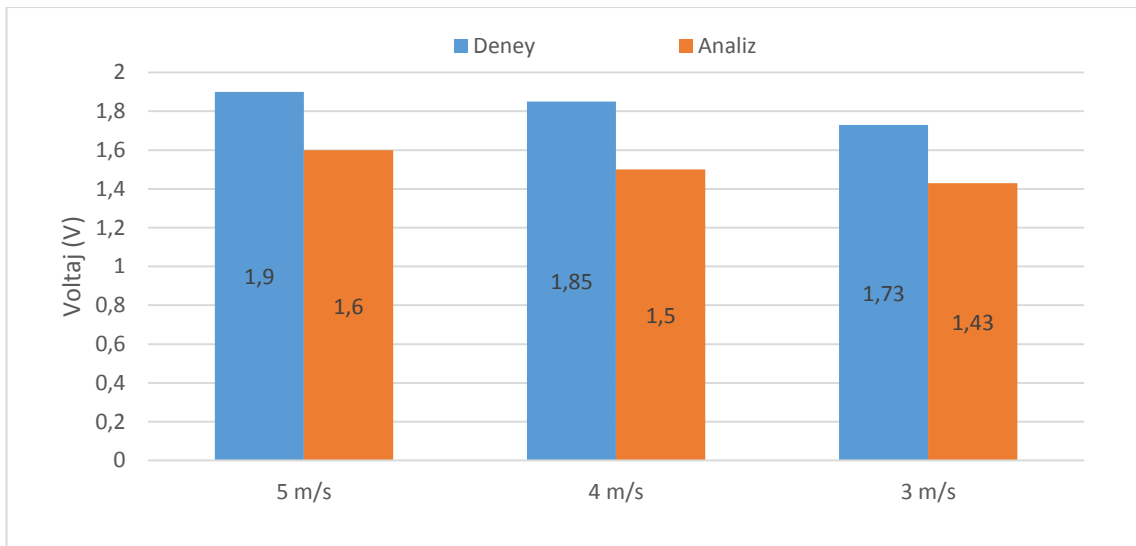
Hesaplanan voltaj ve analiz edilen akım, güç ve sıcaklık değerlerinin laboratuvar ortamındaki sonuçlara göre, analiz programında kullanılan malzeme özelliklerinin laboratuvar ortamında kullanılan modüller ile Şekil 3.84., Şekil 3.85., Şekil 3.86., Şekil 3.87. ve Şekil 3.88.'de görülebileceği üzere kısmen aynı olmaması sebebi ile bir miktar farklı olduğu gözlemlenmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan analizlerdeki ekipman montajlarındaki merkezlemeler ve parçalar üzerine montaj sebebi ile etkiyen farklı basınçlar sebebiyle, sonuçlarda farklılık meydana geldiği düşünülmektedir.



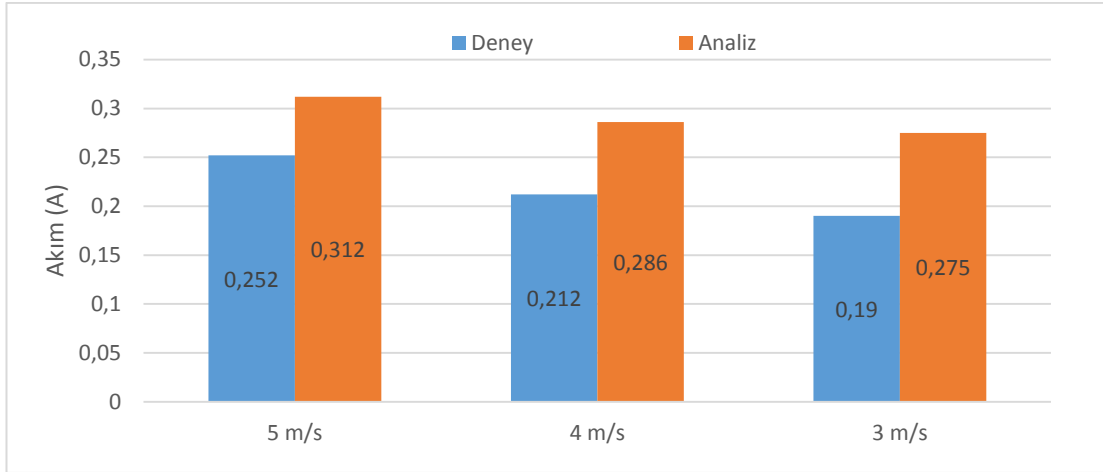
Şekil 3.84. Kaynak tarafındaki sıcaklığın deneysel ve sayısal karşılaştırılması



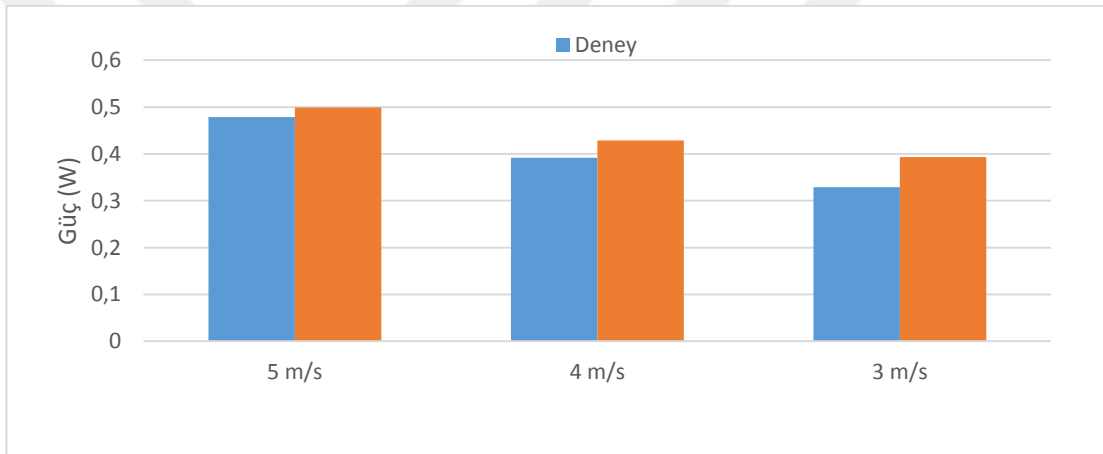
Şekil 3.85. Kuyu tarafındaki sıcaklığın deneysel ve sayısal karşılaştırılması



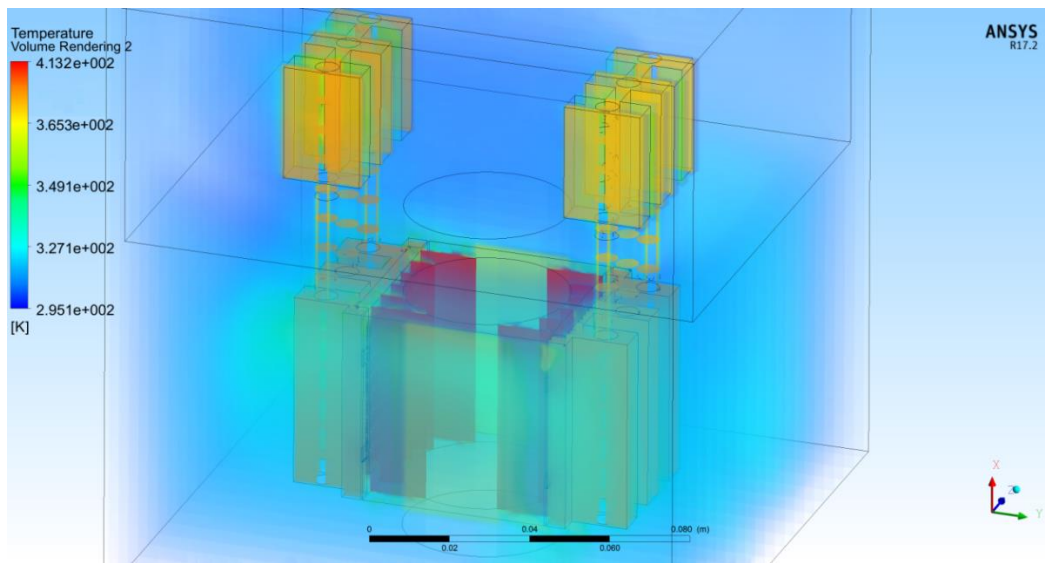
Şekil 3.86. Modüle üretilen gerilimin deneysel ve sayısal karşılaştırılması



Şekil 3.87. Modülde üretilen akımın deneysel ve sayısal karşılaştırılması

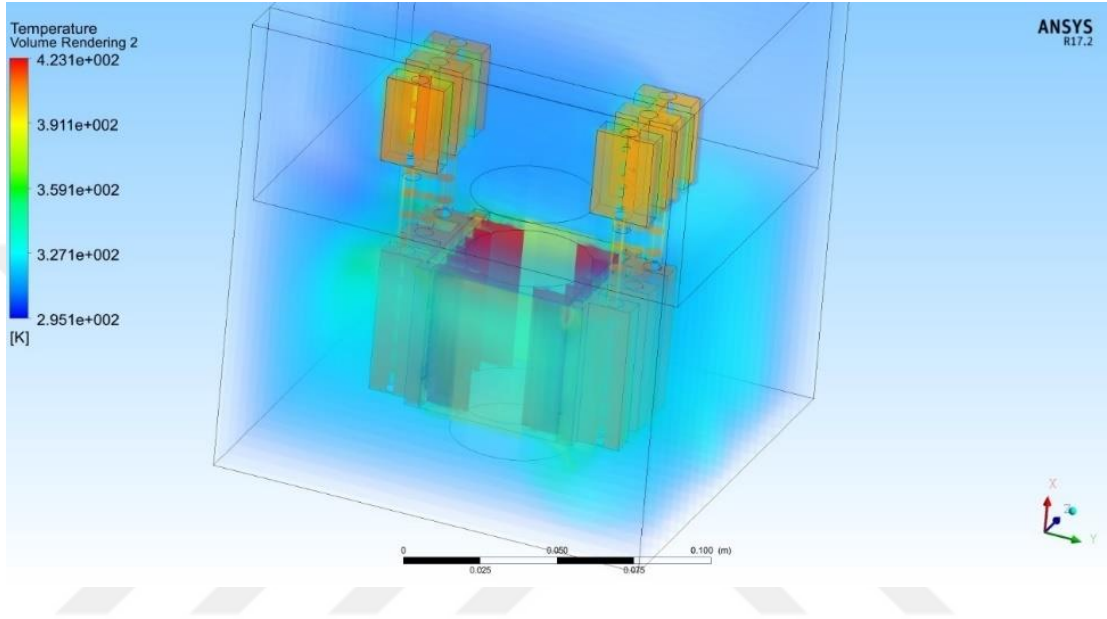


Şekil 3.88. Modülde üretilen gücün deneysel ve sayısal karşılaştırılması



Şekil 3.89. 5 m/s soğuk hava hızı için tasarlanan sistemin sıcaklık dağılımı

Fakat sıcaklık değerlerinin çok yakın çıkması sebebiyle materyal özellikleri tamamen bilinen modül kullanımı ve analiz edilmesi ile sonuçların laboratuvar sonuçlarına yakın olacağı düşünölmektedir. Analizler sonucundaki sıcaklık dağılımlarının laboratuvar sonuçlarını doğrular durumda olması sebebi ile analiz aşamasında yapılan konfigürasyonların güvenilirliği sağlamıştır.



Şekil 3.90. 3 m/s soğuk hava hızı için tasarlanan sistemin sıcaklık dağılımı

BÖLÜM 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Motorlu taşıtlarda, sıcaklığı ve debisi yüksek miktarda olan egzoz gazı ile çevreye ısı atılmaktadır. Atık ısıyı geri kazanmak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında gücü ve verimi yüksek, kolay imal edilebilir termoelektrik ısı geri kazanım sistemi tasarlanmıştır.

Termoelektrik ısı geri kazanım sistemi tasarlanırken üretim kolaylığı ve performans dikkate alınmıştır. Bu amaçla sistemin en önemli bileşeni olan ısı değiştirici için değişik tasarımlar önerilmiştir.

Yapılan çalışmaların sonucunda, bir termoelektrik çift ele alındığında, çiftin sıcak ve soğuk yüzleri arasındaki sıcaklık farkının artışı ile performansın arttığı gözlemlenmiştir.

Termoelektrik malzemelerin ayak kesitlerinin ve ölçülerinin performans üzerinde önemli bir etken olduğu, ayak kesit alanı arttıkça üretilen güç ve akımın arttığı, ayak yüksekliği arttıkça üretilen güç ve akımın azaldığı belirlenmiştir. Trapez şeklinde geometriye sahip termoelektrik ayak çiftlerinde kesit daralması sebebiyle performans düşmektedir.

126 adet p ve n termoelektrik ayak çiftinden oluşan termoelektrik modüller ile yapılan egzoz gazından elektrik üretimi çalışmasında, sonlu elemanlar analizleri için oluşturulan modellerde, dikdörtgen ve silindirik kanatlı ısı alıcı modelleri oluşturulmuştur. Isı borusuz tasarlanan modeller ile yapılan analizlerde dikdörtgen ve silindirik kanatlı ısı alıcıya sahip modeller arasında termoelektrik performans açısından yakın sonuçlar elde edilmiştir. Isı borulu kanatsız modelin termoelektrik performansı en düşük olduğu belirlenmiştir. Isı borularının üstüne dikdörtgen kesitli

kanat eklenerek yapılan analizde termoelektrik verimin arttığı belirlenmiştir. Isı borularının buharlaştırıcı kısmında kanat kalınlığı arttırılması ile termoelektrik verim artmıştır. Kanat kalınlığı artması ile termoelektrik modül üzerinde düzgün sıcaklık dağılımı sağlanmıştır. Termoelektrik jeneratör sisteminde ısı borusunun yoğuşturucu kısmında değişik kanat kalınlıkları ve ısı alıcısı eklenerek analizler yapılmıştır. Kanat kalınlığı azaltılmış, kanat sayısı arttırılmış model en yüksek termoelektrik verim sağlamıştır.

Isı borulu ve ısı borusuz modellemeler ile yapılan çalışmaların sonucunda ısı borulu tasarımların performansı iyileştirdiği belirlenmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar ile, hem Z değeri daha yüksek termoelektrik malzemeler hem de ısı geçişi iyileştirilmiş ısı geçişi sağlayan cihazların geliştirilmesi ile verimi daha yüksek, çevre dostu temiz enerji sistemleri olan termoelektrik güç sistemlerinin geliştirileceği anlaşılmaktadır.

Yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların uyumlu olduğu belirlenmiştir. Termoelektrik enerji sistemlerinin tasarımında ANSYS sonlu elemanlar yazılım programı kullanılabilir. Bu şekilde tasarım çalışmalarında prototip maliyetleri ve zaman kaybı azaltılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Brown, K. E., Henze, D. K., Milford, J. B., How accounting for climate and health impacts of emissions could change the US energy system. *Energy Policy*, 102:396-405, 2017.
- [2] U.S. Department of Energy, Where the Energy Goes: Gasoline Vehicles, <http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>, Erişim Tarihi: 10.03.2017.
- [3] Wang, Y., Dai, C., & Wang, S. (2013). Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source. *Applied Energy*, 112, 1171–1180. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.018>.
- [4] Wiegel, M. E. K., Matthiesen, D.H., Determination of the Peltier coefficient for gallium arsenide in a vertical Bridgman furnace. *Journal of Crystal Growth*, 333:20-24, 2011.
- [5] Liu, Z., Zhu, S., Ge, Y., Feng, S., Zeng, L., Liu, W., Geometry optimization of two-stage thermoelectric generators using simplified conjugate-gradient method. 190:540-552, 2017.
- [6] Champier, D., Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 140:167-181, 2017.
- [7] Erturun, U., Erermis, K., Mossi, K., Effect of various leg geometries on thermo-mechanical and power generation performance of thermoelectric devices. 73:128-141, 2014.
- [8] Siddique, A. R. M., Mahmud, S., Heyst, B. V., A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73:730-744, 2017.
- [9] Hermes, C. J. L., Barbosa Jr, J. R., Thermodynamic comparison of Peltier, Stirling, and vapor compression portable coolers. *Applied Energy*, 91:51-58, 2012.
- [10] Thomson, W., Account of researchers in thermo-electricity. *Philos. Mag.*, 8:62, 1854.

- [11] Temizer, İ., İlkılıç, C., The performance and analysis of the thermoelectric generator system used in diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63: 41–151, 2016.
- [12] Chen, C.T., Chen, H.I., Multi-objective optimization design of plate-fin heat sinks using a direction-based genetic algorithm. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44: 257-265, 2013.
- [13] Bai, S., Lu, H., Wu, T., Yin, X., Shi, X., Chen, L., Numerical and experimental analysis for exhaust heat exchangers in automobile thermoelectric generators. *Case Studies in Thermal*, 4: 99-112, 2014.
- [14] Remeli, M. F., Date, A., Orr, B., Ding, L. C., Singh, B., Affandi, N. D. N., Akbarzadeh, A., Experimental investigation of combined heat recovery and power generation using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. *Energy Conversion and Management*, 111: 147-157, 2016.
- [15] Hsu, C. T., Huang, G. Y., Chu, H. S., Yu, B., Yao, D. J., Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators. *Applied Energy*, 88: 1291-1297, 2011.
- [16] Hsiao, Y. Y., Chang, W. C., Chen, S. L., A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine. *Energy*, 35: 1447-1454, 2010.
- [17] In, B. D., Kim, H. I., Son, J. W., Lee, K. H., The study of a thermoelectric generator with various thermal conditions of exhaust gas from a diesel engine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86: 667-680, 2015.
- [18] Niu, Z., Diao, H., Yu, S., Jiao, K., Du, Q., Shu, G., Investigation and design optimization of exhaust-based thermoelectric generator system for internal combustion engine. *Energy Conversion and Management*, 85: 85-101, 2014.
- [19] Kühn, R., Koeppen, O., Schulze, P., Jansch, D., Comparison between a plate and a tube bundle geometry of a simulated thermoelectric generator in the exhaust gas system of a vehicle. *Materials Today: Proceedings*, 2:761-769, 2015.
- [20] Kim, T. Y., Negash, A. A., Cho, G., Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*, 124:280-286, 2016.

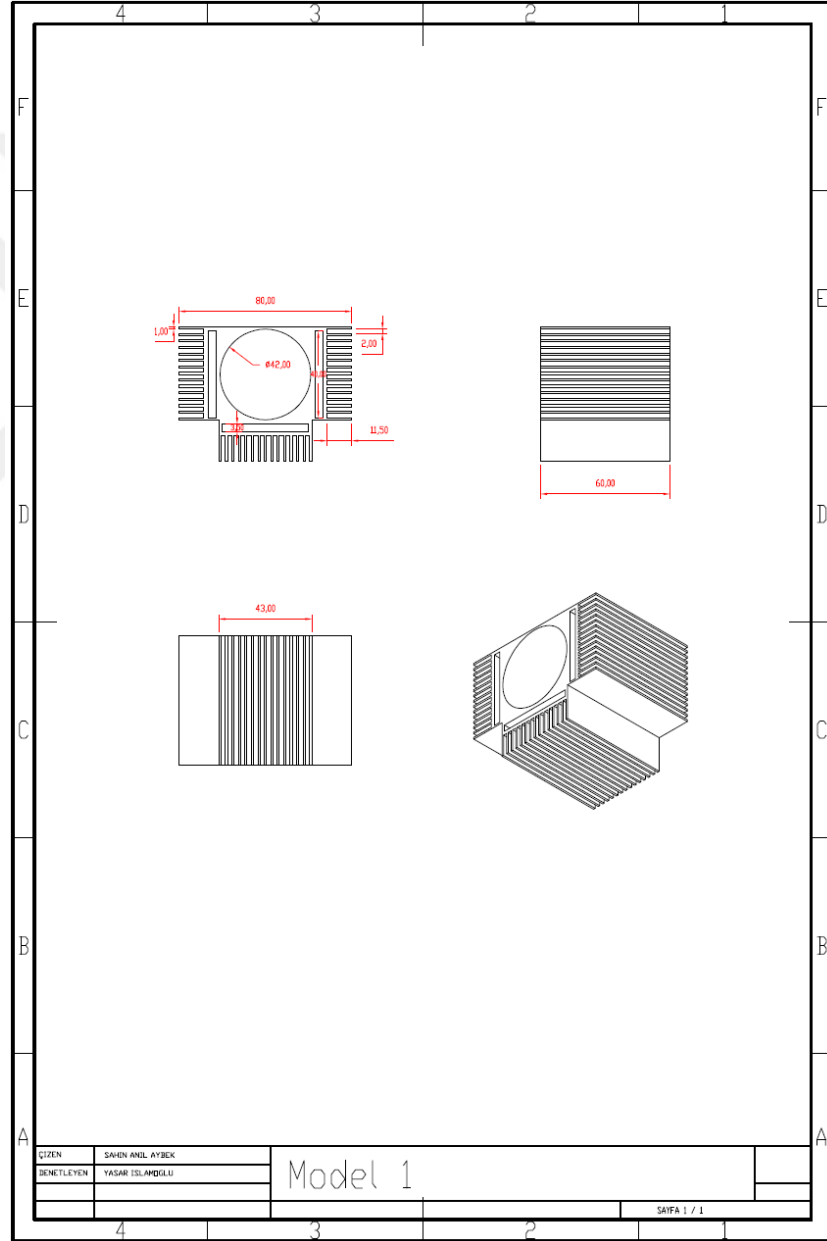
- [21] Orr, B., Akbarzadeh, A., Lappas, P., An exhaust heat recovery system utilising thermoelectric generators and heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, DOI: pii/S1359431116330095.
- [22] Elnaggar, M. H. A., Abdullah, M. Z., Muheebu, M. A., Experimental analysis and FEM simulation of finned U-shape multi heat pipe for desktop PC cooling. *Energy Conversion and Management*, 52:2937-2944, 2011.
- [23] Prabisha, M., Ramesh, R., Thermal performance evaluation of heat sink for various fin profiles. *International Journal of Science, Technology & Management*, 4(1):2394-1537, 2015.
- [24] El-Nasr, A. A., El-haggar, S. M., Effective thermal conductivity of heat pipes. *Heat and Mass Transfer*, 32:97-101, 1996.
- [25] Deng, Y. D., Zheng, S. J., Su, C. Q., Yuan, X. H., Yu, C. G., Wang, Y. P., Effect of thermoelectric modules' topological connection on automotive exhaust heat recovery system. *Journal of Electronic Materials*, DOI: 10.1007/s11664-015-4194-6.
- [26] Kim, T. Y., Negash, A., Cho, G., Experimental and numerical study of waste heat recovery characteristics of direct contact thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*, 140:273-280, 2017.
- [27] He, W., Wang, S., Yang, Y., Optimal heat exchanger dimensional analysis under different automobile exhaust temperatures for thermoelectric generator system. *Energy Procedia*, 104:366-371, 2016.
- [28] Wang, Y., Dai, C., & Wang, S. (2013). Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source. *Applied Energy*, 112, 1171–1180. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.018> .
- [29] Marvão, A., Coelho, P. J., & Rodrigues, H. C. (2019). Optimization of a thermoelectric generator for heavy-duty vehicles. *Energy Conversion and Management*, 179(June 2018), 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.045> .
- [30] Shu, G., Ma, X., Tian, H., Yang, H., Chen, T., & Li, X. (2018). Configuration optimization of the segmented modules in an exhaust-based thermoelectric generator for engine waste heat recovery. *Energy*, 160, 612–624. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.175> .

- [31] Mostafavi, S. A., & Mahmoudi, M. (2018). Modeling and fabricating a prototype of a thermoelectric generator system of heat energy recovery from hot exhaust gases and evaluating the effects of important system parameters. *Applied Thermal Engineering*, 132, 624–636. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.018> .
- [32] Cao, Q., Luan, W., & Wang, T. (2018). Performance enhancement of heat pipes assisted thermoelectric generator for automobile exhaust heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 130, 1472–1479. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.134> .
- [33] İslamoğlu, Y., Aybek Ş. A., Termoeleman Ayak Geometrisinin Termoelektrik Güç Üretimine Etkisi-Sayısal İnceleme. 4. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, 2113-2122, 2018.

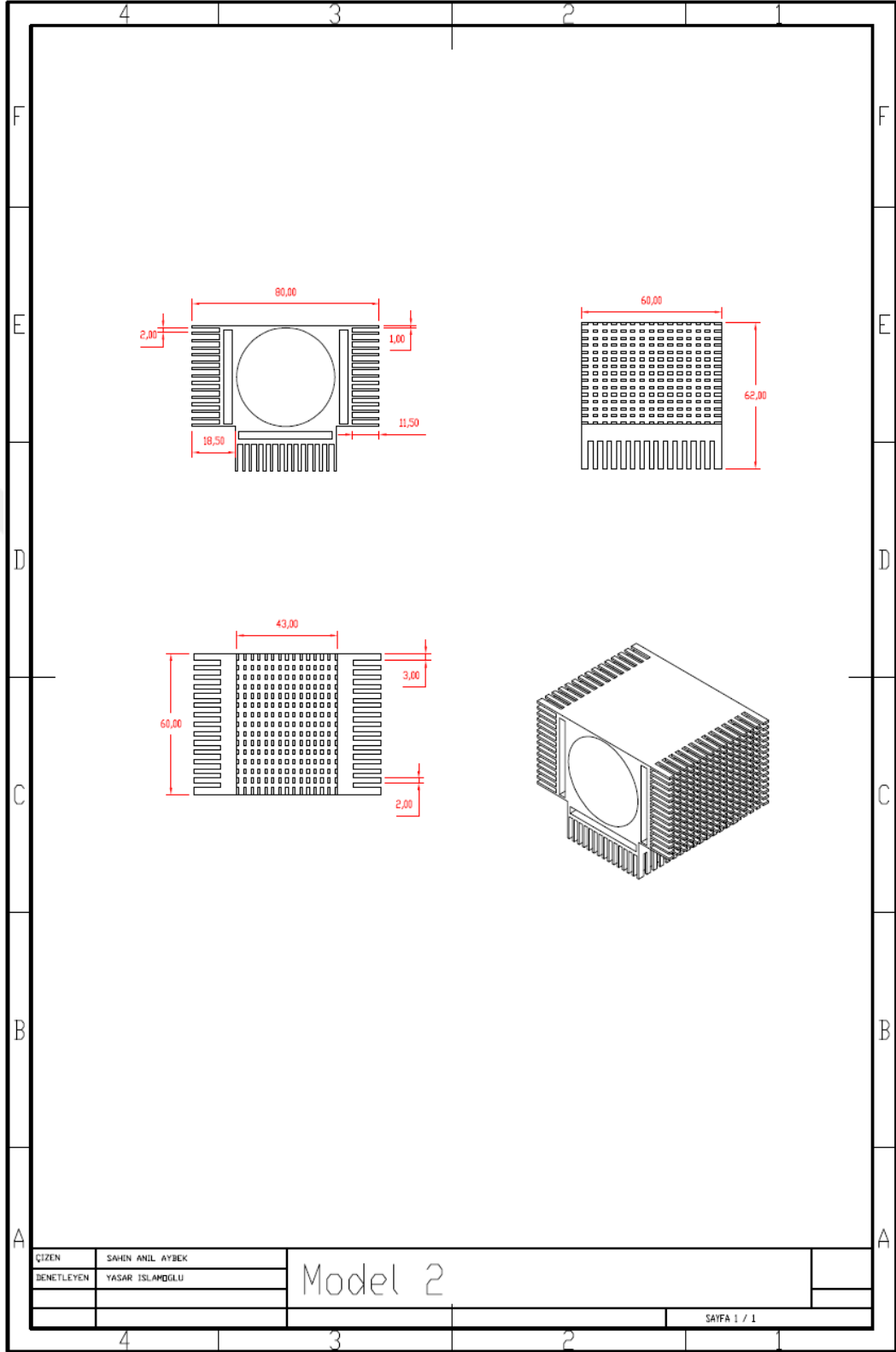


EKLER

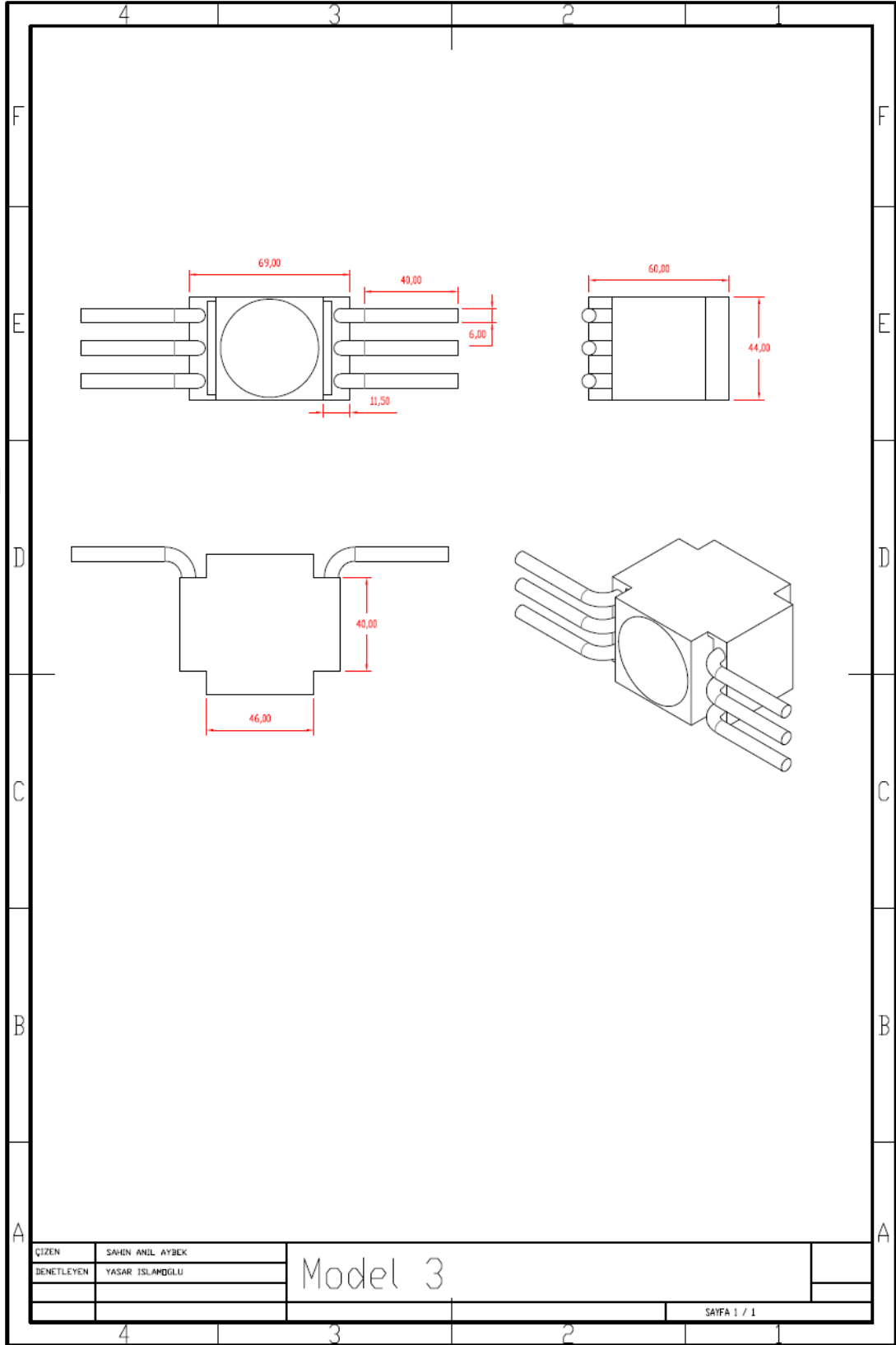
EK A: Tasarlanan Modellerin Teknik Çizimleri



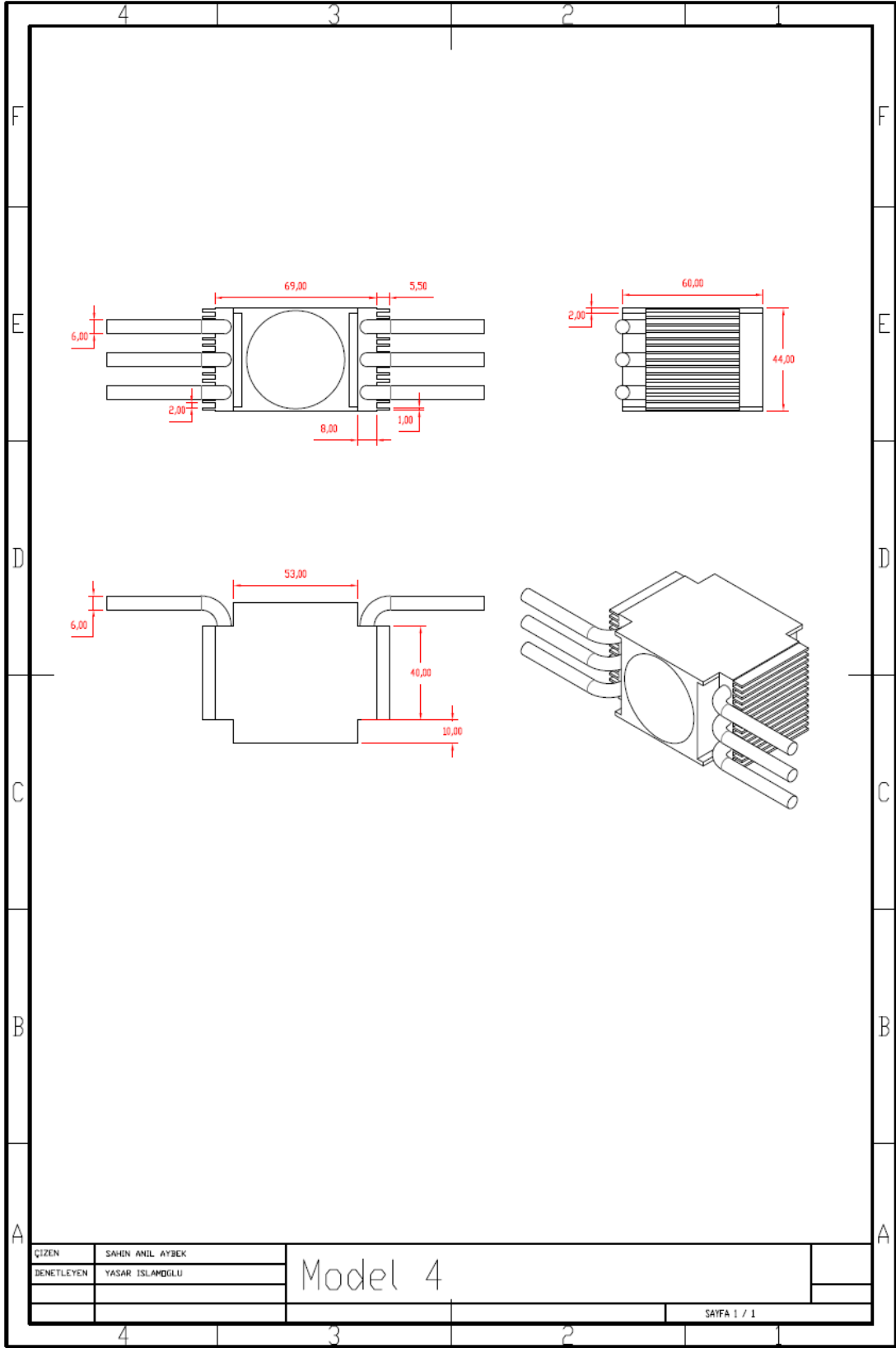
Şekil E1. Model 1 teknik çizimi



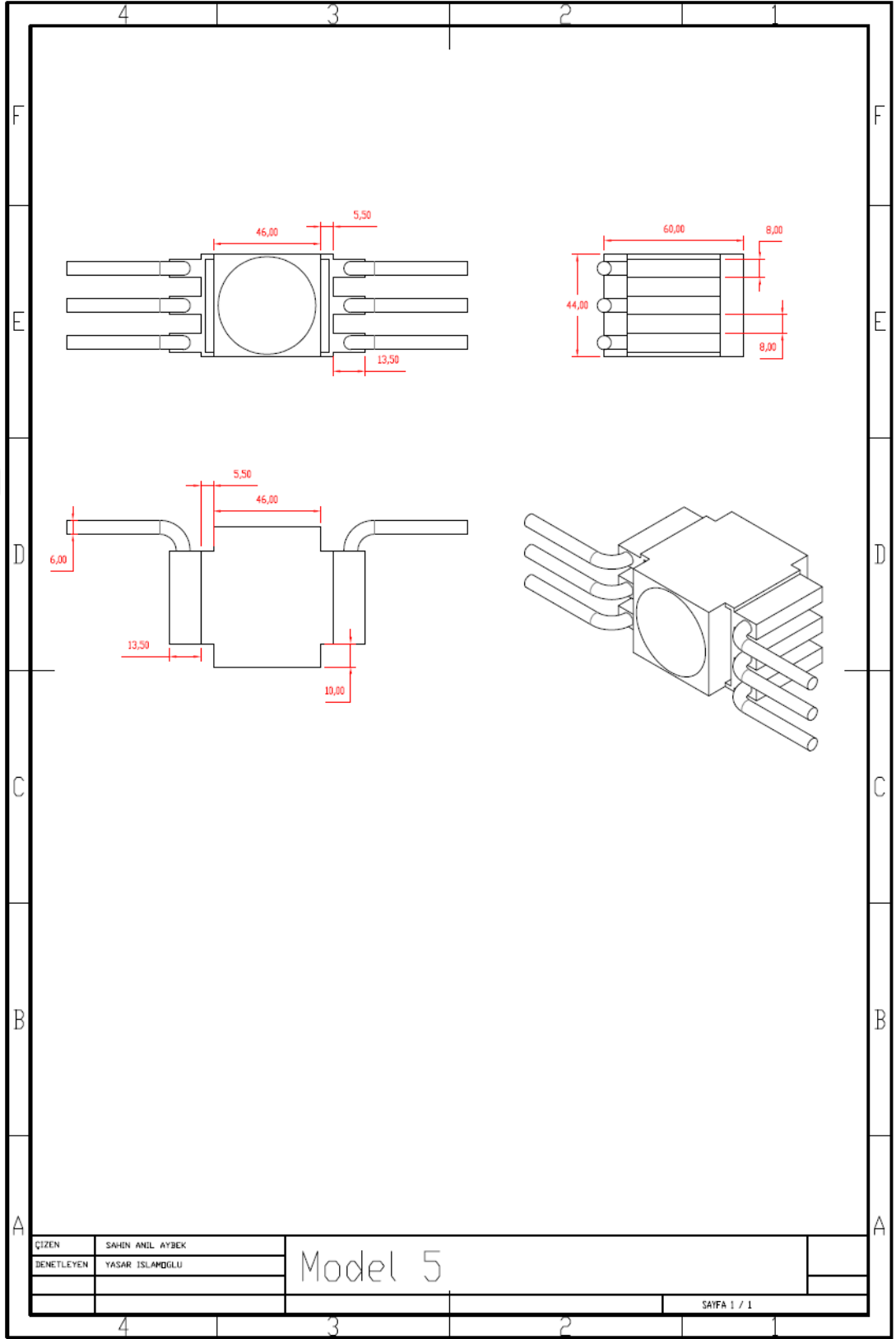
Şekil E2. Model 2 teknik çizimi



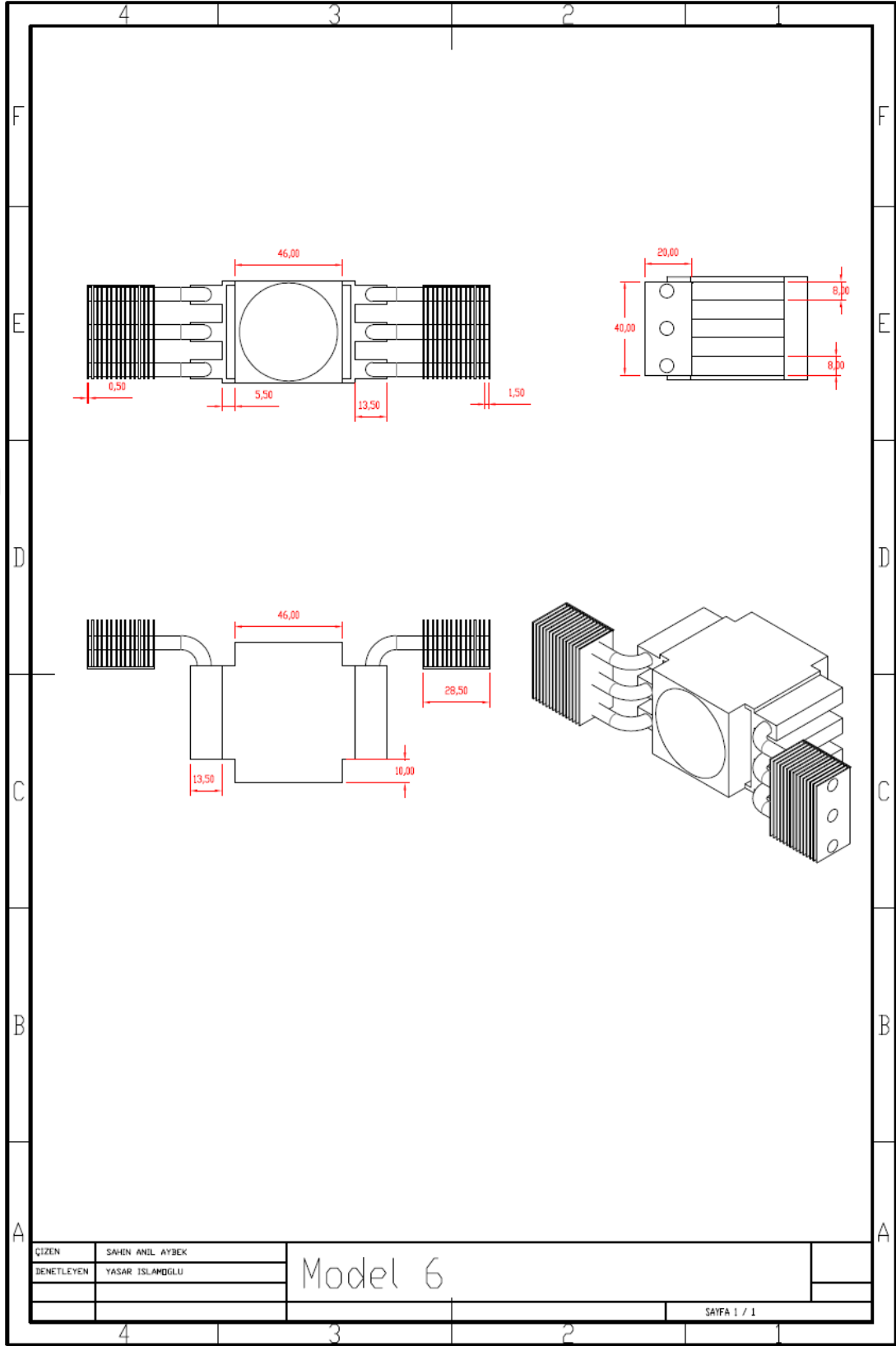
Şekil E3. Model 3 teknik çizimi



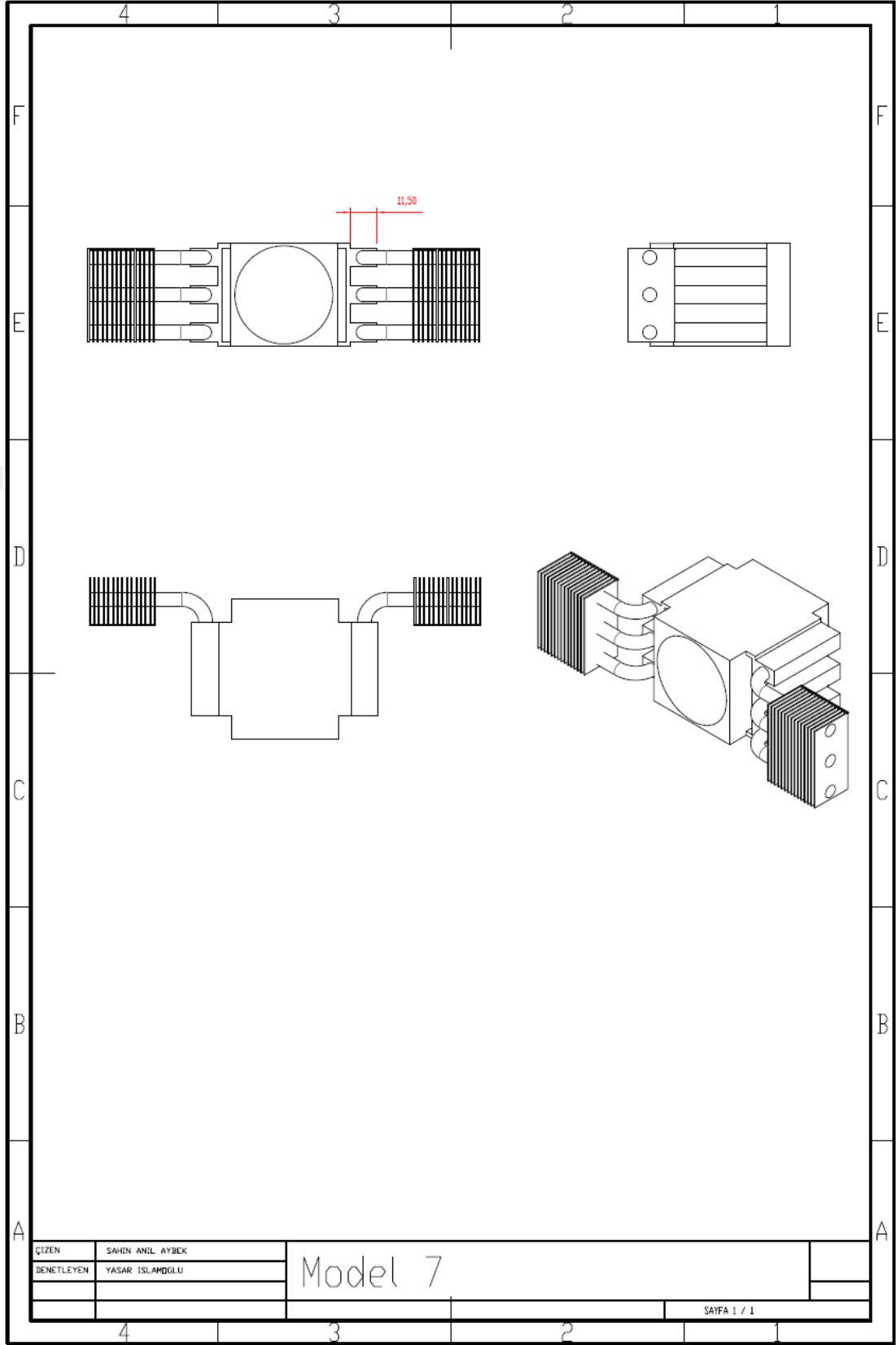
Şekil E4. Model 4 teknik çizimi



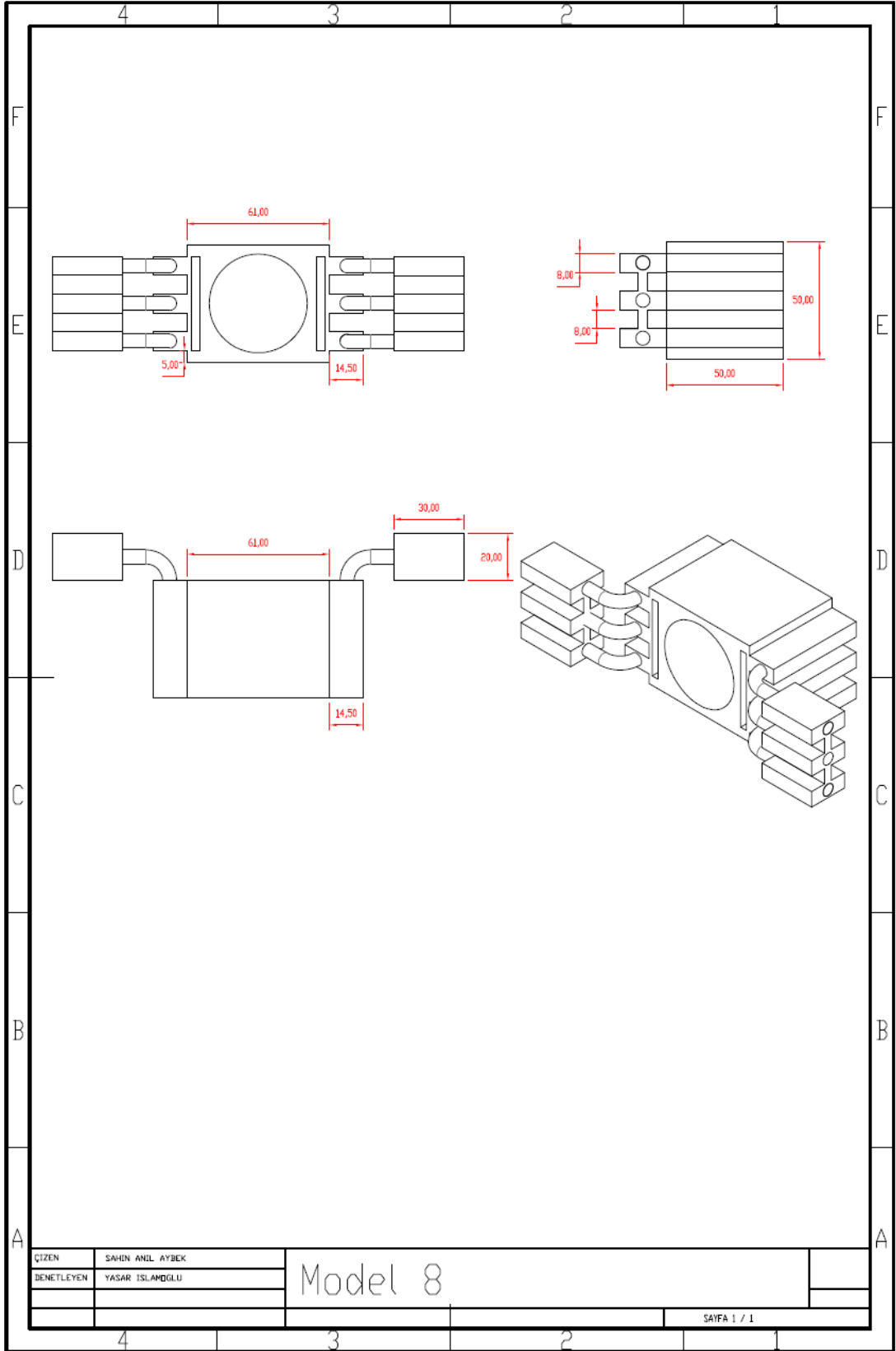
Şekil E5. Model 5 teknik çizimi



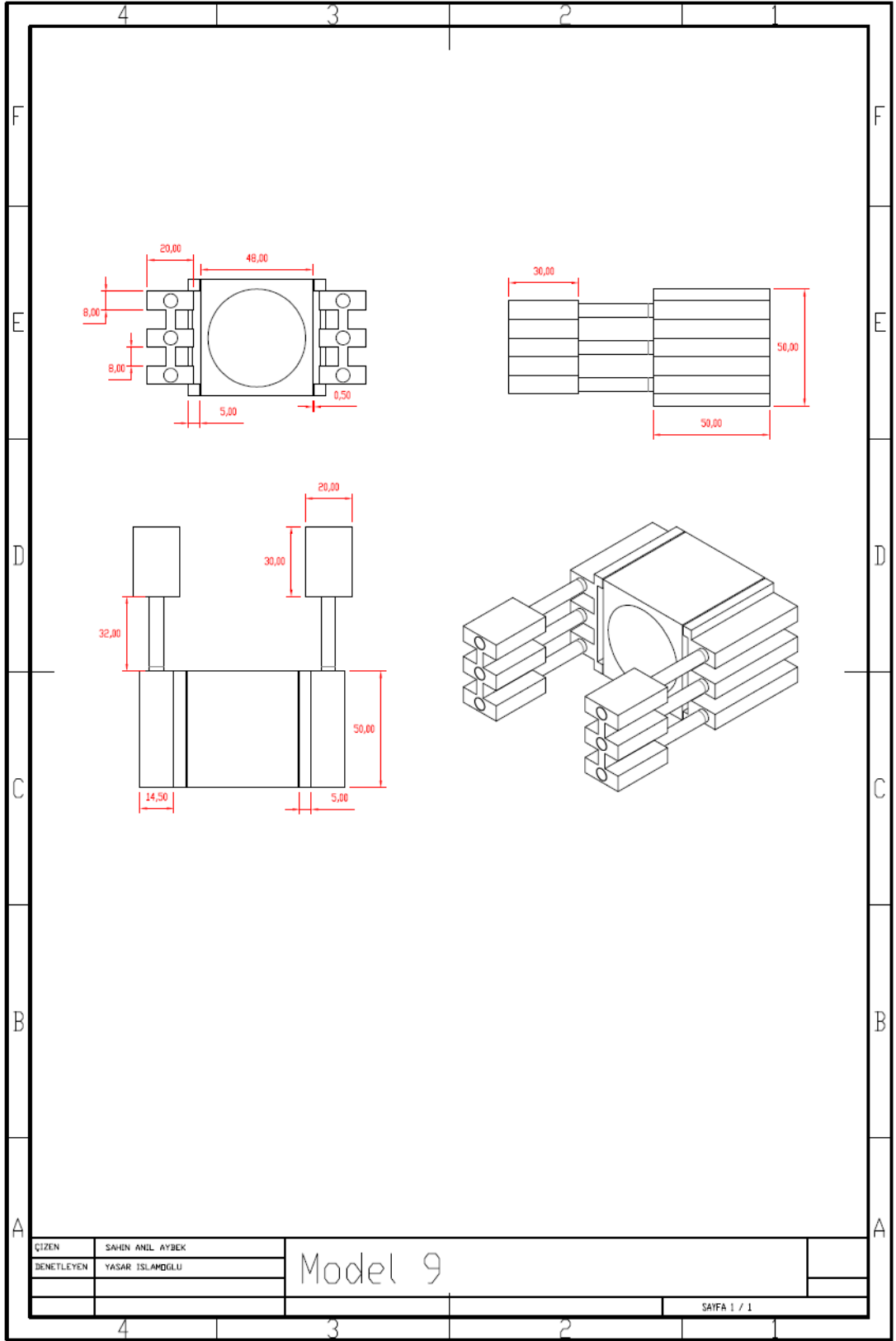
Şekil E6. Model 6 teknik çizimi



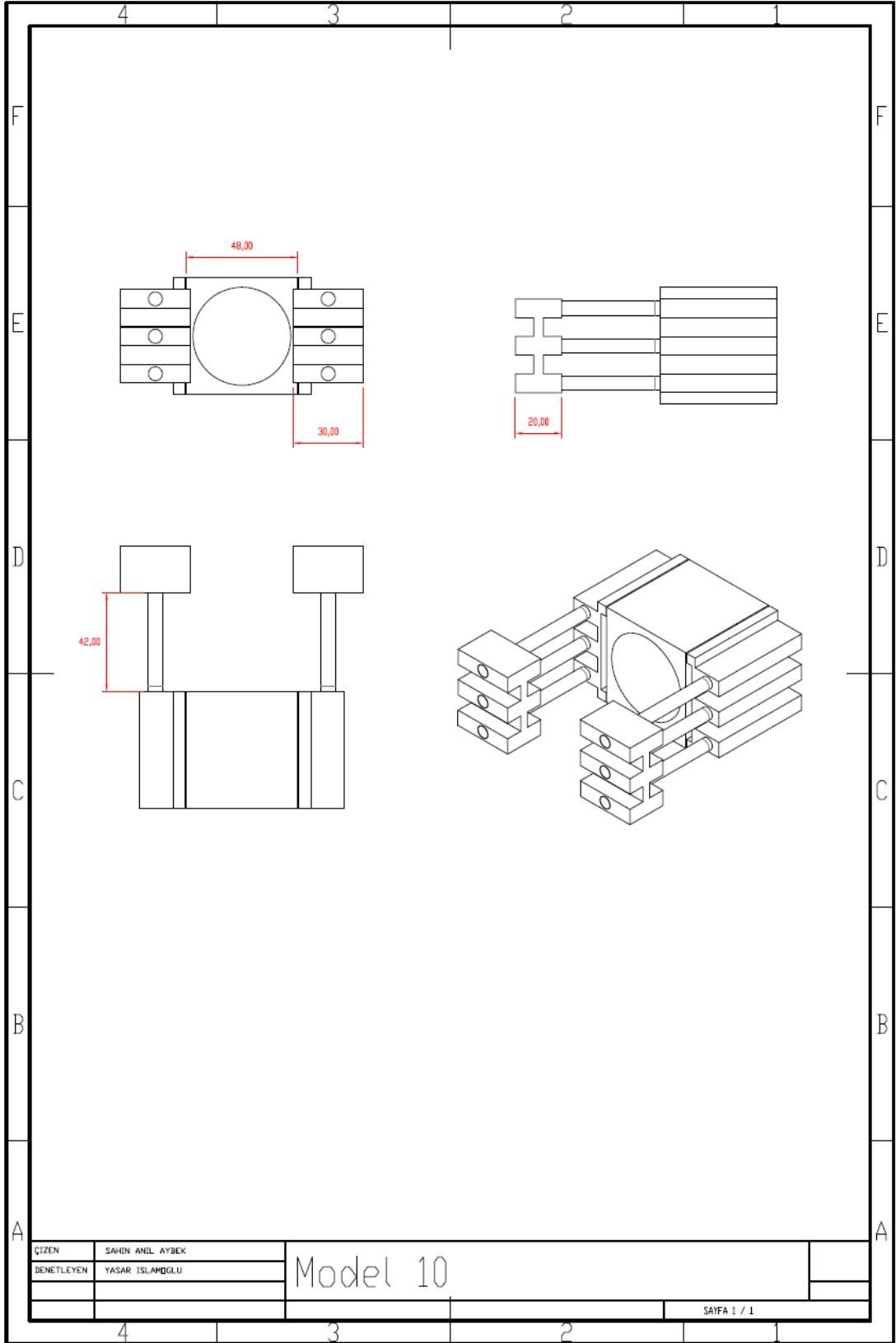
Şekil E7. Model 7 teknik çizimi



Şekil E8. Model 8 teknik çizimi



Şekil E9. Model 9 teknik çizimi



Şekil E10. Model 10 teknik çizimi

ÖZGEÇMİŞ

Şahin Anıl AYBEK, 05.08.1991'de Samsun'da doğdu. İlk ve orta eğitimini Bursa'da, lise eğitimini Yalova'da tamamladı. 2009 yılında Çiftlikköy Atatürk Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü 2013 yılında bitirdi. 2014-2015 yılları arasında Simgetek A.Ş.'de Dizayn Mühendisi olarak çalıştı. 2014 yılında yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünde başladı. İş yaşamına Gizemfrit A.Ş.'de Yatırım-Bakım Mühendisi olarak devam etmektedir.