

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR FERİBOT İÇİN ATIK ISININ KULLANILDIĞI TERMoeLEKTRİK GÜÇ
ÜRETİM SİSTEMİNİN ISIL, ÇEVRESEL VE EKONOMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan BÖBÜR

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR FERİBOT İÇİN ATIK ISININ KULLANILDIĞI TERMOELEKTRİK GÜÇ
ÜRETİM SİSTEMİNİN ISIL, ÇEVRESEL VE EKONOMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Furkan BÖBÜR
(508211003)**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selma ERGİN

HAZİRAN 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**THERMAL, ENVIRONMENTAL AND ECONOMICAL ANALYSIS OF A
THERMOELECTRIC POWER GENERATION SYSTEM USING WASTE
HEAT FOR A FERRY**



M.Sc. THESIS

**Furkan BÖBÜR
(508211003)**

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Naval Architecture and Marine Engineering Program

Thesis Advisor: Prof. Dr. Selma ERGİN

JUNE 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 508211003 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Furkan BÖBÜR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BİR FERİBOT İÇİN ATIK ISININ KULLANILDIĞI TERMOELEKTRİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN ISIL, ÇEVRESEL VE EKONOMİK ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Selma ERGİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Murat Emre DEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 21 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 11 Haziran 2024





Aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca akademik bilgi ve birikimini benimle paylaşan ve çalışmalarına değerli katkıları olan danışmanım sayın Prof. Dr. Selma ERGİN'e teşekkürlerimi sunar ve tez çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2024

Furkan BÖBÜR
(Gemi İnş. ve Gemi Mak. Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
1.2 Literatür Taraması	2
2. GEMİLERDE ATIK ISI KAYNAKLARI	7
2.1 Atık Isı Oluşumu ve Tipik Bir Ana Makinenin Atık Isı Bileşenleri	7
2.1.1 Egzoz gazı	8
2.1.2 Şarj havası	8
2.1.3 Ceket suyu	9
2.1.4 Yağlama yağı	9
2.1.5 Isıl ışıınım.....	9
2.2 Atık Isının Çevreye Etkileri	9
2.3 Atık Isı Geri Kazanım Yöntem ve Teknolojileri.....	10
2.3.1 Kalina çevrimi	10
2.3.2 Rankine çevrimi	11
2.3.3 Brayton çevrimi.....	12
2.3.4 Termoelektrik güç üretimi.....	14
2.3.5 Egzoz gazı türbini	14
2.3.6 Egzoz kazanı	15
3. TERMOELEKTRİK GÜÇ ÜRETİMİ	17
3.1 Giriş.....	17

3.2 Termoelektrik Güç Üretim Sistemi	19
3.3 Termoelektrik Güç Üretiminin Avantaj ve Dezavantajları	20
4. TERMoelekTRİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN MATEMATİK MODELLEMESİ	23
4.1 Isıl Model	23
4.2 Ekonomik Model.....	27
4.3 Çevresel Analiz Modeli.....	28
5. BİR FERİBOT İÇİN ATIK ISININ KULLANILDIĞI TERMoelekTRİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN ANALİZİ VE SONUÇLAR	29
5.1 Feribotun Özellikleri	29
5.2 Seçilen Termoelektrik Modüller	31
5.2.1 TGMT-19W-4V	32
5.2.2 TE-MOD-22W-7V-56.....	32
5.3 Sonuçların Doğrulanması.....	33
5.4 Isıl Analiz Sonuçları.....	34
5.5 Ekonomik Analiz Sonuçları	43
5.6 Çevresel Analiz Sonuçları	54
6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	73

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
EEDI	: Enerji Verimliliği Dizayn Endeksi
EMSA	: Avrupa Deniz Emniyeti Ajansı
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
SEEMP	: Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı
UNCTAD	: Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı



SEMBOLLER

NO_x	: Azot oksitler
SO_2	: Kükürtdioksit
CO	: Karbonmonoksit
CO_2	: Karbondioksit
HC	: Hidrokarbon
SFC	: Özgül yakıt tüketimi, g/kWh
ρ	: Yoğunluk, kg/m^3
C_p	: Özgül ısı kapasitesi, $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$
u	: Hız, m/s
k	: Isıl iletkenlik, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$
T	: Sıcaklık, K
q	: Isı akısı, W/m^2
Q	: Isı kaynağı, W/m^3
Q_{ted}	: Termoelastik sönümlenme, W/m^3
J	: Akım yoğunluğu, A/m^2 .
$Q_{j,v}$	: Akım kaynağı, A/m^3
σ	: Elektriksel iletkenlik, S/m
E	: Elektrik alanı, V/m
J_e	: Dışarıdan üretilen akım yoğunluğu, A/m^2
V	: Elektriksel potansiyel, V
α	: Seebeck katsayısı, V/K
T_H	: Termoelektrik modülün sıcak taraf sıcaklığı, K
T_L	: Termoelektrik modülün soğuk taraf sıcaklığı, K
P_{out}	: Üretilen elektrik gücü, W
R	: Elektrik direnci, Ohm
m	: Elektrik devresinin elektrik direncinin iç elektrik direncine oranı, %
$S^2\sigma$	: Güç faktörü, $\text{W/(m}\cdot\text{K}^2)$
ZT	: Performans katsayısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Farklı ana makine yüklerindeki egzoz gazı sıcaklıkları (Durmaz, 2015).	23
Çizelge 5.1 : Ord. Prof. Ata Nutku feribotunun özellikleri (Kalender, 2017).....	30
Çizelge 5.2 : Yakıt özellikleri (Durmaz, 2015).	31
Çizelge 5.3 : TGMT-19W-4V modülünün özellikleri.	32
Çizelge 5.4 : TE-MOD-22W-7V-56 modülünün özellikleri.	32
Çizelge 5.5 : Doğrulama çalışması için kullanılan çalışma sonuçları.	33
Çizelge 5.6 : Termoelektrik güç üretim sistemi için yapılan ısı analiz bilgileri....	35
Çizelge 5.7 : Isıl analizde bir termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücü.	43
Çizelge 5.8 : TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde üretilen toplam elektrik gücü.....	44
Çizelge 5.9 : TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı.	45
Çizelge 5.10 : TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti.	46
Çizelge 5.11 : Feribotun farklı seyir durumlarındaki makine yükleri.	47
Çizelge 5.12 : Sefer halinde TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı. ..	48
Çizelge 5.13 : Sefer halinde TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti. .	49
Çizelge 5.14 : TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde üretilen toplam elektrik gücü.....	50
Çizelge 5.15 : TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı.	50
Çizelge 5.16 : TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti.....	51
Çizelge 5.17 : Sefer halinde TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı.	53

Çizelge 5.18 : Sefer halinde TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti.....	53
Çizelge 5.19 : Farklı seyir durumlarında feribotun emisyon faktörleri (Durmaz, 2015).....	55
Çizelge 5.20 : TGMT-19W-4V için üç termoelektrik güç üretim sisteminde farklı seyir durumlarında feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık azalma miktarları...	56
Çizelge 5.21 : TGMT-19W-4V için üç termoelektrik güç üretim sisteminde feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık azalma miktarları.	56
Çizelge 5.22 : TE-MOD-22W-7V-56 için üç termoelektrik güç üretim sisteminde farklı seyir durumlarında feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık azalma miktarları.	57
Çizelge 5.23 : TE-MOD-22W-7V-56 için üç termoelektrik güç üretim sisteminde feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık azalma miktarları.	58

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bir gemi makinesinin ısıl denge diyagramı (Jiang ve diğ, 2022).....	7
Şekil 2.2 : Kalina çevrimi (Pacheco-Reyes ve Rivera, 2021).....	10
Şekil 2.3 : Rankine çevrimi (Jiménez-García ve diğ, 2023).....	12
Şekil 2.4 : Brayton çevrimi (Alhwayzee ve diğ, 2021).	13
Şekil 2.5 : Tipik bir kazanın ısıl denge diyagramı (Jayamaha, 2006).	15
Şekil 3.1: Farklı malzemelerin güç faktörleri ve ısıl iletkenlikleri (Huang ve diğ, 2018).....	18
Şekil 3.2 : Termoelektrik modül (Lv ve diğ, 2020).....	19
Şekil 3.3 : Termoelektrik çift (Bode ve diğ, 2017).....	20
Şekil 4.1 : Termoelektrik modüldeki sınır şartları.....	25
Şekil 4.2 : Termoelektrik modülün çözümü için kullanılan dört yüzlü ağ yapısı.....	26
Şekil 4.3 : Termoelektrik modülün çözümü için kullanılan adaptif ağ yapısı.....	26
Şekil 5.1 : Ord. Prof. Ata Nutku feribotu (Durmaz, 2015).....	29
Şekil 5.2 : Makine dairesi (Kalender, 2017).....	30
Şekil 5.3 : Termoelektrik modüllerin üstten ve yandan görünüşü.....	33
Şekil 5.4 : %25 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için sıcaklık dağılımı.	36
Şekil 5.5 : %25 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için voltaj dağılımı.	36
Şekil 5.6 : %50 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için sıcaklık dağılımı.	37
Şekil 5.7 : %50 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için voltaj dağılımı.	37
Şekil 5.8 : %75 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için sıcaklık dağılımı.	38
Şekil 5.9 : %75 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için voltaj dağılımı.	38
Şekil 5.10 : %100 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için sıcaklık dağılımı.	39
Şekil 5.11 : %100 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için voltaj dağılımı.	39
Şekil 5.12 : %25 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 için voltaj dağılımı. .	40
Şekil 5.13 : %50 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 için voltaj dağılımı. .	41
Şekil 5.14 : %75 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 için voltaj dağılımı. .	42
Şekil 5.15 : %100 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 için voltaj dağılımı.	43

Şekil 5.16 : TGMT-19W-4V için termoelektrik güç üretim sisteminin farklı sabit makine yüklerindeki amortisman süreleri.	47
Şekil 5.17 : TE-MOD-22W-7V-56 için termoelektrik güç üretim sisteminin farklı sabit makine yüklerindeki amortisman süreleri.	52



BİR FERİBOT İÇİN ATIK ISININ KULLANILDIĞI TERMoeLEKTRİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN ISIL, ÇEVRESEL VE EKONOMİK ANALİZİ

ÖZET

Enerji ihtiyacı, artan dünya nüfusu ve ticaret hacminden dolayı artmaktadır. Enerjinin aşırı kullanımı zararlı emisyonların artmasına, küresel ısınmaya ve ciddi çevre sorunlarına neden olmaktadır. Küresel ticaretin %80 ile %90 arasındaki kısmı deniz taşımacılığı aracılığıyla sağlanmaktadır. Bundan dolayı gemicilik küresel ekonomi ve tüm beşeri faaliyetlerde önemli bir rol oynamaktadır. Bunun sonucunda gemi sayısı artmaktadır. 2016 yılında dünya gemi filosunda yaklaşık olarak 89.800 gemi bulunmaktayken uluslararası deniz ticaretinde dökme yük, petrol ve konteyner başta olmak üzere taşınan yük yaklaşık 11,3 milyar ton olmuştur. 2022 yılında ise gemi sayısı toplam 126.950 iken 2022 yılında uluslararası deniz ticaretinde taşınan yük yaklaşık 12,1 milyar ton olmuştur. 2016 yılında tanker, dökme yük gemisi, genel kargo gemisi ve konteyner gemileri başta olmak üzere gemilerden yayılan karbondioksit (CO₂) emisyonu yaklaşık 750 milyon ton olurken 2022 yılında ise yaklaşık 860 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2016-2022 arasındaki döneme bakıldığında artan gemi sayısı ve taşınan yüke bağlı olarak gemi kaynaklı emisyon artmıştır.

Deniz taşımacılığı en az emisyon yayan ulaşım tiplerinden birisi olmasına rağmen artan gemi sayısından dolayı atmosfere yayılan emisyon miktarı artmaktadır. 2017 yılında Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde ulaşım sektörü kaynaklı emisyonun yaklaşık %72,9'unu karayolu ulaşımı, %13,3'ünü havacılık, %12,8'ini denizcilik ve geriye kalan %1'lik kısmı da demiryolu ve diğer ulaşım tipleri oluşturmaktadır. Bu oranlara göre deniz taşımacılığının karayolu ve havayolu taşımacılığına göre daha az emisyon yaydığı görünse de deniz taşımacılığı kaynaklı emisyonun ulaşım kaynaklı toplam emisyondaki payı önemli bir değere sahiptir. Bundan dolayı, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (SEEMP) ve Enerji Verimliliği Dizayn Endeksi (EEDI) gibi gemi enerji verimliliğini geliştirme amaçlı düzenlemeler yapmıştır. EEDI gemilerin enerji verimliliğini artırmayı ve gemi kaynaklı emisyonu 2013 yılından sonra inşa edilen gemilerde azaltmayı amaçlamaktadır. SEEMP gemilerin enerji verimliliğini geminin operasyonlarında yapılacak operasyonel optimizasyonlarla artırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, tipik bir gemi makinesinde üretilen gücün yaklaşık yarısı geminin sevki için kullanılırken üretilen gücün %25,5'i egzoz gazı formunda atmosfere salınmaktadır. Tipik bir gemi makinesinden yayılan diğer atık ısı kaynakları %16,5 oranında şarj havası, %5,2 oranında ceket suyu, %2,9 oranında yağlama yağı ve %0,6 oranında ısıtma suyu ısıdır. Bu bir gemi makinesinin ürettiği gücün yarısının atık ısı olarak kullanılamadan atmosfere salındığını göstermektedir. Hem gemi makinelerinin atık ısı oranı hem de küresel deniz ticareti kaynaklı emisyon miktarından dolayı atık ısı geri kazanım yöntemleri önemli bir konu başlığı haline gelmişti ve atık ısı bileşenleri göz önüne alındığında egzoz gazı taşıdığı ısı miktarı ve sahip olduğu sıcaklık ile büyük bir atık ısı geri kazanımı potansiyeline

sahiptir. Gemi makinesinden atık ısı geri kazanımı atmosfere salınan zararlı emisyonların azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada Eskişehir-Topçular arasında yolcu ve araç taşıyan Ord. Prof. Ata Nutku feribotunun ana makinesinin egzoz gazının atık ısısı kullanılarak termoelektrik güç üretimi ile atık ısı geri kazanımı analizi yapılmıştır. Termoelektrik güç üretimi termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkından yararlanılarak voltaj üretimini sağlayan Seebeck etkisi ile ısı enerjiden elektrik enerjisine direkt enerji dönüşümüdür. Bu çalışma kapsamında farklı karakteristiklere sahip TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 olmak üzere iki adet termoelektrik modül seçilmiştir. Seçilen her bir termoelektrik modül için %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerindeki egzoz gazı sıcaklıkları ve 20°C'lik bir deniz suyu sıcaklığı için dört farklı sıcaklık farkında termoelektrik modül boyunca sıcaklık dağılımı ve voltaj dağılımı COMSOL Multiphysics paket programı kullanılarak sürekli ısı iletimi denklemi ve elektrik denklemlerinin birlikte çözülmesiyle elde edilmiştir. İki farklı termoelektrik modül ve dört farklı sıcaklık farkı için toplamda sekiz ayrı durum için ısı analiz yapılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar neticesinde 450, 600 ve 750 adet termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sistemi konfigürasyonu için üretilen elektrik gücü, üretilen elektrik gücünden elde edilen yıllık yakıt tasarrufu ve termoelektrik güç üretim sistemi amortisman süresi hesaplanarak ekonomik analiz yapılmıştır. Ek olarak, termoelektrik güç üretim sistemlerinin egzoz gazının atık ısısından yararlanarak elektrik gücü üretmesi sonucunda atmosfere yayılan emisyonlardaki azalmalar NO_x, SO₂, CO, CO₂ ve HC gibi farklı emisyon tipleri için hesaplanarak çevresel analiz yapılmıştır. Son olarak bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer çalışmaların sonuçlarıyla kıyaslanarak doğrulama çalışması yapılmıştır ve bu çalışmada bulunan sonuçların literatürden alınan çalışmaların sonuçlarıyla uyum gösterdiği görülmüştür.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerinde 450, 600 ve 750 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülüne sahip bir termoelektrik güç üretim sisteminden üretilen elektrik gücü 437 W- 1350 W arasında değişmektedir. Aynı sayılardaki TGMT-19W-4V termoelektrik modüllerinde farklı ana makine yüklerinde üretilen elektrik gücü 175 kW'lık bir yardımcı makine gücünün %0,25'i ile %0,77'si arasında değişmektedir. TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün bulunduğu termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süreleri %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerinde sırasıyla 22,1 yıl, 21,5 yıl, 13,5 yıl ve 11,9 yıldır. Ana makine yükü arttığında termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü arttığı için yakıt maliyetinden yapılan tasarruf artmaktadır. Bunun sonucunda amortisman süresi ana makine yükünün artmasıyla beraber azalmaktadır. Feribotun sefer halindeki ana makine yükü değişimleri göz önüne alındığında sistemlerin amortisman süresi 16,5 yıl olarak hesaplanmıştır.

%25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerinde 450, 600 ve 750 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülüne sahip bir termoelektrik güç üretim sisteminden üretilen elektrik gücü 972 W- 3000 W arasında değişmektedir. Aynı sayılardaki TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modüllerinde farklı ana makine yüklerinde üretilen elektrik gücü 175 kW'lık bir yardımcı makine gücünün %0,55'i ile %1,71'i arasında değişmektedir. TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün bulunduğu termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süreleri %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerinde sırasıyla 12,6 yıl, 12,2 yıl, 7,7 yıl ve 6,8 yıldır. TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülündeki amortisman süresi tüm ana makine yüklerinde TGMT-19W-4V termoelektrik modülünden daha kısadır. Feribot sefer halindeyken

sistemlerin amortisman süresi 9,4 yıl olarak hesaplanmıştır. TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için amortisman süresi TGMT-19W-4V termoelektrik modülünden daha kısadır. TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü daha çok elektrik gücü ürettiği için TE-MOD-22W-7V-56 modülünün incelendiği tüm durumlarda emisyon türlerindeki yıllık azalma oranları TGMT-19W-4V termoelektrik modülündekilerden daha yüksektir.





THERMAL, ENVIRONMENTAL AND ECONOMICAL ANALYSIS OF A THERMOELECTRIC POWER GENERATION SYSTEM USING WASTE HEAT FOR A FERRY

SUMMARY

Energy need is increasing due to the increasing world population and trade volume. Excessive use of energy causes increased harmful emissions, global warming, and serious environmental problems. Between 80% and 90% of global trade is provided by shipping. Therefore, it plays an important role in the global economy and all human activities. As a result, the number of ships is increasing. While there were approximately 89,800 ships in the world shipping fleet in 2016, the cargo carried in international maritime trade, especially bulk cargo, oil, and containers, was approximately 11.3 billion tons. While the total number of ships in 2022 was 126,950, the cargo carried in international maritime trade in 2022 was approximately 12.1 billion tons. While carbon dioxide (CO₂) emissions from ships, especially tankers, bulk carriers, general cargo ships, and container ships, were approximately 750 million tons in 2016, they will be approximately 860 million tons in 2022. Between 2016 and 2022, ship-related emissions have increased because of the increasing number of ships and the cargo carried.

Although maritime transportation is one of the transportation modes that has the least emissions, the amount of emissions released into the atmosphere is increasing because of the increasing number of ships. In 2017, approximately 72.9% of the emissions from the transportation sector in the European Union (EU) countries were made by road transportation, 13.3% by aviation, 12.8% by shipping, and the remaining 1% by railway and other transportation modes. According to these rates, although it appears that maritime transportation emits less emissions than road and air transportation, the share of shipping-related emissions in the total transportation-related emissions is significant. Therefore, the International Maritime Organization (IMO) has developed regulations to improve ship energy efficiency, such as the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) and the Energy Efficiency Design Index (EEDI). The EEDI aims to increase the energy efficiency of ships and reduce ship-related emissions in ships built after 2013. The SEEMP aims to increase the energy efficiency of ships with operational optimizations in the ship's operations. Additionally, while approximately half of the power produced in a typical marine engine is used for the propulsion of the ship, 25.5% of the generated power is released into the atmosphere in the form of the exhaust gas. Other waste heat sources emitted from a typical marine engine are of 16.5% charge air, 5.2% jacket water, 2.9% lubricating oil, and 0.6% thermal radiation. This indicates that half of the power produced by a marine engine is released into the atmosphere without utilizing in a ship. Waste heat recovery methods have become a significant issue because of the waste heat rate of a typical marine engine and the amount of emissions from global maritime trade. Among waste heat sources in a typical marine engine, exhaust gas has a significant waste heat

recovery potential because of its amount of heat and temperature. Waste heat recovery from marine engine plays an important role in reducing harmful emissions released into the atmosphere.

In this study, waste heat recovery with thermoelectric power generation analysis is conducted using the waste heat of the exhaust gas of the main engine of the Ord. Prof. Ata Nutku ferry, which carries passengers and vehicles between Eskihisar and Topçular. Thermoelectric power generation is a direct energy conversion from thermal energy to electrical energy by the Seebeck effect, which produces voltage using the temperature difference between the hot and cold junctions of the thermoelectric module. In this study, two thermoelectric modules with different characteristics, TGMT-19W-4V and TE-MOD-22W-7V-56, are selected. For each selected thermoelectric module, temperature and voltage distribution on the thermoelectric module at four different temperature differences for exhaust gas temperatures at 25%, 50%, 75%, and 100% main engine loads and the sea water temperature of 20°C are obtained by solving the coupled steady heat conduction equation and the electrical equations using the COMSOL Multiphysics package program. Thermal analysis is performed under eight different conditions for two different thermoelectric modules and four different temperature differences. Then, an economic analysis is performed by calculating the electrical power produced for three different thermoelectric power generation system configurations which have 450, 600, and 750 thermoelectric modules, the annual fuel savings obtained from the produced electrical power, and the amortisation period of the thermoelectric power generation system. In addition, environmental analysis is conducted by calculating the reduction in emissions emitted to the atmosphere because of thermoelectric power generation systems producing electrical power using the waste heat of the exhaust gas for different emission types such as NO_x, SO₂, CO, CO₂, and HC. Finally, a validation study is conducted by comparing the results obtained in this study with the results of other studies in the literature, and it can be seen that the results found in this study are consistent with the results of studies from the literature.

According to the results obtained in this study, the electrical power produced from a thermoelectric power generation system with 450, 600, and 750 TGMT-19W-4V thermoelectric modules at 25%, 50%, 75%, and 100% main engine loads varies between 437 W and 1350 W. The electrical power produced at different main engine loads in the same number of TGMT-19W-4V thermoelectric modules varies between 0.25% and 0.77% of a 175 kW auxiliary engine power. The amortisation periods of the thermoelectric power generation system with the TGMT-19W-4V thermoelectric module are 22.1, 21.5, 13.5, and 11.9 years, respectively, at 25%, 50%, 75%, and 100% main engine loads. When the main engine load increases, the savings in fuel costs increase as the electrical power produced by the thermoelectric power generation system increases. As a result, the amortisation period decreases as the main engine load increases. The amortisation period of the system is calculated as 16.5 years under voyage. The electrical power produced from a thermoelectric power generation system with 450, 600, and 750 TE-MOD-22W-7V-56 thermoelectric modules at 25%, 50%, 75%, and 100% main engine loads varies between 972 W and 3000 W. The electrical power produced in the same number of TE-MOD-22W-7V-56 thermoelectric modules at different main engine loads varies between 0.55% and 1.71% of a 175 kW auxiliary engine power. The amortisation periods of the thermoelectric power generation system with the TE-MOD-22W-7V-56 thermoelectric module are 12.6, 12.2, 7.7, and 6.8 years, respectively, at 25%, 50%, 75%, and 100% main engine loads. The amortisation

time of the TE-MOD-22W-7V-56 thermoelectric module is shorter than that of the TGMT-19W-4V thermoelectric module at all main engine loads. The amortisation period of the systems while the ferry is under voyage is calculated as 9.4 years. The amortisation period for the TE-MOD-22W-7V-56 thermoelectric module is shorter than that for the TGMT-19W-4V thermoelectric module. Because the TE-MOD-22W-7V-56 thermoelectric module produces more electrical power, the annual reduction rates in emission types are higher than those of the TGMT-19W-4V thermoelectric module in all cases examined.





1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Dünya enerji ihtiyacı artan nüfus ve ticaret hacminden dolayı artmaktadır. Enerjinin aşırı kullanımı zararlı emisyonların artmasına, küresel ısınmaya ve ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Küresel ticaretin %80 ile %90 arasındaki kısmı deniz taşımacılığı aracılığıyla yani gemilerle sağlanmaktadır. Gemicilik küresel ekonomi ve tüm beşeri faaliyetlerde önemli bir rol oynamaktadır (Baldi ve diğ., 2015). Bundan dolayı gemi sayısı artmaktadır. 2016 yılında dünya gemi filosunda yaklaşık olarak 16.400 genel kargo gemisi, 13.200 petrol ve kimyasal tanker ve 11.600 dökme yük gemisi olmak üzere toplam 89.800 gemi bulunmaktadır (Equasis Statistics, 2016). 2022 yılında ise yaklaşık olarak 16.600 genel kargo gemisi, 14.600 petrol ve kimyasal tanker ve 13.200 dökme yük gemisi olmak üzere toplam 126.950 gemi bulunmaktadır (Equasis Statistics, 2022). 2016 yılında uluslararası deniz ticaretinde dökme yük, petrol ve konteyner başta olmak üzere yaklaşık 11,3 milyar ton yük taşınırken 2022 yılında ise yaklaşık 12,1 milyar ton yük taşınmıştır. 2016 yılında tanker, dökme yük gemisi, genel kargo gemisi ve konteyner gemileri başta olmak üzere gemilerden yayılan karbondioksit (CO₂) emisyonu yaklaşık 750 milyon ton olurken 2022 yılında ise yaklaşık 860 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (UNCTAD, 2023). Bu veriler ele alındığında 2016-2022 arasındaki dönemde uluslararası deniz ticaretinde taşınan yük miktarı %7,1 oranında artarken aynı dönemde gemilerden yayılan karbondioksit emisyonu miktarı %14,7 artmıştır. Bu verilerden elde edilen sonuca göre 2016-2022 arasındaki dönemde gemilerden yayılan karbondioksit emisyonu miktarındaki artış gemilerin taşıdığı yükteki artışın 2 katından fazladır. Deniz taşımacılığı en az emisyon yayan ulaşım tiplerinden birisi olmasına rağmen artan gemi sayısından dolayı atmosfere yayılan emisyon miktarı artmaktadır. 2017 yılında Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde ulaşım sektörü kaynaklı emisyonun yaklaşık %72,9'unu karayolu ulaşımı, %13,3'ünü havacılık, %12,8'ini denizcilik ve geriye kalan %1'lik kısmı da demiryolu ve diğer ulaşım tipleri oluşturmaktadır (Fan ve diğ., 2018). Bu oranlar göz önüne alındığında deniz taşımacılığının karayolu ve havayolu taşımacılığına göre daha az

emisyona yaydığı görünse de deniz taşımacılığı kaynaklı emisyonun ulaşım kaynaklı toplam emisyonu oranı azımsanmayacak bir değere sahiptir. Bundan dolayı, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (SEEMP) ve Enerji Verimliliği Dizayn Endeksi (EEDI) gibi gemi enerji verimliliğini geliştirme amaçlı düzenlemeler yapmıştır. EEDI gemilerin enerji verimliliğini artırmayı ve gemi kaynaklı emisyonu 2013 yılından sonra inşa edilen gemilerde gemi gövdesini ve gemi makine operasyonlarını optimize ederek azaltmayı amaçlamaktadır. SEEMP gemilerin enerji verimliliğini geminin operasyonlarında yapılacak ısı geri kazanım ekipmanlarının kurulması ve geminin seyir hızının optimize edilmesi gibi ayarlamalarla artırmayı amaçlamaktadır (Uyanık ve diğ., 2022). Yenilenebilir enerji, yeşil yakıt ve atık ısı geri kazanımı dikkate alınması gereken önemli konu başlıkları haline gelmiştir. Sonuç olarak, atık ısı geri kazanımı çeşitli endüstri dallarında önemli bir araştırma konusu olmuştur. Kalina çevrimi, Rankine çevrimi, termoelektrik güç üretimi ve egzoz gazı türbini atık ısı geri kazanım yöntemlerinden bazılarıdır. Termoelektrik güç üretimi Seebeck etkisiyle ısı enerjiden elektrik enerjisine direkt enerji dönüşümüdür. Seebeck etkisi bir termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkından yararlanarak elektriksel potansiyel yani voltaj üretilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı farklı sayıda ve farklı özelliklere sahip termoelektrik modüllerin ve bir feribotun ana makinesinin çeşitli makine yüklerindeki egzoz gazı sıcaklıklarının bir termoelektrik güç üretim sisteminin ısı performansını üzerindeki etkilerini incelemek, ısı analizinden elde edilen sonuçları ve termoelektrik modüllerin maliyetlerini ele alarak feribotun ana makinesinin farklı makine yükleri ve farklı termoelektrik modüllerin termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süresi üzerindeki etkilerini incelemek ve son olarak termoelektrik güç üretim sistemi sayesinde atmosfere salınan emisyonlardaki azalma miktarlarını farklı emisyon tipleri için elde etmektir. Bu çalışmada ele alınan gemi Ord. Prof. Ata Nutku feribotudur. TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülleri ise bu çalışmada ele alınan termoelektrik modüllerdir.

1.2 Literatür Taraması

Termoelektrik güç üretimi konusunda son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Ji ve diğ. (2016) üç farklı sıcaklık farkında gemi ana makinesinde atık ısı geri kazanımı için

bir termoelektrik güç üretim sisteminin deneysel ve sayısal analizini yapmıştır. Bu çalışmada ele alınan M70 ve M73 gemi ana makinelerinde farklı dizayn ve operasyon koşulları altında termoelektrik güç üretim sistemi tarafından 2 ile 4 kW arasında elektrik gücü üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmanın sonucu artan egzoz gazı sıcaklığının termoelektrik modüllerin sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkını artırdığını ve bunun neticesinde daha çok voltaj üretilebildiğini ve daha çok elektrik gücünün üretilebildiğini göstermiştir. Konstantinou ve diğ. (2022) bir gemi ana makinesinden atık ısı geri kazanımını kullanarak güç üretimi için termoelektrik güç üretim sistemi tasarımı konusunda bir simülasyon çalışması yapmıştır. Bu çalışmanın amacı maksimum elektrik gücü üreten termoelektrik güç üretim sistemini tasarlamaktır. Bu çalışmada termoelektrik güç üretim sisteminin soğuk tarafının geometrisi ve bunun sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucu termoelektrik güç üretim sisteminin performansı üzerinde termoelektrik modüllerin boyutları ve dizilişleri gibi ele alınması gereken başka diğer parametrelerin de olduğunu göstermiştir. Doraghi ve diğ. (2021) termoelektrik modüldeki termoelektrik çiftler için farklı tiplerdeki termoelektrik bacak geometrilerinin performanslarını değerlendirmek için sayısal modelleme çalışması yapmıştır. Literatürde daha önce analizi yapılmamış olan koni ve elmas şeklindeki termoelektrik bacak geometrileri literatürde yaygın bir geometri olan dikdörtgen termoelektrik bacak geometrisiyle termoelektrik güç üretim sisteminin performansı konusunda karşılaştırılmıştır. Elmas şeklindeki geometri dikdörtgen geometriye kıyasla daha yüksek voltaj potansiyeli göstermiştir. Bu çalışma farklı geometrilerde termoelektrik bacak geometrilerine sahip termoelektrik modüllerin geliştirilebilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Eddine ve diğ. (2018) bir gemi makinesi için termoelektrik güç üretimi sisteminin optimizasyonu konusunda bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın ana amacı Bi_2Te_3 ve $\text{Si}_{80}\text{Ge}_{20}$ olmak üzere iki termoelektrik modülün performansının farklı makine yüklerinde deneysel olarak incelenmesidir. Bu çalışmanın sonucu Bi_2Te_3 termoelektrik modülünün düşük makine devrinde daha iyi bir performansa sahip olduğunu ve $\text{Si}_{80}\text{Ge}_{20}$ termoelektrik modülünün tüm makine yüklerinde daha stabil ve süreklilik gösteren bir performans sergilediğini göstermiştir. Georgopoulou ve diğ. (2016) termoelektrik güç üretim sisteminin gemi için uygulanması konusunda parametrik bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma kapsamında çok geniş ham petrol gemisinde (VLCC) süpürme havası soğutucusu ve gemideki bir yardımcı makinenin egzoz gazı için maksimum elektrik gücü üretimini sağlamak amacıyla termoelektrik modül sayısı ve

sıcaklık farkı gibi parametreler ele alınmıştır. Bu çalışmanın sonucunda bir süpürme havası soğutucusu için termoelektrik güç üretim sistemi tarafından yaklaşık 26 kW'lık elektrik gücü üretimi elde edilmiştir ve bu güç geminin ana makine gücünün %0,2'lik kısmına tekabül etmektedir. Gemideki bir yardımcı makinenin egzoz gazı için termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü yaklaşık 1 kW'tır ve bu güç geminin ana makine gücünün %0,12'lik kısmına tekabül etmektedir. Bu çalışmanın sonucu termoelektrik güç üretim sisteminin gemideki düşük sıcaklıktaki atık ısıyı kullanarak atık ısı geri kazanımı sağlayabileceğini göstermiştir. Liu ve diğ. (2022) bir geminin egzoz gazından termoelektrik güç üretimi ile atık ısı geri kazanımının potansiyelini araştırmak ve termoelektrik güç üretimini etkileyen farklı faktörlerin etkilerini belirlemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada su sıcaklığı, sıcak taraf sıcaklığı, voltaj ve üretilen elektrik gücü gibi değişkenler ele alınmıştır. Bu çalışmada su sıcaklığı 50 °C'den 10 °C'ye düşünce voltajın artış oranı %9,15'ten %28,1'e çıkarken maksimum üretilen elektrik gücü artış oranı %17,86'dan %76,79'a çıkmıştır. Sıcak taraf sıcaklığı 200 °C'den 280 °C'ye çıkınca voltaj artış oranı %26,9 ve maksimum üretilen elektrik gücü artış oranı %49,4 oranında artmıştır. Bu çalışmanın sonucu su sıcaklığı ve sıcak taraf sıcaklığının (egzoz gazı sıcaklığı) voltaj ve maksimum üretilen elektrik gücü üzerinde büyük bir etkisinin olduğunu göstermiştir. Omar ve diğ. (2022) farklı tipteki termoelektrik malzemelerden imal edilmiş bir termoelektrik çiftte farklı sıcak taraf sıcaklıkları ve elektrik dirençleri için termoelektrik çiftin farklı şartlar altındaki performansını araştırmak için bir simülasyon çalışması yapmıştır. Bu çalışmada Bi_2Te_3 , SrTiO_3 ve $\text{Ca}_2\text{FeMoO}_6$ termoelektrik malzemeleri 5 Ω , 10 Ω ve 20 Ω 'luk üç farklı elektrik yük direnci altında 300 K, 400 K ve 500 K'lik sıcak taraf sıcaklıklarında ve 273,15 K'lık soğuk taraf sıcaklığında ele alınmıştır. Bütün koşullarda üretilen elektrik gücü ve voltaj grafikleri aynı karakteristiğe sahip olmaktadır fakat sonuçlar malzemelere göre farklılık göstermektedir. SrTiO_3 , Bi_2Te_3 'e göre iki kat daha fazla voltaj ve güç üretirken $\text{Ca}_2\text{FeMoO}_6$ 'dan 100 kat daha fazla voltaj ve güç üretmektedir. Bu çalışmanın sonucu elektrik yük direnci arttıkça üretilen elektrik gücünün başlangıçta arttığını elektrik yük direnci iç dirence eşit olduktan sonra ise azaldığını göstermektedir. Kim ve diğ. (2016) bir termoelektrik güç üretim sisteminin performansını incelemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada maksimum gücü 110 kW olan turboşarjlı 6 silindirli dizel makinenin egzoz gazı sıcak tarafın ısı kaynağı olarak kullanılırken soğuk tarafta su ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. 1000, 1500 ve 2000 rpm makine devri için farklı

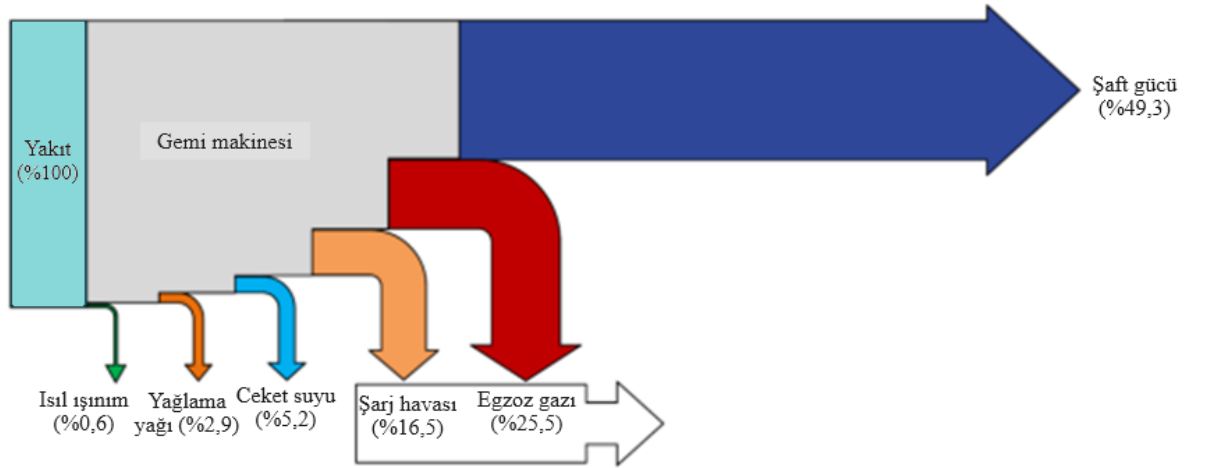
koşullarda sonuçlar alınmıştır. Maksimum üretilen elektrik gücü 2000 rpm makine devrinde yaklaşık 119 W olarak gerçekleşmiştir. Bu çalışmanın sonucu termoelektrik güç üretimi tarafından üretilen elektrik gücünün artan makine yükü ve makine devri ile arttığını göstermiştir. Luo ve diğ. (2022) 102 kW maksimum motor gücü olan bir otomobilde termoelektrik güç üretim sistemi uygulaması ile ilgili bir simülasyon ve deney çalışması yapmıştır. 120 km/saat hızda otomobil termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği net elektrik gücü 23,66 W'tır. Bu çalışmanın sonucu arabanın hızı arttıkça üretilen elektrik gücü ve verimin arttığını ve termoelektrik güç üretim sistemi üzerindeki sıcaklık farkının daha düzgün yayılmasından dolayı termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen voltaj ve elektrik gücünün daha düzgün yayıldığını göstermiştir. Ji ve diğ. (2018) 3200 kW gücünde bir gemi makinesi ve 108 kW gücünde bir araba motorundan atık ısı geri kazanımı için termoelektrik güç üretim sistemi tasarımı ile ilgili parametrik bir çalışma yapmıştır ve maksimum elektrik gücü üretimini sağlamak amacıyla tüm tasarım parametreleri değerlendirilmiştir. Termoelektrik modül yüksekliği ve termoelektrik çiftlerin negatif ve pozitif bacaklarının en kesit alanları oranı bu çalışmada ele alınan parametrelerden bazılarıdır. Araba motoru için yapılan uygulamada termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü en yüksek 167,5 W olurken en düşük değer 7,7 W olmuştur. Gemi makinesinde yapılan uygulamada ise termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü en yüksek 6058,6 W olurken en düşük değer 41 W olmuştur. Bu çalışmanın sonucu termoelektrik modül yüksekliğinin her iki uygulamada da en önemli tasarım parametresi olduğunu göstermiştir. Demir ve Dincer (2017) bir otomobilin egzoz gazından yararlanılarak termoelektrik güç üretimi ile atık ısı geri kazanımı konusunda bir tasarım çalışması yapmıştır. Bu çalışmada $\text{CaMn}_{0,98}\text{Nb}_{0,02}\text{O}_3$, $\text{La}_{1,98}\text{Sr}_{0,02}\text{CuO}_4$ ve $\text{GdCo}_{0,95}\text{Ni}_{0,05}\text{O}_3$ termoelektrik malzemeleri kullanılmıştır ve sayısal olarak analizi yapılmıştır. Termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü 24 W ile 158,4 W aralığındayken termoelektrik dönüşüm verimi %0,14 ile %0,61 aralığında bulunmuştur. Bu çalışmanın sonucu ele alınan $\text{CaMn}_{0,98}\text{Nb}_{0,02}\text{O}_3$, $\text{La}_{1,98}\text{Sr}_{0,02}\text{CuO}_4$ ve $\text{GdCo}_{0,95}\text{Ni}_{0,05}\text{O}_3$ termoelektrik malzemelerin performansının yaygın kullanımı olan Bi_2Te_3 termoelektrik malzemesiyle kıyaslandığında düşük olduğunu göstermiştir. Kristiansen ve diğ. (2012) gemi insineratörünün atık ısısından yararlanarak elektrik gücü üretmek için termoelektrik güç üretimi konusunda çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda 850 kW gücündeki insineratörden termoelektrik güç üretim sistemi ile 58 kW'lık bir elektrik gücü üretilmiştir ve üretilen bu elektrik

gücü insineratörün gücünün %6,8'ine tekabül etmektedir. Nararom ve Bamroongkhan (2018) güneş enerjisinin kullanıldığı termoelektrik güç üretimi ile ilgili çalışma yapmıştır. Bu çalışmada bir mercekle yardımıyla güneş ışınları bir termoelektrik modülün sıcak tarafına toplanarak sıcak tarafın sıcaklığı maksimum 69,6 °C olarak elde edilirken termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafı arasındaki sıcaklık farkı 38,6 °C olmaktadır. Termoelektrik modül %1,8 termoelektrik dönüşüm oranı ile yaklaşık 1 W güç üretmiştir. Bu çalışmanın yol gösterici olarak ileriki çalışmalar için kullanılabileceği çalışmanın sonucunda belirtilmiştir. Bobur ve Ergin (2023) bir feribotun ana makinesinden yayılan egzoz gazının atık ısısından yararlanarak atık ısı geri kazanımı ile elektrik gücü üreten bir termoelektrik güç üretim sisteminin ısı ve ekonomik analizi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada dört farklı makine yükü ve TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 olmak üzere iki farklı termoelektrik modül için termoelektrik modül üzerindeki sıcaklık ve voltaj dağılımları sürekli ısı iletimi denklemi ve elektrik denklemlerinin birlikte çözülmesiyle elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda egzoz gazı sıcaklığı ve deniz suyu sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkını kullanan termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen maksimum elektrik gücü TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için 3 kW olarak %100 makine yükünde elde edilirken minimum elektrik gücü TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için 0,44 kW olarak %25 makine yükünde elde edilmiştir ve bu çalışmanın sonucu ana makine yükü arttıkça egzoz gazı ve deniz suyu arasındaki sıcaklık farkı arttığı için termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücünün arttığını göstermiştir. Bu başlık altında daha önce değinilen çalışmaların yanı sıra literatürde termoelektrik güç üretim sistemi ile diğer güç çevrim yöntemlerinin bir arada olduğu birleşik çevrim yöntemleri ile ilgili çalışmalar da yer almaktadır (Li ve diğ, 2022; Cheng ve diğ, 2023; Liu ve diğ, 2021).

2. GEMİLERDE ATIK ISI KAYNAKLARI

2.1 Atık Isı Oluşumu ve Tipik Bir Ana Makinenin Atık Isı Bileşenleri

Gemide yakıtın sağladığı enerji, kayıplardan dolayı %100 verimle kullanılamamaktadır. Tipik bir gemi makinesinde üretilen gücün yaklaşık %50'si şafta aktarılırak geminin sevki için kullanılırken üretilen gücün %25,5'i egzoz gazı formunda atmosfere salınmaktadır. Tipik bir gemi makinesinin ürettiği gücün gemide yararlanılamadan etrafa yayılan diğer atık ısı bileşenleri şarj havası, ceket suyu, yağlama yağı ve ısıt ışıdır. Bu bileşenlerin gemi makinesinin ürettiği güçteki payı sırasıyla %16,5, %5,2, %2,9 ve %0,6'dır ve Şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1 : Bir gemi makinesinin ısıt denge diyagramı (Jiang ve diğ, 2022).

Atık ısı kaynakları düşük, orta ve yüksek olmak üzere sıcaklık aralıklarına göre üç kalite sınıfında incelenir. 232 °C ve altındaki sıcaklıklardaki atık ısı kaynakları düşük kalite, 232 °C-649 °C arasındaki sıcaklıklardaki atık ısı kaynakları orta kalite ve 649 °C ve üstündeki sıcaklıklardaki atık ısı kaynakları yüksek kaliteli olarak sınıflandırılmaktadır (Kishore ve Priya, 2018). Örneğin, bu çalışmada ele alınan Ord. Prof. Ata Nutku feribotunun egzoz gazı sıcaklığı %25 ve %100 ana makine yükleri arasında 250 °C ile 337 °C arasında değişmektedir bundan dolayı bu gemideki egzoz gazının atık ısısı çoğu gemide olduğu gibi orta kalitededir. Ek olarak, orta ve yüksek

kalitedeki atık ısının geri kazanımı düşük kalitedeki atık ısılara göre daha yüksek potansiyele sahiptir.

2.1.1 Egzoz gazı

İçten yanmalı motorlarda motorun çalışması için sağlanan gücün %30 civarındaki kısmı soğutma suyu ve egzoz gazı aracılığıyla etrafa salınır (Wahile ve diğ, 2020). Şekil 2.1'deki tipik bir gemi makinesinin ısıl denge diyagramı incelendiğinde egzoz gazının atık ısının atık ısı geri kazanım yöntemleri ile geri kazanılarak kullanılmasının atmosfere yayılan emisyonların ve yakıt tüketiminin azaltılması açısından önemli olduğu görülmektedir. Bunun sebebi egzoz gazının yakıtın sağladığı enerjideki payının %25 civarında azımsanamayacak bir oranda olması ve orta kaliteli bir atık ısı kaynağı olmasıdır. Sonuç olarak, egzoz gazının atık ısının hem orta kalitede olması hem de gemi makine gücüne oranla fazla olmasından dolayı egzoz gazı önemli bir atık ısı geri kazanımı potansiyeline sahiptir. Başka bir çalışmada ise Orr ve Akbarzadeh (2017) 500 MW'lık gaz türbini güç santralinde bir atık ısı geri kazanımı teknolojisi olan termoelektrik güç üretimi ile 5,9 MW'lık elektrik gücünün üretilmesinin mümkün olduğunu ve bu gücün yaklaşık 3000 evin enerji ihtiyacını karşılayabileceğini göstermiştir.

2.1.2 Şarj havası

Şekil 2.1'deki tipik bir gemi makinesinin ısıl denge diyagramı incelendiğinde şarj havasının atık ısı geri kazanım potansiyelinin gemi makine gücüne oranından dolayı egzoz gazı kadar olabileceği görülmektedir. Bunun bir diğer nedeni de şarj havasının atık ısı kalitesinin orta kalitede olmasıdır (Yu ve diğ, 2016). Uusitalo ve diğ. (2015) şarj havasının ısının atık ısı kazanım yöntemlerinden birisi olan Organik Rankine çevrimi ile kullanıldığı deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada Organik Rankine çevriminde iş akışkanı olarak R245fa ve izopentan kullanılmıştır. Testler 1,6 MW'lık bir dizel makine ile farklı makine yüklerinde yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda Organik Rankine çevriminin şarj havasının ısını kullanarak incelenen makinenin ürettiği gücü %2 oranında artırabileceği değerlendirilmiştir. Ek olarak, Organik Rankine çevrimi yüksek ve düşük sıcaklıktaki atık ısı kaynaklarının geri kazanımı konusunda etkili bir yöntemdir (Chintala ve diğ, 2018).

2.1.3 Ceket suyu

Şekil 2.1'deki ısıl denge diyagramı incelendiğinde ceket suyunun atık ısı oranının egzoz gazı ve şarj havasına kıyasla düşük olmasından dolayı ceket suyunun atık ısı geri kazanımı uygulamalarında arka planda kalması beklenmektedir. Bunun bir diğer sebebi de ceket suyunun atık ısı kalitesinin düşük kalitede olmasıdır. (Yu ve diğ, 2016). Örneğin, 7900 kW gücünde ana makinesi olan 820 TEU konteyner kapasiteli bir konteyner gemisinin ceket suyu sıcaklığı çıkış tarafında maksimum 83,1 °C'dir (Faisal ve Nugroho, 2016). 232 °C'nin çok altında bir sıcaklığa sahip olmasından dolayı atık ısı geri kazanımı potansiyeli sınırlı bir düzeyde kalmaktadır.

2.1.4 Yağlama yağı

Şekil 2.1'deki tipik bir gemi makinesinin ısıl denge diyagramı incelendiğinde yağlama yağının atık ısı oranı düşük olduğu için ve düşük kaliteli atık ısı olduğu için atık ısı geri kazanımı potansiyeli yoktur.

2.1.5 Isıl ışıınım

Isıl ışıınım bir cisim tarafından atomlarının veya moleküllerinin elektronik dizilimlerindeki değişimlerin sonucu olarak elektromanyetik dalga formunda yayılan ısı enerjisidir. Isıl ışıınım diğer ısı transferi mekanizmalarından farklı olarak yayılmak için fiziksel bir ortama ihtiyaç duymamaktadır. Şekil 2.1'deki tipik bir gemi makinesinin ısıl denge diyagramı incelendiğinde ısıl ışıınımın yakıtın sağladığı enerjideki payının çok küçük olmasından dolayı atık ısı geri kazanımı söz konusu olmamaktadır.

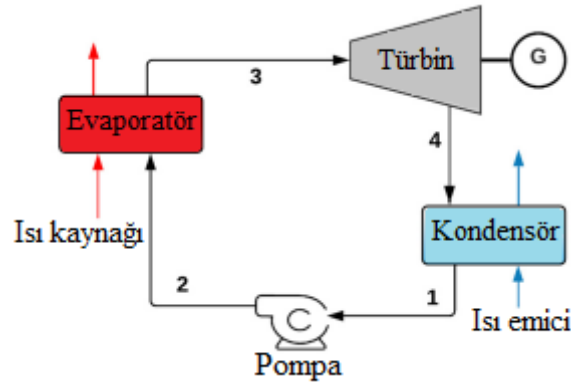
2.2 Atık Isının Çevreye Etkileri

Atık ısıların atmosfere yaydığı yüksek sıcaklıktaki ısı dünyayı ısıtarak küresel ısınmaya ve buna bağlı olarak iklim değişikliğine neden olmaktadır. Ayrıca, atmosfere yayılan atık ıslardan dolayı endüstride kullanılan sistemlerin, güç santrallerinin ve taşıtların enerji verimliliği düşük olmaktadır. Bu durum çeşitli alanlarda kullanılan fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin büyük bir kısmının boşa gitmesine, gereğinden fazla yakıt tüketimine, atmosfere yayılan emisyonların artmasına, ekonomik kaynaklardan enerjiye ayrılan payın büyümesine, hava kirliliğine, solunum yolu hastalıklarına ve buna bağlı ölümlere ve sıcaklıkların mevsim normallerinin üzerinde

buharlaştırılan karışım separatöre girer ve burada yüksek amonyak içerikli buhar separatörden üst taraftan ayrılırken (12) düşük amonyak içerikli buhar alt taraftan çıkar (13). Karışımın separatörden ayrılan kısmı (14) buharla karışarak iş akışkanı olarak kullanılan karışımı oluşturur ve ekonomizere (15) ardından da kondensöre (16) girer. Karışımın separatörden ayrılan diğer kısmı (17) ekonomizerde önden ısıtılır (18) ve genişleme valfinde çevrimi tekrarlamak için genişir (Pacheco-Reyes ve Rivera, 2021). Bu şekilde çevrimin başında kullanılan ısı kaynağı atık ısı kaynağından sağlandığında atık ısı geri kazanımı ile elektrik enerjisi üretimi gerçekleşir. Kalina çevrimi ile ilgili literatürde birçok çalışma vardır. Örneğin, Hossain ve diğ. (2021) çok fazlı genişletirici eklenmiş iki ayrı Kalina çevriminin yüksek sıcaklıktaki uygulamalarının karşılaştırılması ile ilgili bir çalışma yapmıştır. İş akışkanındaki amonyak derişimi ve buharlaşma basıncı gibi parametrelerin etkisi de araştırılmıştır ve sürekli operasyon koşulları altında üretilecek net gücün maksimum olması amacıyla optimizasyon yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda Kalina çevrimi 12A'nın ısı verimi Kalina çevrimi 12'ye göre maksimum %3,23 oranında artarken Kalina çevrimi 12B'nin ısı verimi maksimum %3,94 oranında artmıştır. Wang ve diğ. (2013) ise güneş enerjisi ile çalışan bir Kalina çevriminin optimizasyonu ve parametrik analizi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Sistem performansı üzerinde önemli etkileri olan termodinamik parametreler incelenmiştir. Sistem verimi amaç fonksiyonu olarak belirlenip güneş enerjisi ile çalışan Kalina çevrimi optimize edilmiştir. %50 ile %90 arasındaki derişimlerde amonyak su karışımı ve 14 ile 30 bar arasındaki türbin giriş basıncı şartlarında optimize edilmiş sistem verimi %8,54 olarak elde edilmiştir.

2.3.2 Rankine çevrimi

Rankine çevrimi atık ısı enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yapan bir çevrimdir. Rankine çevriminin evaporatör, türbin, kondensör ve pompa olmak üzere 4 ana bileşeni vardır ve Rankine çevriminin şeması Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Rankine çevrimi (Jiménez-García ve diğ, 2023).

Rankine çevriminde doymuş haldeki sıvı iş akışkanı (1) kondensörden evaporatöre, basıncı artırılarak, pompalanır (2). Evaporatörde ısı kaynağından ısı formunda enerji alınarak iş akışkanı buharlaştırılır. Ardından iş akışkanı, basıncı azalarak, evaporatörden türbine geçer (3) ve türbinde güç üretilir (4). Güç üretimi sonrasında iş akışkanı kondensöre gider ve burada çevrimi tekrarlamak için sıvı hale getirilir (Jiménez-García ve diğ, 2023). Rankine çevrimindeki iş akışkanının organik bir iş akışkanı olması durumunda çevrim organik Rankine çevrimi olarak adlandırılmaktadır. Rankine çevrimi ile ilgili literatürde birçok çalışma vardır. Örneğin, tipik bir organik Rankine çevrimi modülü 300 °C'ye kadar olan atık ısıları kullanarak 300 kW ile 2 MW aralığında elektrik gücü üretme kabiliyetine sahiptir (Ja'fari ve diğ, 2023). Konur ve diğ. (2022) organik Rankine sistemi entegre edilmiş bir tanker gemisinde atık ısı geri kazanımının yakıt tasarrufu potansiyelinin ve performansının analizi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın sonucu organik Rankine çevriminin geminin dizel jeneratörlerinde %15 yakıt tasarrufu sağladığını ve geminin toplam yakıt sarfiyatını %5,16 oranında azalttığını göstermiştir. Bu çalışma Rankine çevriminin atık ısı geri kazanımı konusundaki potansiyelini göstermektedir.

2.3.3 Brayton çevrimi

Brayton çevrimi ısı enerjisinden yararlanarak mekanik iş üreten bir çevrimdir. Brayton çevriminde ilk önce kompresör etraftan aldığı havayı sıkıştırarak basıncını artırır (1) ve ısı eşanjörüne verir. Isı eşanjöründe hava ısıtılır (2) ve türbine verilir. Türbinde sıcak hava genişleyerek enerji üretilir (3). Ardından türbin dışında kalan artık ısı diğer ısı eşanjörüne verilerek (4) burada soğutulup kompresörün kullanabileceği sıcaklığa getirilir ve soğutulmuş hava türbine bağlı kompresöre verilerek türbinin ürettiği enerji sayesinde kompresörün çalışmasıyla döngü devam eder. Bu çevrimde (2) ile (3)

arasında yer alan ısı eşanjörü yerine bir atık ısı kaynağından atık ısı alınarak kompresörün sıkıştırdığı hava ısıtılırsa hem ekstra ekipman maliyetinden feragat edilmiş olur hem de atık ısı geri kazanımı yapılarak atık ısıdan faydalanılmış olur. Türbinin enerji üretmesi sonrasında dışarıda kalan sıcak hava ise (4) ve (1) arasındaki ısı eşanjörü ile soğutulup kompresöre verilirse çevrimin ısı verimi daha yüksek olur ve etraftaki atık ısı azalmış olur. Bu örnek kapalı bir çevrim içindir ve Şekil 2.4'te verilmiştir. Brayton çevriminin açık çevrim hali de vardır ve açık çevrimde (4) ve (1) arasındaki ısı eşanjörü yer almamaktadır bundan dolayı türbinden arta kalan sıcak hava çevrime tekrar girmeden etrafa yayılmış olur.

Şekil 2.4 : Brayton çevrimi (Alhwayzee ve diğ, 2021).

Brayton çevrimi ile ilgili literatürde birçok çalışma vardır. Örneğin, Yang ve Cai (2021) kritik üstü durumdaki karbondioksitin (CO_2) iş akışkanı olarak kullanıldığı bir Brayton çevrimi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada ele alınan çevrimin termodinamik performansı parametrik olarak analiz edilmiştir. Ele alınan bazı parametreler türbinin girişindeki sıcaklık ve basınçtır. Bu çalışmanın sonucunda türbinin girişindeki sıcaklık ve basınç arttıkça çevrimin veriminin arttığı gözlenmiştir. Ek olarak, türbinin girişindeki sıcaklık $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerine çıktığında çevrimin verimi %60 civarına ulaşabilmektedir. Pan ve diğ. (2020) 9000 TEU konteyner kapasiteli bir konteyner gemisinde geminin ana makinesinin egzoz gazının atık ısısından yararlanan bir kritik üstü durumdaki karbondioksit (CO_2) Brayton çevrimi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada sistem performansı üzerinde önemli etkileri olan termodinamik parametreler analiz edilmiştir ve optimizasyon yapılmıştır. Sistemin ürettiği en yüksek güç yaklaşık 452 kW olurken enerji verimi yaklaşık %25 olmuştur.

Bu çalışmanın sonucunda sistemin gemi ana makinesinin ısı verimini %3,2 oranında artırdığı ve gemi yardımcı makinelerinin yakıt sarfiyatını yaklaşık %1 oranında azalttığı gözlenmiştir.

2.3.4 Termoelektrik güç üretimi

Termoelektrik güç üretimi Seebeck etkisi ile ısı enerjiden elektrik enerjisine direkt enerji dönüşümüdür. Bir termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkından yararlanılarak voltaj üretimine Seebeck etkisi denir. Termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkı arttığında üretilen voltaj artmaktadır. Buna bağlı olarak termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücü de artmaktadır. Termoelektrik modüllerin güç üretim verimleri imal edildikleri termoelektrik malzemelerin ZT katsayıları ile ilişkilidir. ZT katsayısı yüksek olan termoelektrik malzemenin güç üretim verimi yüksek olmaktadır. Bir termoelektrik malzemenin ZT katsayısı yüksek güç faktörüne, yüksek sıcaklığa ve düşük ısı iletkenliğe sahip olduğunda daha yüksek olmaktadır. Güç faktörü Seebeck katsayısının karesi ve elektriksel iletkenliğin çarpımına eşittir. Seebeck katsayısı termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkından dolayı üretilen voltajın sıcaklık farkına oranıdır. Termoelektrik güç üretimi konusunda daha yüksek verime sahip termoelektrik malzeme elde edilebilmesi için ZT katsayısı yüksek malzeme geliştirilmesi en önemli amaçlardan biridir. Termoelektrik güç üretim sistemleri diğer atık ısı geri kazanım sistemlerine göre nispeten daha düşük verime sahip olsa da hareketli parçası olmadığı için, gürültü üretmediği için, çevre dostu olduğu için ve küçük ölçekli güç üretiminden büyük ölçekli güç üretimine kadar geniş bir aralıkta güç üretebildiği için otomotiv, uzay ve sağlık gibi çeşitli birçok alanda kullanılmaktadır.

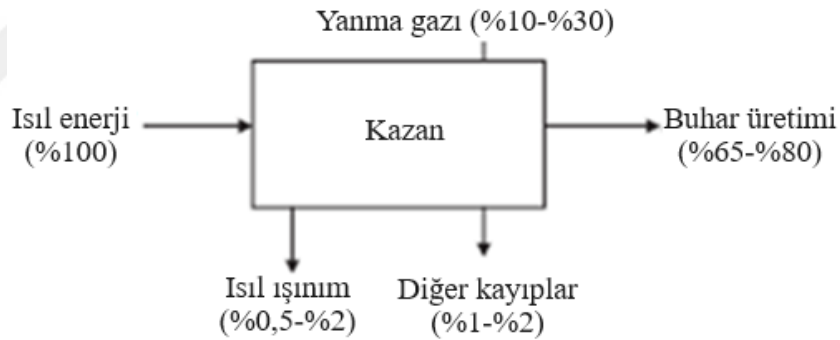
2.3.5 Egzoz gazı türbini

Egzoz gazı türbinleri Brayton çevrimine dayalı olarak çalışmaktadır ve gaz türbinlerinin güç üretiminden uçak ve gemilerin sevk edilmesine kadar endüstride birçok uygulaması mevcuttur (Yin ve Rao, 2020). Buna bağlı olarak literatürde bu konu ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Barsi ve diğ. (2021) 2020 yılına kadar inşa edilmiş ve şu an operasyon halinde bulunan yolcu gemilerinin verilerini toplayarak gemilerde ısı ve güç üretimi için 1 MW ile 10 MW aralığında elektrik gücü üretebilecek mini gaz türbininin uygulanabilirliği konusunda istatistiksel bir çalışma yapmıştır. Daha hafif ve daha küçük boyutlara sahip mini gaz türbinlerinin daha çok

yolcu taşınmasına imkan vererek geminin ekonomik verimini artırma fırsatı vardır. Bu çalışmanın sonucunda mini gaz türbininin diğer gaz türbinleri ve gemi dizel makineleri ile kıyaslandığında elektriksel veriminin düşük olmasına rağmen güç üretimi konusunda rekabetçi olabileceği gözlenmiştir. Fatsis (2022) gemide kullanılan gaz türbinin performansını iyileştirmek için dalga rotoru kullanımı ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda incelenen tüm türbin giriş sıcaklıklarında ve sıkıştırma oranlarında gaz türbinin veriminde %19'u aşan oranlarda artış olmuştur.

2.3.6 Egzoz kazanı

Egzoz kazanı makinelerin egzoz gazlarının atık ısısından yararlanarak buhar, sıcak su veya bir ısıtma prosesi için gerekli ısıyı üretmek için kullanılan atık ısı geri kazanımı sistemidir. Kazanlar endüstride ve güç santrallerinde sık kullanılan buhar üretim sistemleridir. Kazanların veriminde yapılabilecek küçük bir iyileştirme dünyadaki fosil yakıt tüketiminin ve buna bağlı emisyonların azaltılmasına neden olacaktır (Barma ve diğ, 2017). Tipik bir kazanın ısıl denge diyagramı Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 : Tipik bir kazanın ısıl denge diyagramı (Jayamaha, 2006).

Bu diyagrama göre makinelerin egzoz gazlarının atık ısısından yararlanarak atık ısı geri kazanımı sağlayan kazanlarda da belli miktarda kayıplar olduğu görülmektedir ve kazana dışarıdan gelen atık ısı kaynağının sahip olduğu ısıl enerjinin %65 ile %80 arasındaki kısmı yararlı bir şekilde kullanılmaktadır. Egzoz kazanlarından dışarıya yayılan atık ısılar diğer atık ısı geri kazanımı yöntemleri ile geri kazanılarak kazanın ısıl verimi artırılabilir ve buna bağlı olarak atmosfere yayılan emisyon miktarı azaltılabilir.



3. TERMoelekTRİK GÜÇ ÜRETİMİ

3.1 Giriş

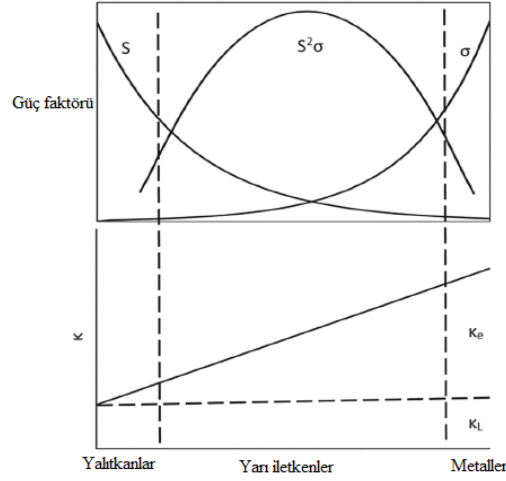
Termoelektrik güç üretimi Seebeck etkisi ile ısı enerjiden elektrik enerjisine direkt enerji dönüşümüdür. Bir termoelektrik çiftin sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkından yararlanılarak voltaj üretimine Seebeck etkisi denir. Bu etkiye konu hakkında çalışmaları olduğu için Thomas Johann Seebeck'in adı verilmiştir fakat Seebeck'ten daha önce Alessandro Volta tarafından keşfedilmiştir (Beretta ve diğ, 2019). Seebeck etkisi ile voltaj üretimini ifade eden ilişki Denklem 3.1'de gösterilmiştir.

$$V = \alpha * (T_H - T_L) \quad (3.1)$$

Bu denklemde V [V] voltaj, α [V/K] Seebeck katsayısı ve T_H [K] termoelektrik modülün sıcak taraf sıcaklığı iken T_L [K] termoelektrik modülün soğuk taraf sıcaklığıdır. Termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkı arttığında üretilen voltaj artmaktadır. Ayrıca, Seebeck katsayısı yüksek bir termoelektrik malzeme kullanıldığında da üretilen voltaj artmaktadır. Ek olarak, termoelektrik malzemelerin güç üretim verimi hakkında fikir veren ve Seebeck katsayısının da içinde bir değişken olduğu ZT katsayısı da termoelektrik güç üretiminde yer alan önemli bir katsayıdır ve Denklem 3.2'de gösterilmiştir.

$$ZT = \frac{S^2 * \sigma}{\kappa} T \quad (3.2)$$

Bu denklemde S [V/K] Seebeck katsayısı, σ [S/m] ise elektriksel iletkenlik, κ [W/m·K] ısı iletkenlik ve T [K] ise sıcaklıktır. Ek olarak ZT katsayısı denkleminin pay kısmında yer alan $S^2\sigma$ ifadesi güç faktörünü temsil etmektedir. Yüksek bir ZT katsayısı elde etmek için yüksek bir Seebeck katsayısına ve elektriksel iletkenliğe yani yüksek bir güç faktörüne, düşük bir ısı iletkenliğe ve yüksek sıcaklık değerine ihtiyaç vardır. Farklı tiplerdeki malzemelerin güç faktörleri ve ısı iletkenlikleri arasındaki ilişki Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Farklı malzemelerin güç faktörleri ve ısı iletkenlikleri (Huang ve diğ, 2018).

Şekil 3.1 incelendiğinde Seebeck katsayısı (S) ve elektriksel iletkenliğin (σ) ters orantılı olduğu görülmektedir. Metallerin diğer malzemelere göre yüksek elektriksel iletkenliği ve yalıtkanların diğer malzemelere göre yüksek Seebeck katsayısı olmasına rağmen güç faktörü göz önüne alındığında bu iki malzeme tipinin de düşük güç faktörüne sahip olduğu bundan dolayı da düşük ZT katsayısına sahip olacağı görülmektedir. Bunun yanında yarı iletken malzemelerin güç faktörünün yalıtkan ve metal malzemelere göre yüksek olduğu ve bundan dolayı daha yüksek ZT katsayısına sahip olacağı görülmektedir. ZT katsayısı yüksek olan termoelektrik malzemelerin güç üretim verimi daha yüksek olmaktadır ve Denklem 3.3’de gösterilmiştir.

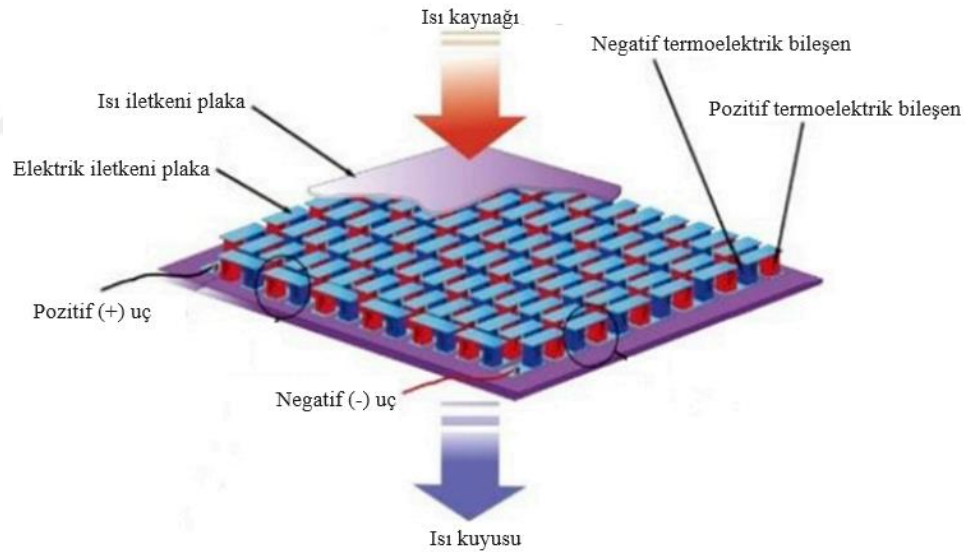
$$\eta = \frac{T_H - T_L}{T_H} \left[\frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + T_L/T_H} \right] \quad (3.3)$$

Literatürdeki çoğu termoelektrik malzemenin ZT değeri 1 civarında ve güç üretim verimi %6 civarındadır. Teorik olarak ZT değeri 3 olursa güç üretim verimi %30’a ulaşabilmektedir (Ma ve diğ, 2021). Bundan dolayı termoelektrik güç üretimi konusunda yapılan araştırmaların ana noktası termoelektrik malzemelerin ZT katsayılarının artırılmasıdır (Lan ve diğ, 2020). Ek olarak, Seebeck katsayısı (S) ve elektriksel iletkenliğin (σ) birbiri ile ters orantılı olmasından dolayı bir termoelektrik malzemenin güç faktörünü ($S^2\sigma$) artırmak çok zordur (Musah ve diğ, 2021). Bundan dolayı da bir termoelektrik malzemenin ZT katsayısını artırmak ve sonuç olarak güç üretim verimini artırmak zordur. Buna rağmen ZT değeri 1,6 (650°C’de) olan SnTe , 1,5 olan (567°C’de) $\text{Sn}_{0,98}\text{Mg}_{0,03}\text{In}_{0,03}\text{Te}$, 1,5 olan (627°C’de) $\text{Pb}_{0,92}\text{Sr}_{0,08}\text{Se}$ ve 1,67

olan (550°C 'de) $\text{Sn}_{0,99}\text{Ag}_{0,01}\text{Se}_{0,85}\text{S}_{0,15}$ gibi yüksek ZT katsayısına sahip yeni termoelektrik malzemeler mevcuttur (Saha ve diğ, 2023).

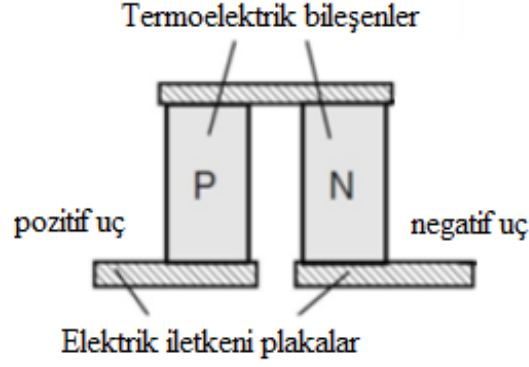
3.2 Termoelektrik Güç Üretim Sistemi

Bir termoelektrik güç üretim sistemi birden fazla termoelektrik modülden oluşmaktadır. Termoelektrik güç üretim sisteminin elektrik gücü üretebilmesi için sıcak ve soğuk ısı kaynaklarına bağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada sıcak tarafın ısı kaynağı feribotun ana makinesinin egzoz gazı iken soğuk tarafın ısı kaynağı ise deniz suyudur. Bir termoelektrik modül birbirlerine elektriksel olarak seri ve ısısal olarak paralel bağlı birden fazla termoelektrik çiftten, termoelektrik çiftlerin üstlerinde ve altlarında bulunan elektrik iletkeni plakalardan, elektrik iletkeni plakaların üstlerinde ve altlarında bulunan ısı iletkeni plakalardan oluşmaktadır ve Şekil 3.2'deki gibidir. Bir termoelektrik çift negatif ve pozitif olmak üzere iki termoelektrik bileşenden oluşmaktadır ve Şekil 3.3'teki gibidir.



Şekil 3.2 : Termoelektrik modül (Lv ve diğ, 2020).

Termoelektrik modüllerde ısı iletkeni plaka olarak genellikle seramik kullanılırken elektrik iletkeni plaka olarak bakır kullanılmaktadır.



Şekil 3.3 : Termoelektrik çift (Bode ve diğ, 2017).

Sonuç olarak Şekil 3.3'teki termoelektrik çiftler bir araya gelerek Şekil 3.2'deki termoelektrik modülleri oluşturmaktadır. Birden fazla termoelektrik modülün bir araya gelmesi ve bunlara sıcak ve soğuk ısı kaynaklarının bağlanmasıyla beraber termoelektrik güç üretim sistemi elde edilir. Ek olarak, termoelektrik güç üretim sistemlerinin birçok kullanım alanı vardır. Örneğin, savunma alanında, uzay alanında, tıp ve endüstride güç üretim sistemi olarak ve ısı enerjisi sensörü olarak kullanılabilir. (Patil ve diğ, 2018). Uzay dışı görevler ve uzak alanlar gibi niş alanlarda kullanılmaktadır (He ve diğ, 2015). Otomobillerde, gemilerde, sensörlerde ve mikro elektronik alanında termoelektrik güç üretim sistemi uygulamaları mevcuttur (Champier, 2017). Bunun dışında giyilebilir cihazlar olarak da kullanılabilmektedir (He ve diğ, 2024).

3.3 Termoelektrik Güç Üretiminin Avantaj ve Dezavantajları

Termoelektrik güç üretim sistemi atık ısıdan yararlanarak elektrik üreten bir sistem olsa da diğer sistemlerde olduğu gibi avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. Termoelektrik güç üretim sisteminin bazı avantajları şunlardır:

- Termoelektrik güç üretim sistemlerinde hareketli herhangi bir parça yoktur ve diğer elektrik üreten sistemlere kıyasla çevre dostudur (Sugiartha ve Negara, 2018).
- Termoelektrik güç üretim sistemleri mikro seviye güç üretiminden makro seviye güç üretimine yani mW seviyesinden kW seviyesine kadar çeşitli skalalarda elektrik gücü üretebilir ve gürültü kirliliği yapmadan elektrik gücü üretirler (Jouhara ve diğ, 2021).

- Hareket eden parçaları olmadığı için tamir ve bakım gereği duyulmamaktadır ve soğutucu ve yağlama sistemine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Termoelektrik güç üretim sisteminin bazı dezavantajları şunlardır:

- Termoelektrik güç üretim sistemlerinin güç üretim verimi genellikle düşüktür (Chen ve diğ, 2017).
- Termoelektrik güç üretim sistemi elektrik gücü üretebilmek için sabit bir ısı kaynağına ihtiyaç duyar.
- Termoelektrik güç üretim sisteminin veriminin yüksek olması için ZT değeri yüksek termoelektrik malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır fakat malzeme geliştirme süreci basit bir süreç olmadığı için bu alanda ilerlemeler yavaş olmaktadır.



4. TERMoeLEKTRİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN MATEMATİK MODELLEMESİ

4.1 Isıl Model

Termoelektrik güç üretiminin temel prensibi sıcak ve soğuk iki yüzey arasında sıcaklık farkından yararlanılarak elektrik enerjisi üretilmesidir. Bu çalışmada, termoelektrik modülde sıcak tarafın ısı kaynağı ana makinenin yaymış olduğu egzoz gazıdır ve soğuk tarafın ısı kaynağı ise deniz suyunun sahip olduğu ısıdır. Sıcak tarafın ısı kaynağı atık ısıdan karşılandığı için hem atmosfere yayılan emisyon azaltılmakta hem de gemide elektrik ihtiyacı olan yerlerde elektriğin bir kısmı termoelektrik güç üretimi sayesinde sağlandığı için yakıt tasarrufu yapılmaktadır. Bundan dolayı termoelektrik modüller Şekil 5.2’de verilen ana makinenin egzoz borusu yüzeyinde konumlandırılmıştır. Soğuk tarafın ısı kaynağı deniz suyu olduğu için ekstra bir soğutma gideri olmaksızın soğuk tarafa ısı sağlanır. Bu çalışmada incelenen feribotun ana makinesinin farklı makine yüklerindeki egzoz gazı sıcaklığı bilgileri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Farklı ana makine yüklerindeki egzoz gazı sıcaklıkları (Durmaz, 2015).

Makine yükü (%)	Sıcaklık (°C)
25	250
50	253,6
75	317,5
100	337,2

Termoelektrik güç üretimi Seebeck etkisi yoluyla ısı enerjisinden elektrik enerjisine direkt enerji dönüşümüdür. Seebeck etkisi bir termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkının kullanılarak elektriksel potansiyel yani voltaj üretilmesidir ve bu etki Denklem 4.1’de gösterilmiştir.

$$V = \alpha * (T_H - T_L) \quad (4.1)$$

Bu denklemde V [V] voltaj, α [V/K] Seebeck katsayısı ve T_H [K] termoelektrik modülün sıcak taraf sıcaklığı iken T_L [K] termoelektrik modülün soğuk taraf sıcaklığıdır. Termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkı arttığında üretilen potansiyel fark artmaktadır. Buna ek olarak, Seebeck katsayısı

yüksek bir termoelektrik malzeme kullanıldığı takdirde de üretilen voltaj artmaktadır. Elektrik gücü ise Seebeck etkisi ile üretilen voltajdan dolayı üretilir ve Denklem 4.2’de gösterilmiştir.

$$P_{out} = \frac{m}{(m+1)^2} * \frac{V^2}{R} \quad (4.2)$$

Bu denklemde P_{out} [W] üretilen elektrik gücü, R [Ohm] termoelektrik malzemenin elektrik direnci ve m termoelektrik malzemelerin bir araya gelerek oluşturdukları elektrik devresinin elektrik direncinin termoelektrik malzemenin iç elektrik direncine oranıdır yani m boyutsuz bir sayıdır. m bire eşit olduğu takdirde üretilen elektrik miktarı maksimum olmaktadır ve Denklem 4.3’te gösterilmiştir.

$$P_{out_{max}} = \frac{V^2}{4R} \quad (4.3)$$

Bu çalışmada, COMSOL Multiphysics paket programı kullanılarak sürekli ısı iletimi denklemi ve elektrik denklemleri birlikte çözdürülmüştür. Sürekli ısı iletimi denklemi termoelektrik modül boyunca olan ısı transferi için kuadratik yani ikinci dereceden numerik ayrıklaştırma metodu kullanılarak çözdürülmüştür ve Denklem 4.4 ile Denklem 4.5’te gösterilmiştir.

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (4.4)$$

$$q = -k \nabla T \quad (4.5)$$

Bu denklemlerde ρ [kg/m³] termoelektrik malzemenin yoğunluğu, C_p [J/(kg.K)] termoelektrik malzemenin özgül ısı kapasitesi. u [m/s] hız iken k [W/(m.K)] ısı iletkenliktir. T [K] sıcaklık ve q [W/m²] ısı akısı iken Q [W/m³] ısı kaynağıdır yani bu çalışmada sıcak tarafta bulunan egzoz gazının enerjisidir. Q_{ted} [W/m³] termoelastik sönümlenmedir. Elektrik denklemleri termoelektrik modül üzerindeki elektriksel potansiyel dağılımını elde etmek için ikinci dereceden numerik ayrıklaştırma metodu kullanılarak çözdürülmüştür ve Denklem 4.6-4.8 arasında gösterilmiştir.

$$\nabla \cdot J = Q_{j,v} \quad (4.6)$$

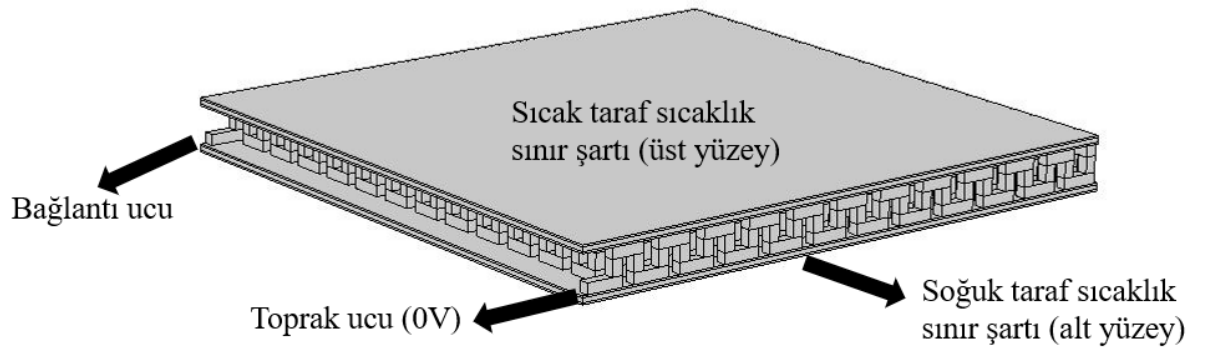
$$J = \sigma E + J_e \quad (4.7)$$

$$E = -\nabla V \quad (4.8)$$

Bu denklemlerde J [A/m²] akım yoğunluğudur. $Q_{j,v}$ [A/m³] akım kaynağıdır yani bu çalışmada sıcak ve soğuk taraf arasındaki sıcaklık farkından üretilen elektriksel potansiyelden meydana gelmektedir. Denklem 4.6’ya göre akım yoğunluğunun diverjansı akım kaynağına eşittir. σ [S/m] elektriksel iletkenlik, E [V/m] elektrik alanı

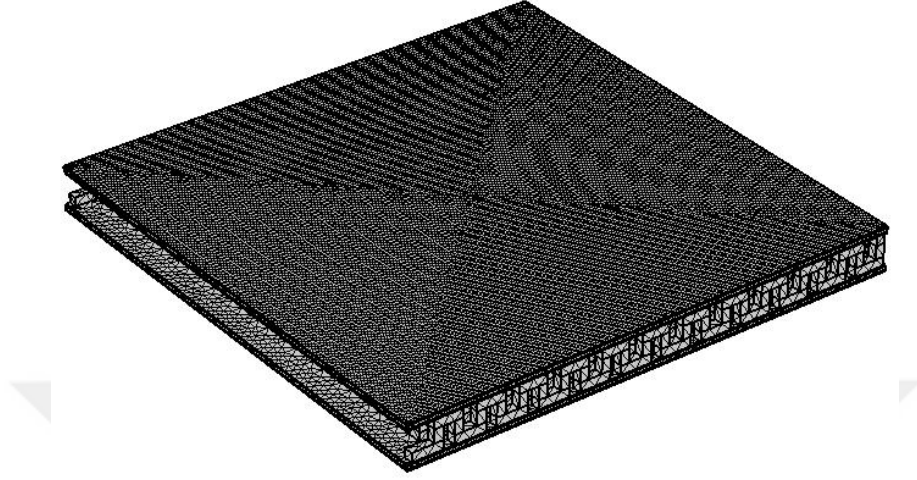
ve J_e [A/m^2] dışarıdan üretilen akım yoğunluğudur. V [V] voltajdır ve Denklem 4.8'e göre elektrik alanı voltajın gradyanının negatif değerine eşittir.

Termoelektrik modül üzerindeki sıcaklık ve voltaj dağılımları sürekli ısı iletimi denklemi ve elektrik denklemlerinin birlikte çözülmesi ile COMSOL Multiphysics paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Bu program öncelikli olarak sonlu elemanlar yöntemini kullanmakla beraber diğer sayısal yöntemleri de kullanmaktadır. Sürekli ısı iletimi denklemi çözümünde egzoz gazı sıcaklığı termoelektrik modülün sıcak tarafının yani üst yüzeyin sıcaklık sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Deniz suyu sıcaklığı ise termoelektrik modülün soğuk tarafının yani alt yüzeyin sıcaklık sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Çeşitli ana makine yükleri için egzoz gazı sıcaklık değerleri Çizelge 4.1'den alınmıştır ve deniz suyu sıcaklığı feribotun çalıştığı hat olan Eskihisar-Topçular hattındaki ortalama deniz suyu sıcaklığı grafiğinden haziran ayı ortalaması olan $20^{\circ}C$ olarak alınmıştır (Sea temperature, n.d.). Elektrik denklemi çözümünde toprak ucu (ground) ve bağlantı ucu (terminal) sınır şartları termoelektrik modülün elektrik kısmı için kullanılan iki sınır şartıdır. Toprak ucu (ground) sınır şartı elektrik devresinde uygulandığı uçta voltajın sıfır olduğu anlamına gelmektedir. Bağlantı ucu (terminal) sınır şartı ise elektriksel potansiyel üretilmesi için tanımlanmaktadır. Bağlantı ucu (terminal) sınır şartının uygulandığı noktada okunan voltaj değeri termoelektrik modülde sıcaklık farkından dolayı üretilmiş olan elektriksel potansiyel değerini vermektedir. Bağlantı ucu (terminal) sınır şartında her iki termoelektrik modül için de uygun elektrik yük direnci kullanılmıştır. Bu değerler sırasıyla Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te verilmiş olup TGMT-19W-4V için 0,9 ohm iken TE-MOD-22W-7V-56 için 2,4 Ohm'dur. Bu çalışmada, sürekli ısı iletimi denklemi ve elektrik denklemlerinin çözümü için kullanılan sınır şartları Şekil 4.1'de verilmiştir.



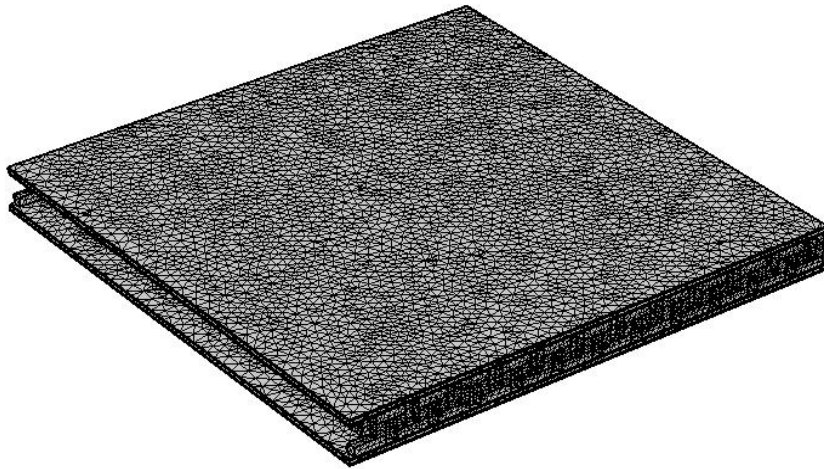
Şekil 4.1 : Termoelektrik modüldeki sınır şartları.

Bu çalışmada, sürekli ısı iletimi denklemi ve elektrik denklemlerinin çözümü için dört yüzlü (tetrahedral) ağ yapısı kullanılmıştır. Boyutları 56 mm*56 mm*5 mm olan termoelektrik modül için oluşturulan ağ yapısındaki hücre sayısı yaklaşık olarak 436.000'dir ve bu ağ yapısı Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Termoelektrik modülün çözümü için kullanılan dört yüzlü ağ yapısı.

Ek olarak, bu çalışmada sürekli ısı iletimi denklemi ve elektrik denklemlerinin çözümü esnasında adaptif ağ yapısı da kullanılmıştır. Adaptif ağ yapısı, hücrelerin sıklığını artırarak veya azaltarak ağ yapısının kalitesini artırmak ve bunun sonucunda çözümün doğruluğunu artırmak için ağ yapısını yeniden düzenlemiştir. Adaptif ağ yapısı oluşturulduktan sonraki hücre sayısı yaklaşık olarak 482.000'dir. Adaptif ağ yapısı sonrasında alt ve üst yüzeylerdeki hücre sıklığı azaltılırken termoelektrik malzemenin bulunduğu iki yüzey arasındaki bölgede hücre sıklığı artırılmıştır ve bu ağ yapısı Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 : Termoelektrik modülün çözümü için kullanılan adaptif ağ yapısı.

4.2 Ekonomik Model

Bu çalışmada yapılan ısı analizinin sonrasında bulunan sonuçlar ışığında ekonomik analiz yapılmıştır. Ekonomik analizde ele alınan değişkenler termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücü [W], ana makine özgül yakıt tüketimi [g/kWh], feribotun operasyonlarda geçirdiği yıllık süre [saat], bu çalışmadaki feribotun kullandığı ultra düşük sülfür içerikli dizel yakıtın yoğunluğu [kg/m³] ve yakıt fiyatıdır [\$/m³]. Seçilen termoelektrik modüller için feribotun ana makinesinin %25, %50, %75 ve %100 makine yüklerindeki egzoz gazı sıcaklıkları ve 20°C'lik bir deniz suyu sıcaklığı için dört farklı sıcaklık farkında termoelektrik modüller üzerindeki voltaj değerleri COMSOL Multiphysics paket programı aracılığıyla elde edildikten sonra voltaj değerleri kullanılarak termoelektrik modüllerin ürettiği elektrik güçleri hesaplanmıştır. Ekonomik analizde ilk olarak üretilen elektrik gücüne denk gelen yakıt sarfiyatı hesaplanarak termoelektrik modüller sayesinde tasarruf edilen yakıt miktarı hesaplanmıştır. Bundan dolayı üretilen elektrik gücü ana makine özgül yakıt tüketimi ile çarpılarak üretilen elektrik gücüne denk gelen birim zamandaki yakıt sarfiyatı hesaplanmıştır ve Denklem 4.9'daki gibidir.

$$\dot{m}_{\text{yakıt}} = P_{\text{out}} * \text{SFC} \quad (4.9)$$

Bu denklemde $\dot{m}_{\text{yakıt}}$ [kg/s] termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücüne denk gelen birim zamanda tüketilen yakıt miktarıdır, P_{out} [W] termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücü iken SFC [g/kWh] ise ana makine özgül yakıt tüketimidir. Birim zamandaki yakıt sarfiyatı feribotun operasyonda geçirdiği yıllık süre ile çarpılarak toplam yakıt sarfiyatı kg cinsinden hesaplanmıştır ve toplam yakıt sarfiyatı yakıt yoğunluğuna [kg/m³] bölünerek üretilen elektrik gücüne denk gelen yıllık toplam yakıt sarfiyatı m³ cinsinden hesaplanmıştır ve Denklem 4.10'daki gibidir.

$$V_{\text{yakıt}} = \dot{m}_{\text{yakıt}} * t / \rho_{\text{yakıt}} \quad (4.10)$$

Bu denklemde $V_{\text{yakıt}}$ [m³] termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücüne denk gelen yıllık toplam yakıt sarfiyatı, t [sn] feribotun operasyonda geçirdiği yıllık süre ve $\rho_{\text{yakıt}}$ [kg/m³] yakıt yoğunluğudur. Hacimsel toplam yakıt sarfiyatı birim hacim yakıt fiyatı [\$/m³] ile çarpılarak termoelektrik modüller tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti hesaplanmıştır. Son olarak termoelektrik güç üretim sisteminin maliyeti yakıttan yapılan yıllık tasarrufa bölünerek sistemin

kendi maliyetini çıkarma süresi yani amortisman süresi hesaplanmıştır ve Denklem 4.11'deki gibidir.

$$t_{\text{amortisman}} = \frac{\$_{\text{tgs}}}{V_{\text{yakıt}} * \$_{\text{yakıt}}} \quad (4.11)$$

Bu denklemde $t_{\text{amortisman}}$ [yıl] termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süresi, $\$_{\text{tgs}}$ [\$] termoelektrik güç üretim sisteminin malzeme maliyeti ve $\$_{\text{yakıt}}$ [\$/m³] yakıtın birim hacim fiyatıdır. Bu çalışmada amortisman süresi hem farklı sabit ana makine yükleri için hem de feribotun seferleri esnasında değişen ana makine yükleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

4.3 Çevresel Analiz Modeli

Bu çalışmada son olarak termoelektrik modüller tarafından yıllık üretilen elektrik gücü sayesinde seferlerde atmosfere salınan emisyonlardaki azalmalar farklı emisyon türleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Farklı seyir durumları için verilen emisyon faktörleri [g/kWh] bu çalışmada ele alınan her iki termoelektrik modül için termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü [W] ile çarpılarak birim zamanda yayılan emisyon miktarı [g/sn] hesaplanmıştır. Feribotun bir yıllık süreçte seferlerindeki her bir seyir durumunda geçirdiği sürenin birim zamanda yayılan emisyon miktarıyla çarpımından termoelektrik güç üretim sistemi sayesinde feribottan bir yılda yayılan emisyon miktarındaki azalma miktarı kg cinsinden hesaplanmıştır ve Denklem 4.12'deki gibidir.

$$e_{\text{azalma}} = EF * P_{\text{out}} * t \quad (4.12)$$

Bu denklemde e_{azalma} [kg] bir emisyon türünün salınımındaki bir yıllık azalma, EF emisyon faktörü [g/kWh], P_{out} [W] termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücü iken t [sn] ise feribotun operasyonda geçirdiği yıllık süredir. Bunun sonucunda termoelektrik güç üretim sistemi sayesinde feribottan atmosfere yayılan emisyonlardaki bir yıllık süreçteki azalma elde edilmiştir. Bu çalışmada ele alınan emisyonlar NO_x, SO₂, CO, CO₂ ve HC'dir. Burada NO_x azot oksitleri, SO₂ kükürtdioksiti, CO karbonmonoksiti, CO₂ karbondioksiti ve HC hidrokarbonu temsil etmektedir.

5. BİR FERİBOT İÇİN ATIK ISININ KULLANILDIĞI TERMoeLEKTRİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN ANALİZİ VE SONUÇLAR

5.1 Feribotun Özellikleri

Atık ısı geri kazanımı analizi Eskişehir Topçular arasında yolcu ve araç taşıyan Ord. Prof. Ata Nutku feribotu için yapılmıştır. Feribotun görünümü Şekil 5.1’de verilmiştir. Feribotun ana makinesinin farklı makine yüklerinde egzoz gazının atık ısı enerjisinden yararlanarak termoelektrik güç üretimi ile elektrik enerjisi elde edilmesi bu analizin ana amacıdır. Bundan hareketle feribotta harcanan makine gücünün azaltılması, feribotun harcadığı yakıt miktarından tasarruf edilmesi, feribotun enerji veriminin artırılması ve atmosfere yayılan zararlı emisyonun azaltılması da diğer amaçlar olarak ele alınmıştır.



Şekil 5.1 : Ord. Prof. Ata Nutku feribotu (Durmaz, 2015).

Bu feribotta iki ana makine ve üç yardımcı makine mevcuttur. Ana makinelerin her biri 883 kW gücünde olup her bir yardımcı makine 175 kW güce sahiptir. Feribotun sevki baş ve kıç tarafında bulunan birer adet kontrol edilebilir kanatlı pervane (CPP) ile sağlanmaktadır. Baş ve kıçta bulunan pervaneler eş zamanlı ve ayrı olarak

çalıştırılabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan geminin özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Ord. Prof. Ata Nutku feribotunun özellikleri (Kalender, 2017).

Parametre	Değer	Birim
Tam boy	80,71	m
Dikmeler arası boy	78,78	m
Draft	4,5	m
Genişlik	22	m
Detveyt tonaj	225	t
Ana makine gücü	2x883	kW
Ana makine devri	750	rpm
Ana makine özgül yakıt tüketimi	198	g/kWh
Yardımcı makine gücü	3x175	kW
Yardımcı makine devri	1500	rpm
Yardımcı makine özgül yakıt tüketimi	205	g/kWh
Baca çapı	360	mm

Feribotun ana makinesi ve egzoz borusunun görünümü Şekil 5.2’deki makine dairesi resmindeki gibidir.



Şekil 5.2 : Makine dairesi (Kalender, 2017).

Feribotta ana makine, jeneratör ve kazanlarda aynı yakıt kullanılmaktadır ve kullanılan yakıt ultra düşük sülfür içerikli dizel yakıttır. Bu feribotta kullanılan yakıtın özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Yakıt özellikleri (Durmaz, 2015).

Parametre	Değer	Birim
Yoğunluk	832,1	kg/m ³
Su içeriği	48	mg/kg
Kükürt içeriği	4,4	mg/kg
Setan İndisi	58,6	-

5.2 Seçilen Termoelektrik Modüller

Termoelektrik modüllerin, feribotun egzoz gazının atık ısı enerjisinden üretilen elektrik enerjisi miktarı üzerindeki etkilerini incelemek için farklı karakteristiklere sahip TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 olmak üzere iki adet termoelektrik modül seçilmiştir. Bizmut ve Tellür gibi yarıiletken özelliğe sahip elementlerden imal edilmiş bu termoelektrik modüllerin seçilme sebepleri şunlardır: Bizmut ve Tellür bazlı termoelektrik modüllerin piyasada yaygın olarak bulunması, laboratuvar ortamında daha gelişmiş özelliklere sahip termoelektrik malzemelerin geliştirilmesine rağmen ticarileştirilmelerinin yüksek maliyetlerinden dolayı gerçekleştirilememesi bunun tam aksine termoelektrik özellikleri laboratuvar ortamında geliştirilen daha gelişmiş termoelektrik malzemeler kadar olmasa da ticarileştirildiğinden dolayı Bizmut ve Tellür bazlı termoelektrik modüllerin daha uygun maliyetlere sahip olması ve son olarak yarıiletken malzemelerin yalıtkan malzemeler ve metaller gibi diğer malzeme tiplerine göre optimum güç faktörüne ($S^2\sigma$) sahip olmasıdır. Burada S [V/K], Seebeck katsayısı iken σ [S/m] ise elektriksel iletkenliktir. Termoelektrik modüllerin performansını gösteren ZT sayısının pay kısmında güç faktörü yer almaktadır. Bundan dolayı yarıiletken malzemelerin ZT sayısı da optimum olmakta ve diğer malzemelere göre daha iyi termoelektrik performans göstermektedir. Bu çalışmada ele alınan bu iki termoelektrik modülün neden seçildiği malzemelerin bulunabilirliği, maliyeti ve malzeme özellikleri ile açıklanabilmektedir. Seçilen termoelektrik modüllerin her biri için feribotun ana makinesindeki %25, %50, %75 ve %100 makine yüklerindeki egzoz gazı sıcaklıkları ve 20°C'lik sabit bir deniz suyu sıcaklığı için dört farklı sıcaklık farkında termoelektrik modül boyunca sıcaklık dağılımı ve elektriksel potansiyel (voltaj) dağılımı COMSOL Multiphysics paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar neticesinde farklı sayıda termoelektrik modül içeren termoelektrik güç üretim sistemi konfigürasyonları için üretilen elektrik gücü, üretilen elektrik gücünden elde edilen yakıt tasarrufu ve amortisman süresi hesaplanmıştır.

5.2.1 TGMT-19W-4V

Bu termoelektrik modül yüksek sıcaklıktaki ısı kaynaklarından güç üretimi için tasarlanmıştır. Bizmut-tellür bazlı bu termoelektrik modül sürekli olarak 330°C’de çalışabilmektedir ve çalıştığı sıcaklık aralıklarıyla 400°C’ye kadar çıkabilmektedir. Bu termoelektrik modül iki tarafı arasında sıcaklık farkı olduğu zaman güç üretebilmektedir. İki taraf arasındaki sıcaklık farkı arttıkça verim de artmaktadır. Bu termoelektrik modülün her iki tarafında da ısı iletken grafit yüzeyler mevcuttur bu şekilde düşük ısı direnç sağlanmaktadır ve grafit yüzeyler yüksek sıcaklıkta düzgün bir şekilde çalışabilmektedir. TGMT-19W-4V modülünün özellikleri Çizelge 5.3’te verilmiştir (Tegmart, n.d.a).

Çizelge 5.3 : TGMT-19W-4V modülünün özellikleri.

Parametre	Değer
Malzeme	Bi-Te
Boyutlar	56 mm*56 mm*5 mm
Modüle doğru olan ısı akışı	386 W
Isı akış akısı	12,3 W/cm ²
Uygun elektrik yük direnci	0,9 Ohm

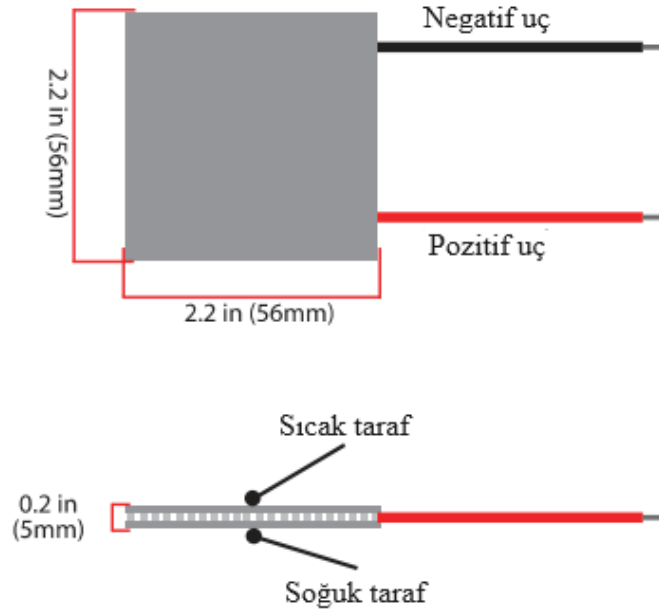
5.2.2 TE-MOD-22W-7V-56

Bu termoelektrik modül sürekli çalıştığı sıcaklık ve maksimum çalışma sıcaklığı özellikleri ile bu çalışmadaki diğer termoelektrik modül ile eşdeğerdir. Aynı zamanda bu termoelektrik modül diğer termoelektrik modülde olduğu gibi her iki tarafında da ısı iletken grafit yüzeye sahiptir. TE-MOD-22W-7V-56 modülünün özellikleri Çizelge 5.4’te verilmiştir (Tegmart, n.d.b).

Çizelge 5.4 : TE-MOD-22W-7V-56 modülünün özellikleri.

Parametre	Değer
Malzeme	Bi-Te
Boyutlar	56 mm*56 mm*5 mm
Modüle doğru olan ısı akışı	365 W
Isı akış akısı	13,2 W/cm ²
Uygun elektrik yük direnci	2,4 Ohm

Aynı boyutlarda olan TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modüllerinin üstten ve yandan görünüşleri Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5.3 : Termoelektrik modüllerin üstten ve yandan görünüşü.

5.3 Sonuçların Doğrulaması

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla kıyaslanarak doğrulama çalışması yapılmıştır. Literatürden alınan bazı çalışmalar ve sonuçları Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5 : Doğrulama çalışması için kullanılan çalışma sonuçları.

Isı kaynağı	Termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü (W)	Üretilen elektrik gücünün ısı kaynağının gücüne oranı (%)	Referans
108 kW araba motoru ve 3200 kW gemi makinesi	7,7 W-167,5 W ve 41 W-6058,6 W	Araba için %0,01-%0,16 ($\Delta T=260^{\circ}\text{C}$) ve gemi için %0,001-%0,19 ($\Delta T=435^{\circ}\text{C}$)	Ji ve diğ. (2018)
Çok geniş ham petrol gemisinde (VLCC) 800 kW'lık yardımcı makine	1 kW mertebesinde	%0,12 ($\Delta T=310^{\circ}\text{C}$)	Georgopoulou ve diğ. (2016)
1740 kW'lık M70 ve 3200 kW'lık M73 gemi ana makineleri	2-4 kW	%0,11-%0,23 ($\Delta T=425^{\circ}\text{C}$)	Ji ve diğ. (2016)
300 kW'lık kazan	600 W	%0,2 ($\Delta T=970^{\circ}\text{C}$)	Chen ve diğ. (2011)
110 kW'lık turboşarjlı dizel makine	119 W	%0,11 ($\Delta T=300^{\circ}\text{C}$)	Kim ve diğ. (2016)

Gemi makinesi, gemi yardımcı makinesi ve araba motoru gibi çeşitli ısı kaynaklarının atık ısılarından yararlanılarak farklı sıcaklık farklarında farklı termoelektrik malzemelerden oluşan ve farklı sayıda termoelektrik modül bulunduran termoelektrik

güç üretim sistemleri ile atık ısı geri kazanımı uygulamalarının yapıldığı Çizelge 5.5'teki çeşitli çalışmalarda termoelektrik güç üretim sistemlerinin ürettiği elektrik gücünün ısı kaynaklarının gücüne oranı göz önünde bulundurularak doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücünün feribotun ana makinesinin toplam gücüne (2x883 kW) oranının en küçük olduğu durum 450 TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün %25 ana makine yükünde olduğu durumdur ve %0,025'tir. Bu oranın en yüksek olduğu durum 750 TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün %100 ana makine yükünde olduğu durumdur ve %0,17'dir. Bu çalışmadaki tüm durumlar göz önüne alındığında termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücünün feribotun ana makinesinin toplam gücüne oranı %0,025 ile %0,17 arasında değişmektedir ve Çizelge 5.5'te verilen çalışmaların sonuçları ile uyum göstermektedir. Bu çalışmada ısı analiz sonucu elde edilen sonuçların literatürden alınan farklı çalışma sonuçlarıyla uyumlu olduğu görüldükten sonra ekonomik ve çevresel analizler yapılarak çalışma tamamlanmıştır.

5.4 Isıl Analiz Sonuçları

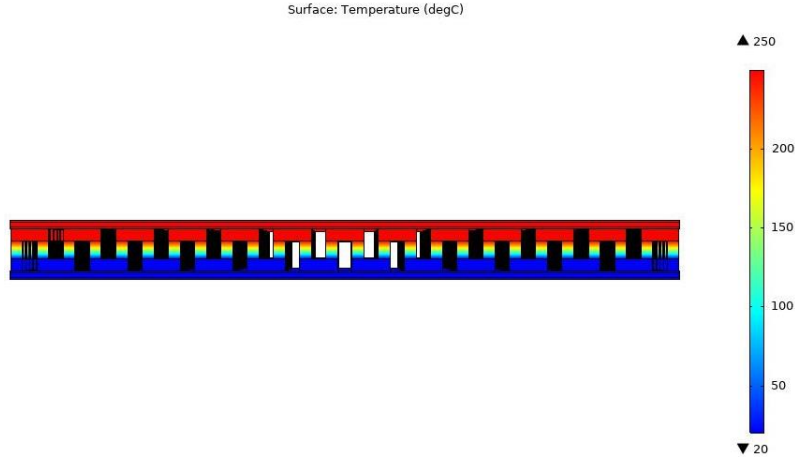
Bu çalışmada, farklı karakteristiklere sahip TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 olmak üzere iki adet termoelektrik modül seçilmiştir. Seçilen her bir termoelektrik modül için %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerindeki egzoz gazı sıcaklıkları ve 20°C'lik bir deniz suyu sıcaklığı için dört farklı sıcaklık farkında termoelektrik modül boyunca sıcaklık dağılımı ve voltaj dağılımı COMSOL Multiphysics paket programı kullanılarak elde edilmiştir. İki farklı termoelektrik modül ve dört farklı sıcaklık farkı için toplamda sekiz ayrı durum için ısı analiz yapılmıştır ve bu analizlerin bilgileri Çizelge 5.6'da verilmiştir. Sıcaklık dağılımları ve voltaj dağılımları, sürekli ısı iletimi denklemi ve elektrik denklemlerinin birlikte çözülmesiyle elde edilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar neticesinde 450, 600 ve 750 adet termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sistemi konfigürasyonu için üretilen elektrik gücü, üretilen elektrik gücünden elde edilen yıllık yakıt tasarrufu ve termoelektrik güç üretim sistemi amortisman süresi hesaplanmıştır. Sekiz ayrı ısı analizinin her biri için üç farklı termoelektrik güç üretim sistemi konfigürasyonunun ekonomik analizi yapıldığından toplamda yirmi dört ayrı ekonomik analiz yapılmıştır.

Çizelge 5.6 : Termoelektrik güç üretim sistemi için yapılan ısı analizinin bilgileri.

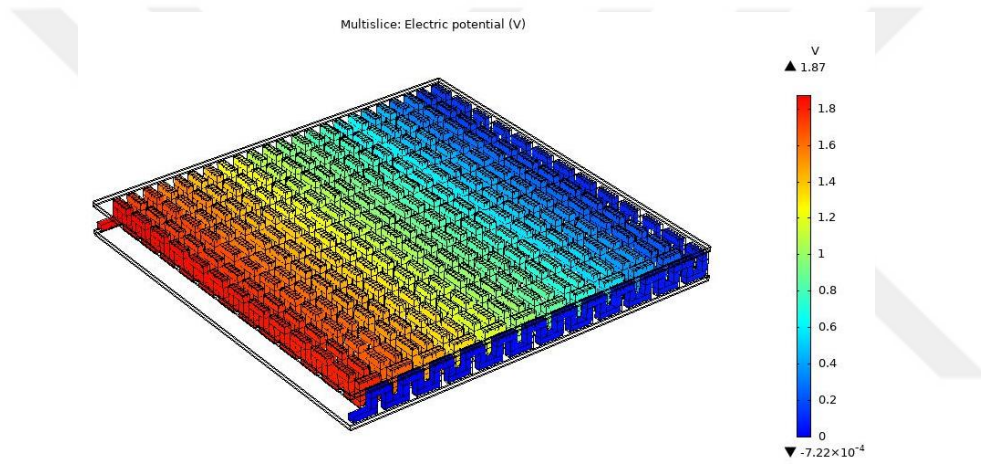
Durum	Makine yükü (%)	ΔT (°C)	Termoelektrik modül
1	25	230	TGMT-19W-4V
2	50	233,6	TGMT-19W-4V
3	75	297,5	TGMT-19W-4V
4	100	317,2	TGMT-19W-4V
5	25	230	TE-MOD-22W-7V-56
6	50	233,6	TE-MOD-22W-7V-56
7	75	297,5	TE-MOD-22W-7V-56
8	100	317,2	TE-MOD-22W-7V-56

TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülleri için dört farklı sıcaklık farkında termoelektrik modül boyunca sıcaklık dağılımları ve voltaj dağılımları Şekil 5.4-5.15 arasında verilmiştir. Bu çalışmadaki her iki termoelektrik modül için de voltaj değeri %100 ana makine yükünde termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkının maksimum olmasından dolayı maksimum olmaktadır. Ek olarak, voltaj değeri her iki termoelektrik modül için de %25 ana makine yükünde minimum olmaktadır.

%25 ana makine yükünde egzoz gazı sıcaklığı 250 °C'dir ve bu sıcaklık termoelektrik modülün üst yüzeyindeki sıcaklıktır. Deniz suyu sıcaklığı 20 °C'dir ve bu sıcaklık termoelektrik modülün alt yüzeyindeki sıcaklıktır. Ek olarak, deniz suyu sıcaklığı bu çalışmadaki tüm durumlar için sabittir. Şekil 5.4'te TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün %25 ana makine yükünde 1 numaralı durumdaki sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Şekil 5.5'te TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün aynı makine yükündeki voltaj dağılımı gösterilmektedir. 1 numaralı durumda termoelektrik modülün iki ucu arasındaki voltaj değeri 1,87 V'dur. TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün elektrik direnci 0,9 ohm'dur. Sonuç olarak, bir TGMT-19W-4V termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü Denklem 4.3 kullanılarak 0,97 W olarak hesaplanmıştır.

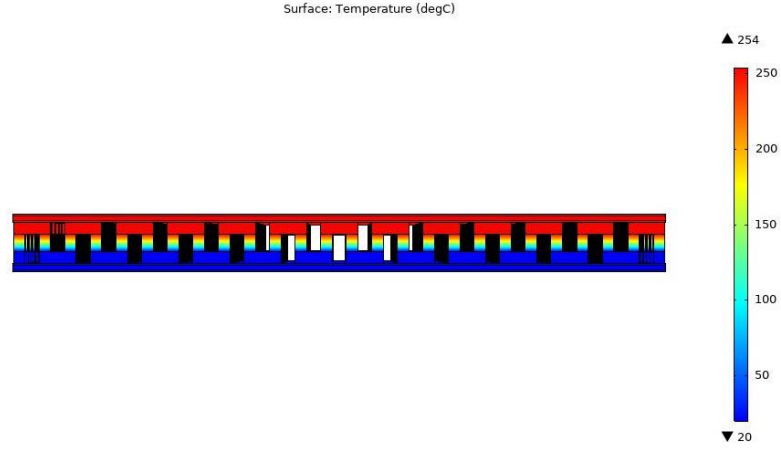


Şekil 5.4 : %25 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için sıcaklık dağılımı.

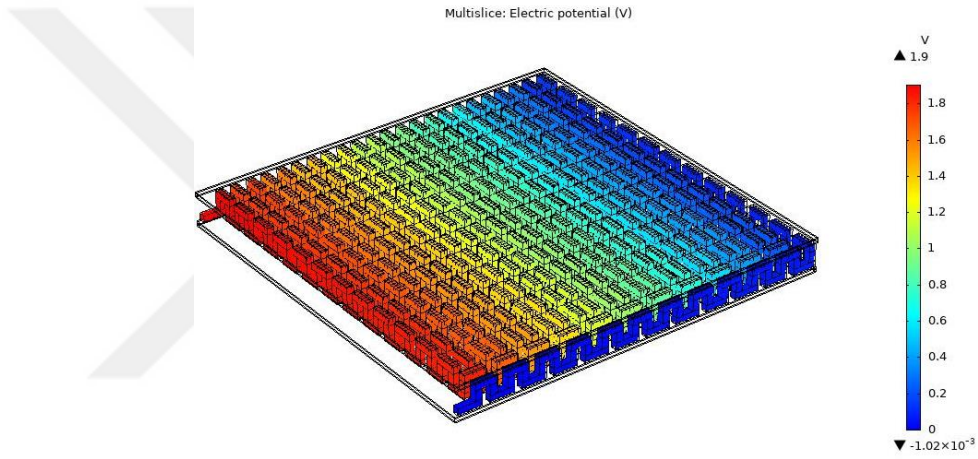


Şekil 5.5 : %25 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için voltaj dağılımı.

%50 ana makine yükünde egzoz gazı sıcaklığı 253,6 °C'dir ve bu sıcaklık termoelektrik modülün üst yüzeyindeki sıcaklıktır. Şekil 5.6'da TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün %50 ana makine yükünde 2 numaralı durumdaki sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Şekil 5.7'de TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün aynı makine yükündeki voltaj dağılımı gösterilmektedir. 2 numaralı durumda termoelektrik modülün iki ucu arasındaki voltaj değeri 1,9 V'dur. Sonuç olarak, bir TGMT-19W-4V termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü Denklem 4.3 kullanılarak 1 W olarak hesaplanmıştır. %50 ana makine yükünde TGMT-19W-4V termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü %25 ana makine yükündeki durumdan termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkı daha fazla olduğu için yüksektir.

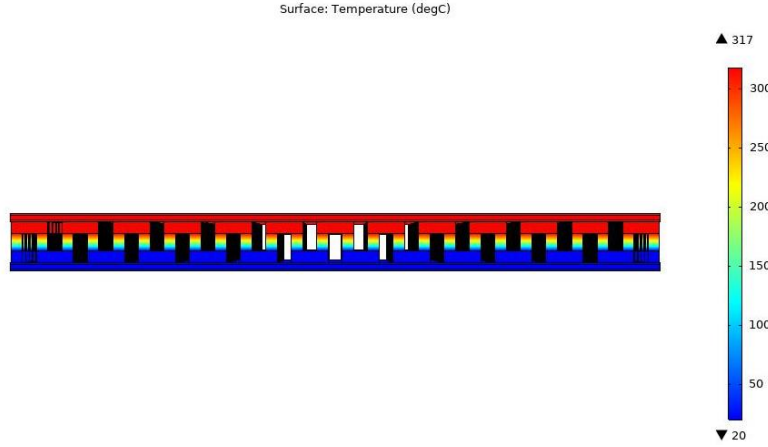


Şekil 5.6 : %50 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için sıcaklık dağılımı.

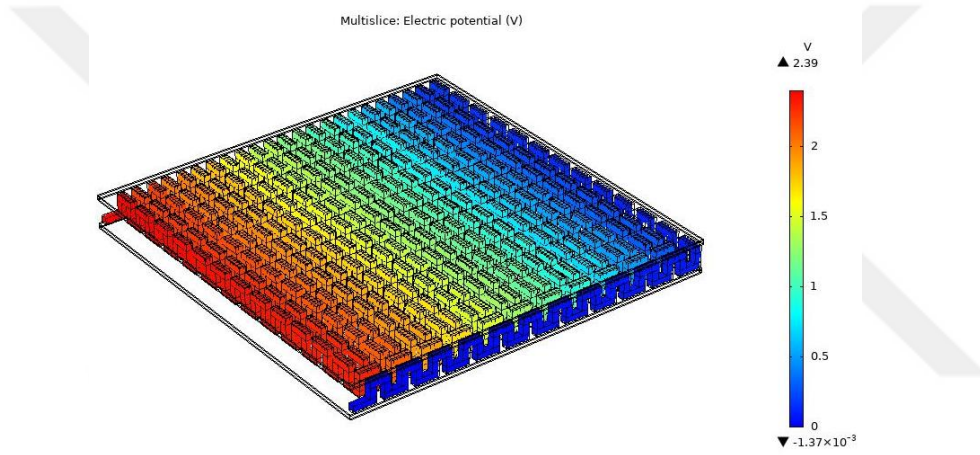


Şekil 5.7 : %50 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için voltaj dağılımı.

%75 ana makine yükünde egzoz gazı sıcaklığı yani termoelektrik modülün üst yüzeyindeki sıcaklık 317,5 °C'dir. Şekil 5.8'de TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün %75 ana makine yükünde 3 numaralı durumdaki sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Şekil 5.9'da TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün aynı makine yükündeki voltaj dağılımı gösterilmektedir. 3 numaralı durumda termoelektrik modülün iki ucu arasındaki voltaj değeri 2,39 V'dur. Sonuç olarak, bir TGMT-19W-4V termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü Denklem 4.3 kullanılarak 1,59 W olarak hesaplanmıştır. Egzoz gazı sıcaklığı bir önceki durumdan daha yüksek olduğu için termoelektrik modülün yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı artmıştır ve bundan dolayı 3 numaralı durumda termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücü 2 numaralı durumdan yüksektir.



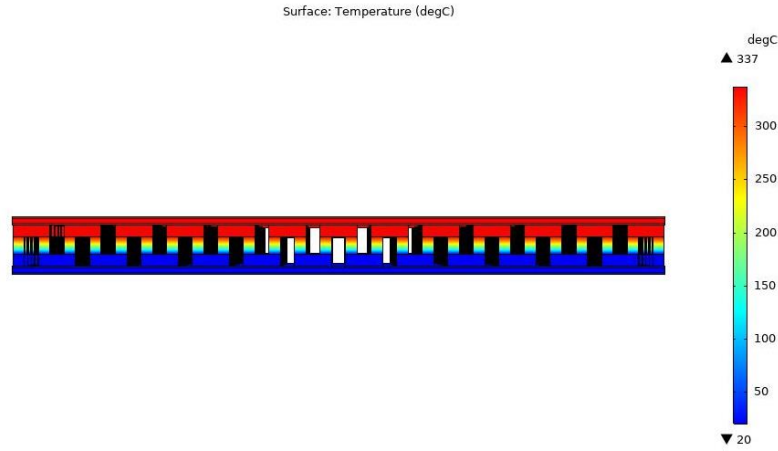
Şekil 5.8 : %75 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için sıcaklık dağılımı.



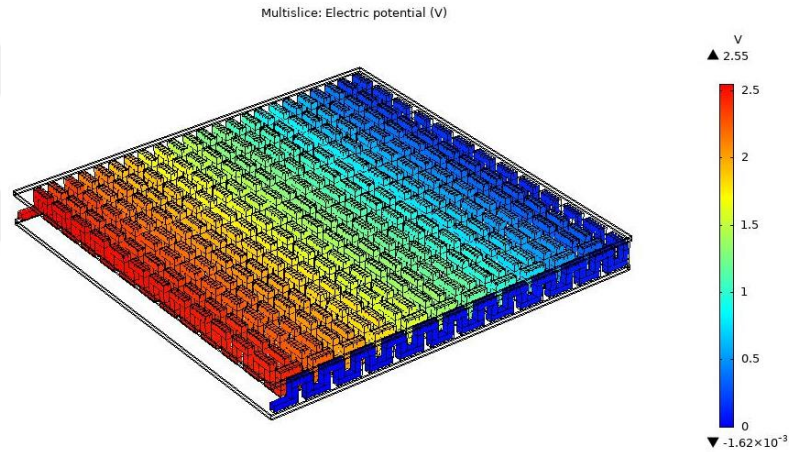
Şekil 5.9 : %75 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için voltaj dağılımı.

%100 ana makine yükünde egzoz gazı sıcaklığı yani termoelektrik modülün üst yüzeyindeki sıcaklık 337,2 °C'dir. Şekil 5.10'da TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün %100 ana makine yükünde 4 numaralı durumdaki sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Şekil 5.11'de TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün aynı makine yükündeki voltaj dağılımı gösterilmektedir. 4 numaralı durumda termoelektrik modülün iki ucu arasındaki voltaj değeri 2,55 V'dur. Sonuç olarak, bir TGMT-19W-4V termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü Denklem 4.3 kullanılarak 1,8 W olarak hesaplanmıştır. 4 numaralı durumda termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücü önceki üç durumdan da yüksektir çünkü 4 numaralı durumda termoelektrik modülün yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı öncekilere göre daha yüksektir. Termoelektrik modülün yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı arttıkça termoelektrik modülün iki ucu arasındaki

voltaj değerinin arttığı ve buna bağlı olarak üretilen elektrik gücünün de arttığı yapılan analizlerin sonucunda da görülmektedir.



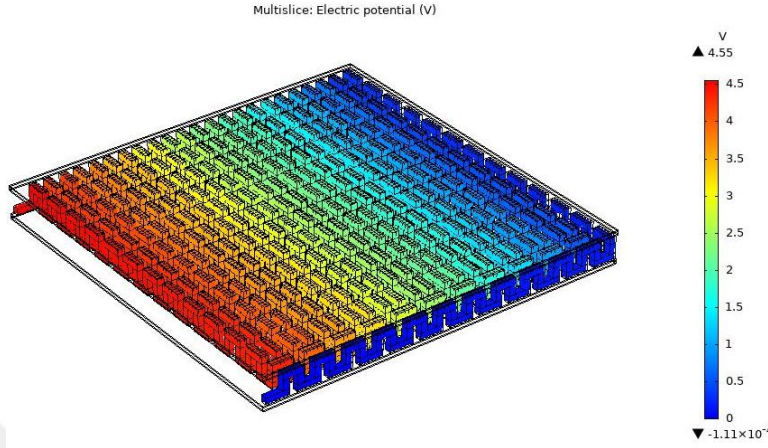
Şekil 5.10 : %100 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.11 : %100 ana makine yükünde TGMT-19W-4V için voltaj dağılımı.

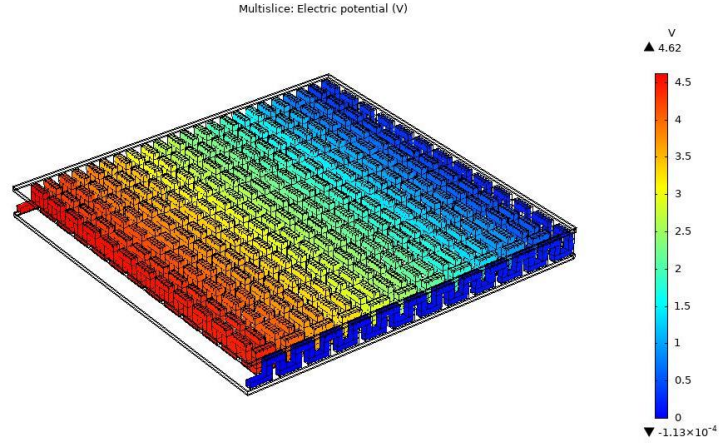
%25 ana makine yükünde egzoz gazı sıcaklığı 250 °C'dir ve bu sıcaklık termoelektrik modülün üst yüzeyindeki sıcaklıktır. Deniz suyu sıcaklığı 20 °C'dir ve bu sıcaklık termoelektrik modülün alt yüzeyindeki sıcaklıktır. Şekil 5.12'de TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün %25 ana makine yükündeki voltaj dağılımı gösterilmektedir. Aynı makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü üzerindeki sıcaklık dağılımı TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün %25 ana makine yükünde 1 numaralı durumdaki sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık dağılımının gösterildiği Şekil 5.4'teki sıcaklık dağılımı ile aynıdır. Bunun sebebi termoelektrik modülün sıcak ve soğuk taraflarının aynı sıcaklık değerine sahip olmasıdır. 5 numaralı durumda termoelektrik modülün iki ucu arasındaki voltaj değeri 4,55 V'dur. TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün elektrik direnci 2,4

ohm'dur. Sonuç olarak, bir TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü Denklem 4.3 kullanılarak 2,16 W olarak hesaplanmıştır.



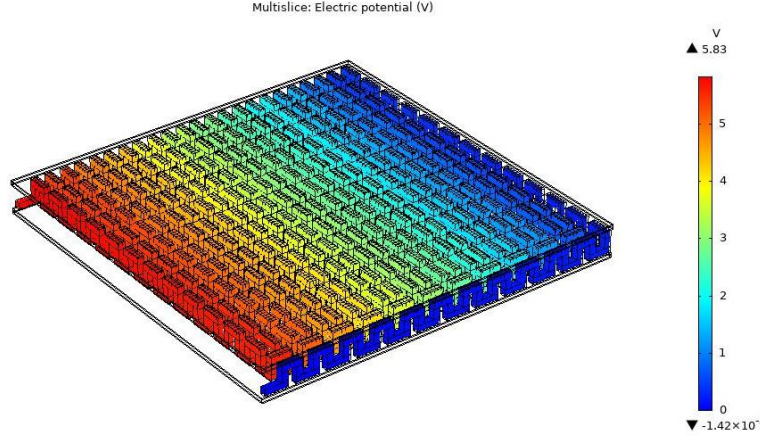
Şekil 5.12 : %25 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 için voltaj dağılımı.

%50 ana makine yükünde egzoz gazı sıcaklığı 253,6 °C'dir ve bu sıcaklık termoelektrik modülün üst yüzeyindeki sıcaklıktır. Şekil 5.13'te TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün %50 ana makine yükündeki voltaj dağılımı gösterilmektedir. Aynı makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 5.6'daki %50 ana makine yükünde 2 numaralı durumdaki TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün sıcaklık dağılımı ile aynıdır. 6 numaralı durumda termoelektrik modülün iki ucu arasındaki voltaj değeri 4,62 V'dur. TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün elektrik direnci 2,4 ohm'dur. Sonuç olarak, bir TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü Denklem 4.3 kullanılarak 2,22 W olarak hesaplanmıştır. %50 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü %25 ana makine yükünde üretilenden yüksektir. Bunun sebebi termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkının daha yüksek olmasıdır.



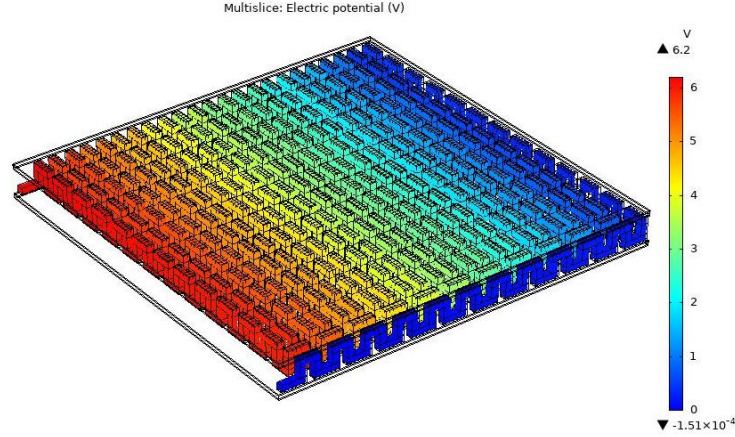
Şekil 5.13 : %50 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 için voltaj dağılımı.

%75 ana makine yükünde egzoz gazı sıcaklığı 317,5 °C'dir ve bu sıcaklık termoelektrik modülün üst yüzeyindeki sıcaklıktır. Şekil 5.14'te TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün %75 ana makine yükündeki voltaj dağılımı gösterilmektedir. Aynı makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 5.8'deki %75 ana makine yükünde 3 numaralı durumdaki TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün sıcaklık dağılımı ile aynıdır. 7 numaralı durumda termoelektrik modülün iki ucu arasındaki voltaj değeri 5,83 V'dur. Bir TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü Denklem 4.3 kullanılarak 3,54 W olarak hesaplanmıştır. %75 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü önceki iki makine yükünde üretilen elektrik gücünden daha çoktur. Bunun sebebi makine yükü arttıkça egzoz gazı sıcaklığının artması ve artan egzoz gazı sıcaklığı sonucunda termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkının artması buna bağlı olarak termoelektrik modülün iki ucu arasındaki voltajın artması ve en sonunda da üretilen elektrik gücünün artmasıdır.



Şekil 5.14 : %75 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 için voltaj dağılımı.

%100 ana makine yükünde egzoz gazı sıcaklığı aynı zamanda termoelektrik modülün üst yüzeyindeki sıcaklık 337,2 °C'dir. Şekil 5.15'te TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün %100 ana makine yükündeki voltaj dağılımı gösterilmektedir. Aynı makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü üzerindeki sıcaklık dağılımı TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün %100 ana makine yükünde 4 numaralı durumdaki sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık dağılımının gösterildiği Şekil 5.10'daki sıcaklık dağılımı ile aynıdır. Bunun sebebi termoelektrik modülün sıcak ve soğuk taraflarının aynı sıcaklık değerine sahip olmasıdır. 8 numaralı durumda termoelektrik modülün iki ucu arasındaki voltaj değeri 6,2 V'dur. Bir TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü Denklem 4.3 kullanılarak 4 W olarak hesaplanmıştır. %100 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü diğer makine yükleri ile kıyaslandığında en yüksektir. Bunun sebebi termoelektrik modülün sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkının diğer durumlardan daha yüksek olmasıdır. Ek olarak, TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü tarafından üretilen maksimum elektrik gücü bu çalışmada ele alınan tüm makine yüklerinde TGMT-19W-4V termoelektrik modülü tarafından üretilenden yüksektir. Bunun sebebi ise TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün termoelektrik özelliklerinin diğer termoelektrik modülünden daha gelişmiş olmasıdır.



Şekil 5.15 : %100 ana makine yükünde TE-MOD-22W-7V-56 için voltaj dağılımı.

Bu çalışmada ele alınan sekiz ayrı durumda, bir termoelektrik modül için üretilen elektrik gücü her bir durum için Çizelge 5.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 : Isıl analizde bir termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücü.

Durum no	Makine yükü (%)	Termoelektrik modül	Üretilen elektrik gücü (W)
1	25	TGMT-19W-4V	0,97
2	50	TGMT-19W-4V	1
3	75	TGMT-19W-4V	1,59
4	100	TGMT-19W-4V	1,8
5	25	TE-MOD-22W-7V-56	2,16
6	50	TE-MOD-22W-7V-56	2,22
7	75	TE-MOD-22W-7V-56	3,54
8	100	TE-MOD-22W-7V-56	4

5.5 Ekonomik Analiz Sonuçları

Feribotun ana makinesinin %25, %50, %75 ve %100 makine yükü olmak üzere dört farklı makine yükü ve TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 olmak üzere iki farklı termoelektrik modül için sekiz ayrı durum ele alınarak yapılan ısıl analiz sonucunda 450, 600 ve 750 olmak üzere üç farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sistemi konfigürasyonu için üretilen elektrik gücü, üretilen elektrik gücünden elde edilen yıllık yakıt tasarrufu ve amortisman süresi hesaplanmıştır ve bu başlık altında bulunan sonuçlar sunulmuştur. Sekiz ayrı durum için yapılan ısıl analizlerin her biri için üç farklı termoelektrik güç üretim sistemi konfigürasyonunun ekonomik analizi yapıldığından toplamda yirmi dört ayrı durum için ekonomik analiz yapılmıştır. Bu çalışmada incelenen feribot yıllık ortalama göz önüne alındığında günde 24 sefer yapmaktadır ve her bir sefer 50 dakika sürmektedir. Bunun sonucunda bu feribot bir günde 20 saat operasyon süresine sahip olmaktadır.

Ek olarak, bu feribot yılda ortalama olarak 8725 sefer yapmaktadır. Feribotta kullanılan yakıt ultra düşük sülfür içerikli dizel yakıttır (Durmaz, 2015). Bu çalışmada 5 Şubat 2024 tarihindeki ultra düşük sülfür içerikli dizel yakıt fiyatı baz alınarak ekonomik analiz yapılmıştır ve bu tarihteki yakıt fiyatı 3,9 \$/galon'dur (FRED, n.d.). Bu yakıt fiyatına göre ultra düşük sülfür içerikli dizel yakıtın m³ fiyatı 1030\$'dır.

TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün 450, 600 ve 750 termoelektrik modül için maliyeti sırasıyla 17.208\$, 22.944\$ ve 28.680\$'dir. Bu çalışmada ele alınan ilk 4 durumda TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için farklı sabit makine yüklerinde bir termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik güçleri hesaplanmıştır. Ek olarak, TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için 450, 600 ve 750 termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sisteminde farklı ana makine yüklerinde üretilen toplam elektrik gücü Çizelge 5.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 : TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde üretilen toplam elektrik gücü.

Makine yükü (%)	450 termoelektrik modül (W)	600 termoelektrik modül (W)	750 termoelektrik modül (W)
25	437	582	728
50	450	600	750
75	716	954	1193
100	810	1080	1350

Aynı makine yükünde termoelektrik modül sayısı arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü artmaktadır. Örneğin, %100 makine yükünde termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü 810 W'tan 1350 W'a çıkmaktadır. Aynı şekilde, aynı termoelektrik modül sayısında makine yükü arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü yine artmaktadır. 600 termoelektrik modül içeren termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü makine yükü %25'ten %100' çıktığında 582 W'tan 1080 W'a çıkmaktadır. Bu feribotun her biri 175 kW gücü olan 3 yardımcı makinesi vardır. Termoelektrik güç üretim sistemi tarafından farklı ana makine yüklerinde üretilen elektrik gücü 450 TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde bir yardımcı makine gücünün %0,25'i ile %0,46'sı arasında değişmektedir. 600 TGMT-19W-4V için yardımcı makine gücünün %0,33'ü ile %0,62'si arasında değişirken 750 TGMT-19W-4V için yardımcı makine gücünün %0,42'si ile %0,77'si arasında değişmektedir. Ek olarak, TGMT-19W-4V

termoelektrik modülü için 450, 600 ve 750 termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sisteminde farklı sabit makine yüklerinde üretilen toplam elektrik gücüne denk gelen yıllık yakıt sarfıyatı hesaplanarak termoelektrik modüller sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı hesaplanmıştır. Çizelge 5.8’deki üretilen elektrik gücü [W] Çizelge 5.1’deki ana makine özgül yakıt tüketimi [g/kWh] değeri ile çarpılarak üretilen toplam elektrik gücüne denk gelen birim zamandaki yakıt sarfıyatı kg/s cinsinden hesaplanmıştır. Birim zamandaki yakıt sarfıyatı feribotun operasyonda geçirdiği yıllık süre ile çarpılarak toplam yakıt sarfıyatı kg cinsinden hesaplanmıştır. Toplam yakıt sarfıyatı Çizelge 5.2’deki yakıt yoğunluğuna [kg/m³] bölünerek üretilen toplam elektrik gücüne denk gelen toplam yıllık yakıt sarfıyatı yani tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı m³ cinsinden hesaplanmıştır. TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için 450, 600 ve 750 termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sisteminde farklı makine yüklerinde üretilen toplam elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarları Çizelge 5.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9 : TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı.

Makine yükü (%)	450 termoelektrik modül (m ³)	600 termoelektrik modül (m ³)	750 termoelektrik modül (m ³)
25	0,76	1,01	1,26
50	0,78	1,04	1,3
75	1,24	1,65	2,06
100	1,40	1,87	2,34

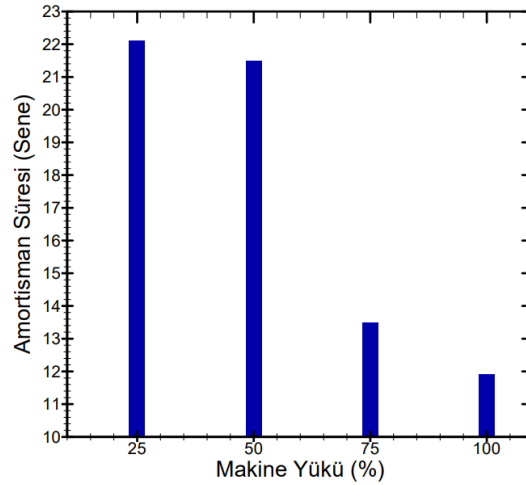
Aynı makine yükünde termoelektrik modül sayısı arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü arttığından dolayı tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı da artmaktadır. Örneğin, %100 makine yükünde termoelektrik modül sayısı 450’den 750’ye çıktığında termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı 1,40 m³’ten 2,34 m³’e çıkmaktadır. Aynı şekilde, aynı termoelektrik modül sayısında makine yükü arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı yine artmaktadır. 450 termoelektrik modül içeren termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı makine yükü %25’ten %100’ çıktığında 0,76 m³’ten 1,40 m³’e çıkmaktadır. Bunun sonucunda, TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için 450, 600 ve 750 termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sisteminde farklı sabit makine yüklerinde üretilen toplam elektrik gücüne denk gelen yıllık yakıt sarfıyatı m³ cinsinden hesaplandıktan sonra yakıt birim hacim fiyatı ile çarpılarak termoelektrik

güç üretimi sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti hesaplanmıştır ve Çizelge 5.10’da sunulmuştur.

Çizelge 5.10 : TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti.

Makine yükü (%)	450 termoelektrik modül (\$)	600 termoelektrik modül (\$)	750 termoelektrik modül (\$)
25	779	1037	1297
50	802	1069	1337
75	1276	1700	2126
100	1443	1925	2406

Aynı makine yükünde termoelektrik modül sayısı arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı arttığından dolayı tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti de artmaktadır. Örneğin, %100 makine yükünde termoelektrik modül sayısı 450’den 750’ye çıktığında termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti 1443\$’dan 2406\$’a çıkmaktadır. Aynı şekilde, aynı termoelektrik modül sayısında makine yükü arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti yine artmaktadır. 750 termoelektrik modül içeren termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti makine yükü %25’ten %100’ çıktığında 1297\$’dan 2406\$’a çıkmaktadır. Sabit makine yükleri için tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti hesaplandıktan sonra termoelektrik güç üretim sisteminin maliyetinin tasarruf edilen yıllık yakıt maliyetine oranı farklı durumlar için hesaplanarak termoelektrik güç üretim sisteminin farklı sabit makine yüklerindeki amortisman süreleri hesaplanmıştır ve Şekil 5.16’da sunulmuştur.



Şekil 5.16 : TGMT-19W-4V için termoelektrik güç üretim sisteminin farklı sabit makine yüklerindeki amortisman süreleri.

TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün bulunduğu termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süreleri %25, %50, %75 ve %100 makine yüklerinde sırasıyla 22,1 yıl, 21,5 yıl, 13,5 yıl ve 11,9 yıldır. TGMT-19W-4V için termoelektrik güç üretim sistemi maliyetini en hızlı %100 makine yükünde çıkarır çünkü termoelektrik güç üretim sistemi, sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı diğer makine yüklerindeki durumlara kıyasla maksimum olduğu için maksimum elektrik gücü üretir.

Yukarıdaki hesaplamalar makine yükünün sabit olduğu durumlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Ek olarak, bu feribot seferlerinde sabit makine yüklerinde operasyon gerçekleştirmediğinden dolayı değişen makine yükleri göz önünde bulundurularak sefer durumu için de aynı hesaplamalar yapılmıştır. Bu feribotun 50 dakika süren bir seferinin 26 dakikasını seyir durumu, 10 dakikasını manevra durumu ve 14 dakikasını liman durumu oluşturmaktadır. Feribot seyir durumundayken rotasında seyretmektedir, manevra durumundayken kalkış ve yanaşma işlemlerini gerçekleştirmektedir ve liman durumunda ise yolcu ve araç indirme bindirme işlemlerini yapmaktadır. Feribotun sefer esnasındaki farklı seyir durumlarındaki makine yükü bilgileri Çizelge 5.11’de verilmiştir (Durmaz, 2015).

Çizelge 5.11 : Feribotun farklı seyir durumlarındaki makine yükleri.

Seyir durumu	Makine yükü (%)
Seyir	75
Manevra	50
Liman	25

Makine yükü seyir durumunda en yüksek iken liman durumunda en düşük değere sahiptir. Ek olarak, bu feribot operasyon halindeyken %100 ana makine yükünü görmemektedir. Rotasında seyrederken %75 ana makine yükündedir. Üç farklı termoelektrik modül sayısına sahip termoelektrik güç üretim sisteminin feribot seferdeyken ürettiği elektrik gücü Çizelge 5.11'deki üç farklı seyir durumundaki makine yükleri için Çizelge 5.8'deki TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün ürettiği elektrik gücü değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir seyir durumu için o seyir durumundaki makine yüküne denk gelen farklı sayılarda termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik gücü [W] ana makine özgül yakıt tüketimi [g/kWh] ile çarpılarak birim zamanda tüketilen yakıt miktarı [kg/s] bulunmuştur. Ardından, her bir seyir durumu için o seyir durumunda geçen yıllık süre birim zamanda tüketilen yakıt miktarı ile çarpılarak termoelektrik modülün ürettiği elektrik gücüne denk gelen yıllık toplam yakıt miktarı [kg] her bir seyir durumu için hesaplanmıştır. Yıllık toplam yakıt miktarı yakıt yoğunluğuna [kg/m³] bölünerek her bir seyir durumu için o seyir durumunda tasarruf edilen yıllık yakıt tüketimi m³ cinsinden hesaplanmıştır. Farklı seyir durumlarındaki tasarruf edilen yıllık yakıt tüketimleri alt alta toplanarak bir yılda seferlerde tasarruf edilen yıllık toplam yakıt tüketimi üç farklı termoelektrik modül sayısı için hesaplanmıştır ve Çizelge 5.12'de sunulmuştur.

Çizelge 5.12 : Sefer halinde TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı.

Seyir durumu	450 termoelektrik modül (m ³)	600 termoelektrik modül (m ³)	750 termoelektrik modül (m ³)
Liman	0,21	0,28	0,35
Manevra	0,16	0,21	0,26
Seyir	0,64	0,86	1,07
Sefer toplamı	1,01	1,35	1,69

Farklı seyir durumları incelendiğinde feribotun seferi esnasında tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı seyir durumunda diğer durumdakilerden daha yüksektir bunun sebebi feribotun seyir halindeyken ana makine yükünün diğer durumlardan daha yüksek olmasıdır. Aynı zamanda her bir seyir durumunda tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı termoelektrik modül sayısı arttıkça artmaktadır. Örneğin, manevra durumunda termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı 0,16 m³'den 0,26 m³'e çıkmaktadır. Feribot sefer halindeyken TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün ürettiği elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık

yakıt miktarı birim hacim fiyatı ile çarpılarak tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti hesaplanmıştır ve Çizelge 5.13'te sunulmuştur.

Çizelge 5.13 : Sefer halinde TGMT-19W-4V için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti.

Seyir durumu	450 termoelektrik modül (\$)	600 termoelektrik modül (\$)	750 termoelektrik modül (\$)
Liman	218	290	363
Manevra	160	214	267
Seyir	663	884	1105
Sefer toplamı	1041	1388	1735

Farklı seyir durumlarında termoelektrik modül sayısı arttıkça her bir seyir durumunda tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı arttığından dolayı tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti de artmaktadır. Örneğin, liman durumunda termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti 218\$'dan 363\$'a çıkmaktadır. Feribotun seferi esnasında tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı seyir durumunda diğer durumdakilerden daha yüksek olduğu için tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti de diğer durumdakilerden yüksek olmaktadır. Farklı sayıda termoelektrik modül içeren termoelektrik güç üretim sistemlerinin maliyetlerinin farklı seyir durumlarındaki tasarruf edilen yıllık yakıt maliyetlerine oranı hesaplanarak sistemlerin amortisman süresi 16,5 yıl olarak hesaplanmıştır. Termoelektrik güç üretim sistemindeki termoelektrik modüller aynı olduğu için üretilen elektrik gücü ile termoelektrik modül sayısı doğru orantılıdır bundan dolayı sistem maliyeti arttıkça tasarruf edilen yakıt maliyeti de artmaktadır. Bu ikisinin birbirine oranı aynı kaldığı için amortisman süresi termoelektrik modül sayısı artmasına rağmen aynı kalmıştır.

Bu çalışmada incelenen diğer termoelektrik modül olan TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün 450, 600 ve 750 termoelektrik modül için maliyeti sırasıyla 21.798\$, 29.349\$ ve 36.330\$'dır. Bu çalışmada ele alınan son 4 durumda TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için farklı sabit makine yüklerinde bir termoelektrik modül tarafından üretilen elektrik güçleri hesaplanmıştır. Ek olarak, TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için 450, 600 ve 750 termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sisteminde farklı makine yüklerinde üretilen toplam elektrik gücü Çizelge 5.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.14 : TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde üretilen toplam elektrik gücü.

Makine yükü (%)	450 termoelektrik modül (W)	600 termoelektrik modül (W)	750 termoelektrik modül (W)
25	972	1296	1620
50	999	1332	1665
75	1593	2124	2655
100	1800	2400	3000

Aynı makine yükünde termoelektrik modül sayısı arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü artmaktadır. Örneğin, %50 makine yükünde termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü 999 W'tan 1665 W'a çıkmaktadır. Benzer şekilde, aynı termoelektrik modül sayısında makine yükü arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü yine artmaktadır. 750 termoelektrik modül içeren termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü makine yükü %25'ten %100' çıktığında 1620 W'tan 3000 W'a çıkmaktadır. Termoelektrik güç üretim sistemi tarafından farklı ana makine yüklerinde üretilen elektrik gücü 450 TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünde bir yardımcı makine gücünün %0,55'i ile %1,03'ü arasında değişmektedir. 600 TE-MOD-22W-7V-56 için yardımcı makine gücünün %0,74'ü ile %1,37'si arasında değişirken 750 TE-MOD-22W-7V-56 için yardımcı makine gücünün %0,93'ü ile %1,71'i arasında değişmektedir. Ek olarak, TE-MOD-22W-7V-56 için 450, 600 ve 750 termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sisteminde farklı sabit makine yüklerinde üretilen toplam elektrik gücüne denk gelen yıllık yakıt sarfıyatı hesaplanarak termoelektrik modüller sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı hesaplanmıştır ve Çizelge 5.15'te sunulmuştur.

Çizelge 5.15 : TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı.

Makine yükü (%)	450 termoelektrik modül (m ³)	600 termoelektrik modül (m ³)	750 termoelektrik modül (m ³)
25	1,68	2,24	2,8
50	1,73	2,3	2,88
75	2,76	3,67	4,59
100	3,11	4,15	5,19

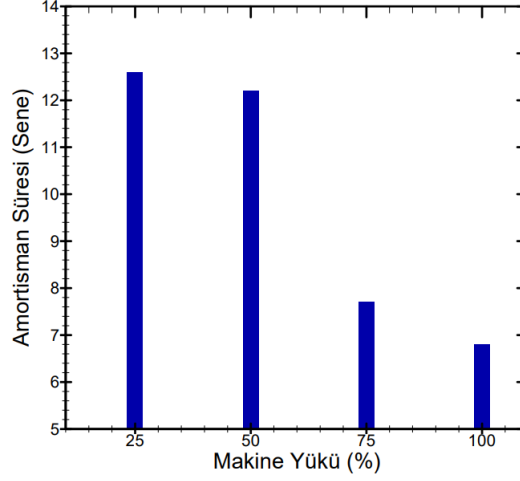
Aynı makine yükünde termoelektrik modül sayısı arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü arttığından dolayı tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı

da artmaktadır. Örneğin, %75 makine yükünde termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı 2,76 m³'ten 4,59 m³'e çıkmaktadır. Aynı şekilde, aynı termoelektrik modül sayısında makine yükü arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı yine artmaktadır. 600 termoelektrik modül içeren termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı makine yükü %25'ten %100'e çıktığında 2,24 m³'ten 4,15 m³'e çıkmaktadır. Sonuç olarak, TE-MOD-22W-7V-56 için 450, 600 ve 750 termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sisteminde farklı sabit makine yüklerinde üretilen toplam elektrik gücüne denk gelen yıllık yakıt sarfıyatı [m³] hesaplandıktan sonra yakıt birim hacim fiyatı ile çarpılarak tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti hesaplanmıştır ve Çizelge 5.16'daki gibidir.

Çizelge 5.16 : TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti.

Makine yükü (%)	450 termoelektrik modül (\$)	600 termoelektrik modül (\$)	750 termoelektrik modül (\$)
25	1732	2310	2887
50	1780	2374	2967
75	2839	3785	4731
100	3208	4277	5346

Aynı makine yükünde termoelektrik modül sayısı arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti de artmaktadır. Örneğin, %50 ana makine yükünde termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti 1780\$'dan 2967\$'a çıkmaktadır. Aynı şekilde, aynı termoelektrik modül sayısında makine yükü arttıkça termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti yine artmaktadır. 450 termoelektrik modül içeren termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti ana makine yükü %25'ten %100'e çıktığında 1732\$'dan 3208\$'a çıkmaktadır. Sabit makine yükleri için tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti hesaplandıktan sonra termoelektrik güç üretim sisteminin maliyetinin tasarruf edilen yıllık yakıt maliyetine oranı farklı durumlar için hesaplanarak termoelektrik güç üretim sisteminin farklı sabit makine yüklerindeki amortisman süreleri hesaplanmıştır ve Şekil 5.17'deki gibidir.



Şekil 5.17 : TE-MOD-22W-7V-56 için termoelektrik güç üretim sisteminin farklı sabit makine yüklerindeki amortisman süreleri.

TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün bulunduğu termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süreleri %25, %50, %75 ve %100 makine yüklerinde sırasıyla 12,6 yıl, 12,2 yıl, 7,7 yıl ve 6,8 yıldır. TE-MOD-22W-7V-56 için termoelektrik güç üretim sistemi TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde de olduğu gibi maliyetini en hızlı %100 ana makine yükünde çıkarır çünkü termoelektrik güç üretim sistemi, sıcak ve soğuk taraf arasındaki sıcaklık farkı diğer makine yüklerindeki durumlara kıyasla maksimum olduğu için maksimum elektrik gücü üretir. Ek olarak, TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modüllerinden oluşan termoelektrik güç üretim sistemi bu çalışmada ele alınan tüm ana makine yüklerinde TGMT-19W-4V'den daha düşük amortisman süresine sahiptir.

TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için üç farklı termoelektrik modül sayısına sahip termoelektrik güç üretim sisteminin feribot seferdeyken ürettiği elektrik gücü Çizelge 5.11'deki üç farklı seyir durumundaki makine yükleri için Çizelge 5.14'teki TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün ürettiği elektrik gücü değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir seyir durumu için o seyir durumundaki makine yüküne denk gelen farklı sayılarda termoelektrik modül için üretilen elektrik gücü [W] ana makine özgül yakıt tüketimi [g/kWh] ile çarpılarak birim zamanda tüketilen yakıt miktarı [kg/s] hesaplanmıştır. Birim zamanda tüketilen yakıt miktarı her bir seyir durumu için o seyir durumunda geçen yıllık süre ile çarpılarak ve yakıt yoğunluğuna bölünerek her bir seyir durumu için termoelektrik modüllerin ürettiği elektrik gücüne denk gelen yani tasarruf edilen yıllık yakıt tüketimi m^3 cinsinden hesaplanmıştır. Farklı seyir durumlarında tasarruf edilen yıllık yakıt tüketimleri alt alta

toplanarak bir yılda seferlerde tasarruf edilen toplam yıllık yakıt miktarı [m^3] her bir seyir durumu için hesaplanmıştır ve Çizelge 5.17’de sunulmuştur.

Çizelge 5.17 : Sefer halinde TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı.

Seyir durumu	450 termoelektrik modül (m^3)	600 termoelektrik modül (m^3)	750 termoelektrik modül (m^3)
Liman	0,47	0,63	0,78
Manevra	0,35	0,46	0,58
Seyir	1,43	1,91	2,39
Sefer toplamı	2,25	3	3,75

Farklı seyir durumları incelendiğinde feribotun seferi esnasında tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı seyir durumunda diğer durumdakilerden daha yüksektir bunun sebebi feribotun seyir halindeyken makine yükünün diğer durumlardan daha yüksek olmasıdır. Aynı zamanda her bir seyir durumunda tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı termoelektrik modül sayısı arttıkça artmaktadır. Örneğin, liman durumunda termoelektrik modül sayısı 450’den 750’ye çıktığında tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı $0,47 m^3$ ’den $0,78 m^3$ ’e çıkmaktadır. Feribot sefer halindeyken TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün ürettiği elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı birim hacim fiyatı ile çarpılarak tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti hesaplanmıştır ve Çizelge 5.18’de sunulmuştur.

Çizelge 5.18 : Sefer halinde TE-MOD-22W-7V-56 için farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç termoelektrik güç üretim sisteminde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti.

Seyir durumu	450 termoelektrik modül (\$)	600 termoelektrik modül (\$)	750 termoelektrik modül (\$)
Liman	485	647	808
Manevra	356	475	593
Seyir	1476	1968	2460
Sefer toplamı	2317	3090	3861

Farklı seyir durumlarında termoelektrik modül sayısı arttıkça her bir seyir durumunda tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı arttığından dolayı tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti de artmaktadır. Örneğin, seyir durumunda termoelektrik modül sayısı 450’den 750’ye çıktığında termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti 1476\$’dan 2460\$’a çıkmaktadır. Feribotun seferi esnasında tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı seyir durumunda diğer durumdakilerden daha yüksek olduğu için tasarruf edilen yıllık yakıt maliyeti de diğer

durumdakilerden yüksek olmaktadır. Farklı sayıda termoelektrik modül içeren termoelektrik güç üretim sistemlerinin maliyetlerinin farklı seyir durumlarındaki tasarruf edilen yıllık yakıt maliyetlerine oranı hesaplanarak sistemlerin amortisman süresi 9,4 yıl olarak hesaplanmıştır. Termoelektrik güç üretim sistemindeki termoelektrik modüller aynı olduğu için üretilen elektrik gücü ile termoelektrik modül sayısı doğru orantılıdır bundan dolayı sistem maliyeti arttıkça tasarruf edilen yakıt maliyeti de artmaktadır. Bu ikisinin birbirine oranı sabit olduğu için amortisman süresi termoelektrik modül sayısı artmasına rağmen aynı kalmıştır. Ek olarak, TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünden oluşan termoelektrik güç üretim sistemlerinin amortisman süresi feribot sefer halindeyken TGMT-19W-4V termoelektrik modülünden oluşan termoelektrik güç üretim sistemlerinkinden daha kısadır yani sistemlerin maliyetini çıkarması daha kısa zaman almaktadır.

5.6 Çevresel Analiz Sonuçları

Feribotun ana makinesindeki %25, %50, %75 ve %100 makine yükleri için dört farklı makine yükü ve TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 için iki farklı termoelektrik modül göz önüne alınarak sekiz ayrı durum için yapılan ısıl analiz sonucunda 450, 600 ve 750 olmak üzere üç farklı sayıda termoelektrik modül içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü ve üretilen elektrik gücü sayesinde tasarruf edilen yıllık yakıt miktarı hesaplanmıştır. Bu başlık altında, egzoz gazının atık ısısından yararlanarak elektrik gücü üreten termoelektrik güç üretim sistemi sayesinde çevreye salınan emisyonlardaki azalmalar hesaplanmıştır. Bu çalışmada ele alınan emisyonlar NO_x , SO_2 , CO, CO_2 ve HC'dir. Burada NO_x azot oksitleri, SO_2 kükürtdioksiti, CO karbonmonoksiti, CO_2 karbondioksiti ve HC hidrokarbonu temsil etmektedir. Bu çalışmada ele alınan feribotun farklı seyir durumlarında yaymış olduğu emisyonlar ve emisyon faktörleri Çizelge 5.19'da verilmiştir.

Çizelge 5.19 : Farklı seyir durumlarında feribotun emisyon faktörleri (Durmaz, 2015).

Emisyon türü	Seyir durumu	Emisyon faktörü (g/kWh)
NO _x	Seyir	11,8
NO _x	Manevra	11,3
NO _x	Liman	15,3
SO ₂	Seyir	0,49
SO ₂	Manevra	0,89
SO ₂	Liman	2,03
CO	Seyir	0,07
CO	Manevra	0,11
CO	Liman	0,16
CO ₂	Seyir	536,58
CO ₂	Manevra	522,66
CO ₂	Liman	737,8
HC	Seyir	0,57
HC	Manevra	0,74
HC	Liman	1,36

Çizelge 5.19’da farklı seyir durumları için verilen emisyon faktörleri [g/kWh] bu çalışmada ele alınan her iki termoelektrik modül için termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü [W] ile çarpılarak birim zamanda yayılan emisyon miktarı [g/san] hesaplanmıştır. Feribotun bir seferinde her bir seyir durumunda geçirdiği süre ile birim zamanda yayılan emisyon miktarının çarpımından feribottan bir seferde yayılan emisyon miktarı [g] hesaplanmıştır. Elde edilen sonuç feribotun yıllık sefer sayısı ile çarpılarak termoelektrik güç üretim sistemi sayesinde feribottan atmosfere yayılan emisyonlardaki azalma bir yıllık süre için kg cinsinden elde edilmiştir. 450, 600 ve 750 TGMT-19W-4V termoelektrik modülü içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sisteminde farklı seyir durumlarında feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık süreçteki azalma miktarları Çizelge 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.20 : TGMT-19W-4V için üç termoelektrik güç üretim sisteminde farklı seyir durumlarında feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık azalma miktarları.

Emisyon türü	Seyir durumu	450 termoelektrik modül (kg)	600 termoelektrik modül (kg)	750 termoelektrik modül (kg)
NO _x	Seyir	32	42,6	53,2
NO _x	Manevra	7,4	9,9	12,3
NO _x	Liman	13,6	18,1	22,7
SO ₂	Seyir	1,3	1,77	2,2
SO ₂	Manevra	0,6	0,78	0,97
SO ₂	Liman	1,8	2,4	3
CO	Seyir	0,2	0,25	0,32
CO	Manevra	0,07	0,1	0,12
CO	Liman	0,14	0,19	0,24
CO ₂	Seyir	1452,6	1935,4	2420,3
CO ₂	Manevra	342	456	570
CO ₂	Liman	656,4	874,2	1093,5
HC	Seyir	1,54	2,1	2,6
HC	Manevra	0,48	0,65	0,8
HC	Liman	1,2	1,6	2

CO₂ emisyonunun emisyon faktörü diğer emisyon tiplerinden açık ara büyük olduğu için termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde en çok azalan emisyon türü CO₂ emisyonu olmuştur. Ek olarak, termoelektrik modül sayısı arttıkça bu çalışmada incelenen tüm emisyon tiplerindeki azalmalar artmıştır. Örneğin termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında liman durumundaki NO_x emisyonundaki yıllık azalma miktarı 13,6 kg'dan 22,68 kg'a çıkmıştır. Çizelge 5.20'de farklı seyir durumlarındaki aynı tür emisyonlardaki azalmalar toplanarak bir yıllık süreçteki toplam emisyon azalma miktarları 450, 600 ve 750 TGMT-19W-4V termoelektrik modülü içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sistemi için bu çalışmada ele alınan beş emisyon türü için Çizelge 5.21'de sunulmuştur.

Çizelge 5.21 : TGMT-19W-4V için üç termoelektrik güç üretim sisteminde feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık azalma miktarları.

Emisyon türü	450 termoelektrik modül (kg)	600 termoelektrik modül (kg)	750 termoelektrik modül (kg)
NO _x	53	70,6	88,2
SO ₂	3,7	4,95	6,2
CO	0,4	0,5	0,7
CO ₂	2451	3265,6	4084
HC	3,2	4,3	5,4

TGMT-19W-4V termoelektrik modülü içeren termoelektrik güç üretim sistemlerinde üretilen elektrik gücü sayesinde atmosfere yayılan emisyonlardaki bir yıllık süreçte azalmanın en çok olduğu emisyon türü CO₂ iken azalmanın en az olduğu emisyon türü CO olmuştur. CO₂ emisyonundan sonra yıllık bazda emisyon azalmasının en çok olduğu emisyon türü NO_x olmuştur. Termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında NO_x emisyonundaki yıllık azalma miktarı 53 kg'dan 88,5 kg'a çıkmıştır. Bu feribotun bir yılda yaymış olduğu emisyon miktarı 97 ton NO_x, 0,77 ton SO₂, 4467,3 ton CO₂, 6,2 ton CO ve 5,6 ton HC'dir (Durmaz, 2015). Termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde emisyonlardaki yıllık azalma miktarı 450, 600 ve 750 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde sırasıyla, yıllık NO_x emisyonunun %0,05'i ile %0,09'u arasında, SO₂ emisyonunun %0,48'i ile %0,8'i arasında, CO₂ emisyonunun %0,05'i ile %0,09'u arasında, CO emisyonunun %0,006'sı ile %0,01'i arasında iken HC emisyonunun %0,06'sı ile %0,1'i arasında değişmektedir. Tüm termoelektrik modül sayılarında yıllık bazda oran olarak en çok azalan emisyon türü SO₂ emisyonudur.

450, 600 ve 750 TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sisteminde farklı seyir durumlarında feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık süreçteki azalma miktarları Çizelge 5.22'de verilmiştir.

Çizelge 5.22 : TE-MOD-22W-7V-56 için üç termoelektrik güç üretim sisteminde farklı seyir durumlarında feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık azalma miktarları.

Emisyon türü	Seyir durumu	450 termoelektrik modül (kg)	600 termoelektrik modül (kg)	750 termoelektrik modül (kg)
NO _x	Seyir	71,1	95	118,5
NO _x	Manevra	16,4	22	27,4
NO _x	Liman	30,3	40	50,5
SO ₂	Seyir	3	4	4,9
SO ₂	Manevra	1,3	1,7	2,2
SO ₂	Liman	4	5,4	6,7
CO	Seyir	0,4	0,6	0,7
CO	Manevra	0,16	0,2	0,3
CO	Liman	0,3	0,4	0,5
CO ₂	Seyir	3232	4309	5386
CO ₂	Manevra	759	1012	1266
CO ₂	Liman	1460	1947	2433
HC	Seyir	3,4	4,6	5,7
HC	Manevra	1,1	1,43	1,8
HC	Liman	2,7	3,6	4,5

TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde de olduğu gibi TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü içeren termoelektrik güç üretim sistemlerinde de yıllık bazda emisyon azalmasının en çok olduğu emisyon türü CO₂ olmuştur. CO₂ emisyonu yayılmasının en çok azaldığı durum seyir durumu olmuştur. Bunun sebebi feribotun seferlerinde makine yükününün seyir halindeyken %75 makine yüküyle manevra (%50) ve liman (%25) durumlarından daha yüksek olmasıdır. Ek olarak feribotun bir seferde seyir durumunda geçirdiği sürenin 26 dakikayla manevra (10 dakika) ve liman (14 dakika) durumlarından daha yüksek olmasıdır. Son olarak CO₂ emisyon faktörünün seyir durumunda diğer durumlara göre daha yüksek olması da emisyon azalmasının seyir durumunda daha yüksek olmasına sebep olmaktadır. Termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında seyir durumundaki CO₂ emisyonundaki yıllık azalma miktarı 3232 kg'dan 5386 kg'a çıkmıştır. Çizelge 5.22'de farklı seyir durumlarındaki aynı tür emisyonlardaki azalmalar toplanarak bir yıllık süreçteki toplam emisyon azalma miktarları 450, 600 ve 750 TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü içeren üç farklı termoelektrik güç üretim sistemi için bu çalışmada ele alınan beş emisyon türü için Çizelge 5.23'te sunulmuştur.

Çizelge 5.23 : TE-MOD-22W-7V-56 için üç termoelektrik güç üretim sisteminde feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık azalma miktarları.

Emisyon türü	450 termoelektrik modül (kg)	600 termoelektrik modül (kg)	750 termoelektrik modül (kg)
NO _x	117,8	157	196,3
SO ₂	8,3	11	13,8
CO	0,9	1,2	1,5
CO ₂	5451	7268	9085
HC	7,2	9,6	12

TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde de olduğu gibi TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü içeren termoelektrik güç üretim sistemlerinde de yıllık bazda emisyon azalmasının en az olduğu emisyon türü CO olmuştur. Termoelektrik modül sayısı 450'den 750'ye çıktığında CO emisyonundaki yıllık azalma miktarı sadece 0,9 kg'dan 1,5 kg'a çıkmıştır. Bu çalışmada ele alınan tüm emisyon türlerinde yıllık bazda emisyon azalması miktarı hem tüm seyir durumlarında hem de toplamda TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için TGMT-19W-4V termoelektrik modülünden daha fazladır. Örneğin bir yıllık süreçte NO_x emisyonunun azalma miktarları 450, 600 ve 750 TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için sırasıyla 117,8 kg, 157 kg ve

196,3 kg iken bu değerler aynı sayıdaki TGMT-19W-4V termoelektrik modülün için sırasıyla 53 kg, 70,6 kg ve 88,2 kg olmaktadır. Termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde emisyonlardaki yıllık azalma miktarı 450, 600 ve 750 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünde sırasıyla, yıllık NO_x emisyonunun %0,12'si ile %0,2'si arasında, SO₂ emisyonunun %1,08'i ile %1,79'u arasında, CO₂ emisyonunun %0,12'si ile %0,2'si arasında, CO emisyonunun %0,015'i ile %0,024'ü arasında ve HC emisyonunun %0,13'ü ile %0,21'i arasında değişmektedir. TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde de olduğu gibi TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünde de yıllık bazda oran olarak en çok azalan emisyon türü SO₂ emisyonudur. Ek olarak, TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün incelendiği tüm durumlarda emisyon türlerindeki yıllık azalma oranları TGMT-19W-4V termoelektrik modülündekilerden daha yüksektir.



6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modüllerini içeren termoelektrik güç üretim sistemi için bir feribotun %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerindeki egzoz gazı sıcaklıkları ve 20°C'lik deniz suyu sıcaklığı için dört farklı sıcaklık farkında termoelektrik modül boyunca sıcaklık dağılımı ve voltaj dağılımı COMSOL Multiphysics paket programı kullanılarak sürekli ısı iletimi denklemi ve elektrik denklemlerinin birlikte çözülmesiyle elde edilmiştir. İki farklı termoelektrik modül ve dört farklı sıcaklık farkı için toplamda sekiz ayrı durum için ısı analiz yapılmıştır. Bu sekiz farklı durumda termoelektrik modül tarafından üretilen voltajın makine yükü ve termoelektrik malzemeye bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Isıl analiz sonucunda her bir durum için elde edilen voltaj dağılımlarından yararlanılarak termoelektrik modül tarafından üretilen yıllık elektrik gücü hesaplanmıştır. Ardından, ekonomik analiz kapsamında 450, 600 ve 750 adet olmak üzere üç farklı sayıda TGMT-19W-4V ve TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modüllerini içeren termoelektrik güç üretim sistemleri için üretilen yıllık elektrik gücüne denk gelen yakıt tüketiminden yapılan tasarruf hem miktar (m^3) olarak hem de maliyet (\$) olarak hesaplanmıştır. Termoelektrik güç üretim sisteminin maliyeti yakıt maliyetinden yapılan yıllık tasarrufa bölünerek sistemin amortisman süresi hesaplanmıştır. Amortisman süresi hem sabit ana makine yükleri için hem de feribotun sefer halindeyken değişen ana makine yükleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Son olarak, termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen yıllık elektrik gücü değerleri kullanılarak feribottan yayılan emisyonlardaki yıllık azalma miktarları hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerinde bir TGMT-19W-4V termoelektrik modülünden üretilen voltaj değerleri sırasıyla 1,87 V, 1,9 V, 2,39 V ve 2,55 V iken TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için sırasıyla 4,55 V, 4,62 V, 5,83 V ve 6,2 V'tur. %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerinde bir TGMT-19W-4V termoelektrik modülünden üretilen elektrik gücü değerleri sırasıyla 0,97 W, 1 W, 1,59 W ve 1,8 W iken TE-

MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için sırasıyla 2,16 W, 2,22 W, 3,54 W ve 4 W'tır. Bir TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü tüm makine yüklerinde bir TGMT-19W-4V termoelektrik modülünden daha fazla voltaj ve elektrik gücü üretmiştir. Ayrıca, ana makine yükünün artmasıyla beraber egzoz gazı sıcaklığı arttığı için termoelektrik güç üretim sisteminin sıcak ve soğuk tarafları arasındaki sıcaklık farkının artmasından dolayı termoelektrik modülün ürettiği voltaj ve elektrik gücü her iki termoelektrik modül için de artan ana makine yüküyle birlikte artmaktadır.

- %25, %50, %75 ve %100 sabit ana makine yüklerinde 450 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülüne sahip bir termoelektrik güç üretim sisteminden üretilen elektrik gücü değerleri sırasıyla 437 W, 450 W, 716 W ve 810 W'tır. Bu değerler 600 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülüne sahip bir termoelektrik güç üretim sistemi için sırasıyla 582 W, 600 W, 954 W ve 1080 W iken 750 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modül için 728 W, 750 W, 1193 W ve 1350 W'tır. Bu feribotun her biri 175 kW gücü olan 3 yardımcı makinesi vardır. Termoelektrik güç üretim sistemi tarafından farklı ana makine yüklerinde üretilen elektrik gücü 450 TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde bir yardımcı makine gücünün %0,25'i ile %0,46'sı arasında değişmektedir. 600 TGMT-19W-4V için yardımcı makine gücünün %0,33'ü ile %0,62'si arasında değişirken 750 TGMT-19W-4V için yardımcı makine gücünün %0,42'si ile %0,77'si arasında değişmektedir.
- Termoelektrik güç üretim sistemleri tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde yakıttan elde edilen tasarruf %25, %50, %75 ve %100 sabit ana makine yüklerinde 450 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için sırasıyla 0,76 m³ (779\$), 0,78 m³ (802\$), 1,24 m³ (1276\$) ve 1,4 m³'tür (1443\$). Bu değerler 600 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için sırasıyla 1,01 m³ (1037\$), 1,04 m³ (1069\$), 1,65 m³ (1700\$) ve 1,87 m³'tür (1925\$) iken 750 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için sırasıyla 1,26 m³ (1297\$), 1,3 m³ (1337\$), 2,06 m³ (2126\$) ve 2,34 m³'tür (2406\$). TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün bulunduğu termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süreleri %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerinde sırasıyla 22,1 yıl, 21,5 yıl, 13,5 yıl ve 11,9 yıldır. Ana makine yükü arttığında termoelektrik güç üretim sisteminin ürettiği elektrik gücü

arttığı için yakıt maliyetinden yapılan tasarruf artmaktadır. Bunun sonucunda amortisman süresi ana makine yükünün artmasıyla beraber azalmaktadır.

- Feribot sefer halindeyken termoelektrik güç üretim sistemleri tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde yakıttan elde edilen tasarruf 450 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için 1,01 m³ (1041\$), 600 adet için 1,35 m³ (1388\$) ve 750 adet için ise 1,69 m³ (1735\$) olarak hesaplanmıştır. TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün bulunduğu termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süresi sefer durumunda 16,5 yıl olarak hesaplanmıştır.
- %25, %50, %75 ve %100 sabit ana makine yüklerinde 450 TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülüne sahip bir termoelektrik güç üretim sisteminden üretilen elektrik gücü değerleri sırasıyla 972 W, 999 W, 1593 W ve 1800 W'tır. Bu değerler 600 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülüne sahip bir termoelektrik güç üretim sistemi için sırasıyla 1296 W, 1332 W, 2124 W ve 2400 W iken 750 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modül için 1620 W, 1665 W, 2655 W ve 3000 W'tır. Termoelektrik güç üretim sistemi tarafından farklı ana makine yüklerinde üretilen elektrik gücü 450 TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünde bir yardımcı makine gücünün %0,55'i ile %1,03'ü arasında değişmektedir. 600 TE-MOD-22W-7V-56 için yardımcı makine gücünün %0,74'ü ile %1,37'si arasında değişirken 750 TE-MOD-22W-7V-56 için yardımcı makine gücünün %0,93'ü ile %1,71'i arasında değişmektedir.
- Termoelektrik güç üretim sistemleri tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde yakıttan elde edilen tasarruf %25, %50, %75 ve %100 sabit ana makine yüklerinde 450 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için sırasıyla 1,68 m³ (1732\$), 1,73 m³ (1780\$), 2,76 m³ (2839\$) ve 3,11 m³'tür (3208\$). Bu değerler 600 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için sırasıyla 2,24 m³ (2310\$), 2,3 m³ (2374\$), 3,67 m³ (3785\$) ve 4,15 m³'tür (4277\$) iken 750 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için sırasıyla 2,8 m³ (2887\$), 2,88 m³ (2967\$), 4,59 m³ (4731\$) ve 5,19 m³'tür (5346\$). TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün bulunduğu termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süreleri %25, %50, %75 ve %100 ana makine yüklerinde sırasıyla 12,6 yıl, 12,2 yıl, 7,7 yıl ve 6,8 yıldır. TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülündeki amortisman

süresi tüm ana makine yüklerinde TGMT-19W-4V termoelektrik modülünden daha kısadır.

- Feribot sefer halindeyken termoelektrik güç üretim sistemleri tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde yakıttan elde edilen tasarruf 450 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için 2,25 m³ (2317\$), 600 adet için 3m³ (3090\$) ve 750 adet için ise 3,75 m³ (3861\$) olarak hesaplanmıştır. TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün bulunduğu termoelektrik güç üretim sisteminin amortisman süresi sefer durumunda 9,4 yıl olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için amortisman süresi TGMT-19W-4V termoelektrik modülündekinden daha kısadır.
- Feribot sefer halindeyken termoelektrik güç üretim sistemleri tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık süreçteki azalma 450 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülü için 53 kg NO_x, 3,7 kg SO₂, 0,4 kg CO, 2451 kg CO₂ ve 3,2 kg HC olarak hesaplanmıştır. 600 adet için bir yıllık süreçteki azalma 70,6 kg NO_x, 4,95 kg SO₂, 0,5 kg CO, 3266 kg CO₂ ve 4,3 kg HC iken 750 adet için ise 88,2 kg NO_x, 6,2 kg SO₂, 0,7 kg CO, 4084 kg CO₂ ve 5,4 kg HC olarak hesaplanmıştır. TGMT-19W-4V termoelektrik modülünün incelendiği durumlarda atmosfere yayılan emisyonlardaki bir yıllık süreçte azalmanın en çok olduğu emisyon türü CO₂ iken azalmanın en az olduğu emisyon türü CO olmuştur.
- Emisyonlardaki yıllık azalma miktarı 450, 600 ve 750 adet TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde sırasıyla, yıllık NO_x emisyonunun %0,05'i ile %0,09'u arasında, SO₂ emisyonunun %0,48'i ile %0,8'i arasında, CO₂ emisyonunun %0,05'i ile %0,09'u arasında, CO emisyonunun %0,006'sı ile %0,01'i arasında iken HC emisyonunun %0,06'sı ile %0,1'i arasında değişmektedir. Tüm termoelektrik modül sayılarında yıllık bazda oran olarak en çok azalan emisyon türü SO₂ emisyonudur.
- Feribot sefer halindeyken termoelektrik güç üretim sistemleri tarafından üretilen elektrik gücü sayesinde feribottan yayılan emisyonlardaki bir yıllık süreçteki azalma 450 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için 117,8 kg NO_x, 8,3 kg SO₂, 0,9 kg CO, 5451 kg CO₂ ve 7,2 kg HC hesaplanmıştır. 600 adet için bir yıldaki azalma 157 kg NO_x, 11 kg SO₂, 1,2

kg CO, 7268 kg CO₂ ve 9,6 kg HC iken 750 adet için 196,3 kg NO_x, 13,8 kg SO₂, 1,5 kg CO, 9085 kg CO₂ ve 12 kg HC olarak hesaplanmıştır. TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde olduğu gibi TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün incelendiği durumlarda da yıllık bazda emisyon azalmasının en çok olduğu emisyon türü CO₂ iken en az olduğu emisyon türü CO olmuştur. Bu çalışmada ele alınan tüm emisyon türlerinde yıllık bazda emisyon azalması miktarı TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülü için TGMT-19W-4V termoelektrik modülünden daha fazladır.

- Emisyonlardaki yıllık azalma miktarı 450, 600 ve 750 adet TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünde sırasıyla, yıllık NO_x emisyonunun %0,12'si ile %0,2'si arasında, SO₂ emisyonunun %1,08'i ile %1,79'u arasında, CO₂ emisyonunun %0,12'si ile %0,2'si arasında, CO emisyonunun %0,015'i ile %0,024'ü arasında ve HC emisyonunun %0,13'ü ile %0,21'i arasında değişmektedir. TGMT-19W-4V termoelektrik modülünde de olduğu gibi TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünde de yıllık bazda oran olarak en çok azalan emisyon türü SO₂ emisyonudur. Ek olarak, TE-MOD-22W-7V-56 termoelektrik modülünün incelendiği tüm durumlarda emisyon türlerindeki yıllık azalma oranları TGMT-19W-4V termoelektrik modülündekilerden daha yüksektir.
- Isıl, ekonomik ve çevresel analiz yapıldıktan sonra bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla kıyaslanarak doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu çalışmadaki tüm durumlar göz önüne alındığında termoelektrik güç üretim sistemi tarafından üretilen elektrik gücünün feribotun ana makinesinin toplam gücüne oranı %0,025 ile %0,17 arasında değişmektedir ve literatürden alınan çalışmaların sonuçlarıyla bu çalışmadan elde edilen sonuçların uyum gösterdiği görülmektedir.

Bu çalışmada ticari termoelektrik modüller ele alınarak termoelektrik güç üretim sistemi analizleri yapılmıştır. Gemide ana makinenin egzoz gazının atık ısısı kullanılarak termoelektrik güç üretim sistemi ile yapılacak gelecekteki atık ısı geri kazanım çalışmalarında günümüz ticari termoelektrik malzemelerine kıyasla gelişmiş malzemelerden yararlanılabilir. Bunun için laboratuvar ortamında geliştirilecek ZT katsayısı daha yüksek yani atık ısıdan elektrik gücü üretim verimi daha yüksek olan termoelektrik malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Malzeme geliştirme aşamasından

sonra yeni termoelektrik malzemelerin ticarileştirilmesiyle beraber gelişmiş malzemeler atık ısı geri kazanımı çalışmaları için makul fiyatlı hale gelecektir ve bu gelişmiş malzemelerin çalışmalarda kullanılması sonucunda atık ısıdan daha büyük oranlarda yararlanılacaktır. Bu durumda yakıt tüketiminden yapılacak tasarrufun artması ile atmosfere yayılan emisyonlar da azaltılacaktır. Ek olarak, bu çalışmada termoelektrik modüllerin sıcak taraflarında egzoz gazı sıcaklığı sabit bir değer olarak sıcaklık sınır şartı olarak kullanılmıştır fakat gerçekte egzoz gazı sıcaklığı egzoz kanalı boyunca sabit kalmamaktadır ve azalmaktadır. Gelecek çalışmalarda bu durumun ele alınması çözüm doğruluğunu artıracaktır. Bu çalışmada termoelektrik modül üzerindeki sıcaklık dağılımı sürekli ısı iletimi denkleminin çözülmesi ile elde edilmiştir. Isı iletiminin zamana bağlı olarak çözülmesi yine aynı şekilde doğruluğu daha yüksek ve gerçek hayattaki uygulamalara daha yakın bir sonuç elde etmeye yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Alhwayzee, M., Jawad Kadhim, H., & Rashid, F.** (2021). Aspen Plus Simulation for Performance Improving of Al-Khayrat Power Plant Using Heat Recovery Steam Generation (HRSG) System. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44(4), 400-411.
- Baldi, F., Johnson, H., Gabriell, C., & Andersson, K.** (2015). Energy and exergy analysis of ship energy systems – the case study of a chemical tanker. *International Journal of Thermodynamics*, 18(2), 82–93. <https://doi.org/10.5541/ijot.5000070299>
- Barma, M.C., Saidur, R., Rahman, S.M.A., Allouhi, A., Akash, B.A., & Sadiq, M. S.** (2017). A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 970-983. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.187>
- Barsi, D., Luzzi, M., Satta, F., & Zunino, P.** (2021). On the Possible Introduction of Mini Gas Turbine Cycles Onboard Ships for Heat and Power Generation. *Energies*, 14(3), 568. <https://doi.org/10.3390/en14030568>
- Beretta, D., Neophytou, N., Hodges, J. M., Kanatzidis, M. G., Narducci, D., Gonzalez, M. M., Beekman, M., Balke, B., Cerretti, G., Tremel, W., Zevalkink, A., Hofmann, A. I., Müller, C., Dörfling, B., Campoy-Quiles, M., & Caironi, M.** (2019). Thermoelectrics: From history, a window to the future. *Materials Science & Engineering. R, Reports*, 138, 100501. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.09.001>
- Bobur, F., & Ergin, S.** (2023). Thermal and Economical Analysis of Thermoelectric Generator for the Waste Heat Recovery from a Marine Diesel Engine Aboard a Ferry. *4th International Naval Architecture and Maritime Symposium (INT-NAM 2023)*, Istanbul, Türkiye, 2023, 429-443.
- Bode, C., Friedrichs, J., Somdalen, R., Köhler, J., Büchter, K., Falter, C., Kling, U., Ziolkowski, P., Zabrocki, K., Müller, E., & Kožulović, D.** (2017). Potential of future thermoelectric energy recuperation for aviation. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(10). <https://doi.org/10.1115/1.4036527>
- Champier, D.** (2017). Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 140, 167-181. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>
- Chen, J., Li, K., Liu, C., Li, M., Lv, Y., Jia, L., & Jiang, S.** (2017). Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures. *Energies*, 10(9), 1329. <https://doi.org/10.3390/en10091329>

- Chen, M., Sasaki, Y., & Suzuki, R. O.** (2011). Computational simulation of thermoelectric generators in marine power plants. *Materials Transactions*, 52(8), 1549–1552. <https://doi.org/10.2320/matertrans.e-m2011813>
- Cheng, K., Li, J., Yu, J., Fu, C., Qin, J., & Jing, W.** (2023). Novel thermoelectric generator enhanced supercritical carbon dioxide closed-Brayton-cycle power generation systems: Performance comparison and configuration optimization. *Energy*, 284, 129368. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129368>
- Chintala, V., Kumar, S., & Pandey, J. K.** (2018). A technical review on waste heat recovery from compression ignition engines using organic Rankine cycle. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 81, 493–509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.016>
- Demir, M. E., & Dincer, I.** (2017). Performance assessment of a thermoelectric generator applied to exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 120, 694–707. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.052>
- Doraghi, Q., Khordehgah, N., Żabnieńska-Góra, A., Ahmad, L., Norman, L., Ahmad, D., & Jouhara, H.** (2021). Investigation and computational modelling of variable TEG leg geometries. *ChemEngineering*, 5(3), 45. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030045>
- Durmaz, M.** (2015). Bir Feribottan Yayılan Egzoz Emisyonlarının Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi [Master's thesis, Istanbul Technical University].
- Eddine, A. N., Chalet, D., Faure, X., Aixala, L., & Chessé, P.** (2018). Optimization and characterization of a thermoelectric generator prototype for marine engine application. *Energy*, 143, 682–695. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.018>
- EMSA.** (n.d.a). The 2022 World Merchant Fleet Statistics from Equasis. Retrieved March 15, 2024, from <https://www.equasis.org/Fichiers/Statistique/MOA/Documents%20avallables%20on%20statistics%20of%20Equasis/Equasis%20Statistics%20-%20The%20world%20fleet%202022.pdf>
- EMSA.** (n.d.b). The world merchant fleet in 2016 Statistics from Equasis. Retrieved March 15, 2024, from <https://www.equasis.org/Fichiers/Statistique/MOA/Documents%20avallables%20on%20statistics%20of%20Equasis/Equasis%20Statistics%20-%20The%20world%20fleet%202016.pdf>
- Faisal, A., & Nugroho, T. F.** (2016). Technical analysis of organic rankine cycle system using Low-Temperature source to generate electricity in ship. *Jurnal Teknik/Jurnal Teknik ITS*, 5(2), <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.19309>
- Fan, Y. V., Perry, S., Klemeš, J. J., & Lee, C. T.** (2018). A review on air emissions assessment: Transportation. *Journal of Cleaner Production*, 194, 673–684. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.151>
- Fatsis, A.** (2022). Gas turbine performance enhancement for naval ship propulsion using wave rotors. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 21(5), 297–309. <https://doi.org/10.1080/20464177.2021.1933697>

- FRED.** (n.d.). Prices. Retrieved February 5, 2024, from <https://fred.stlouisfed.org/series/GASDESLSW>
- Georgopoulou, C. A., Dimopoulos, G. G., & Kakalis, N. M.** (2016). A modular dynamic mathematical model of thermoelectric elements for marine applications. *Energy*, 94, 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.130>
- He, J., Li, K., Jia, L., Zhu, Y., Zhang, H., & Linghu, J.** (2024). Advances in the applications of thermoelectric generators. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121813. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121813>
- He, W., Zhang, G., Zhang, X., Ji, J., Li, G., & Zhao, X.** (2015). Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, 143, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.075>
- Hossain, M. M., Hossain, M. S., Ahmed, N. A., & Ehsan, M. M.** (2021). Numerical Investigation of a modified Kalina cycle system for high-temperature application and genetic algorithm based optimization of the multi-phase expander's inlet condition. *Energy and AI*, 6, 100117. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100117>
- Huang, K., Yan, Y., Li, B., Li, Y., Li, K., & Li, J.** (2018). A novel design of thermoelectric generator for automotive waste heat recovery. *Automotive Innovation*, 1(1), 54–61. <https://doi.org/10.1007/s42154-018-0006-z>
- Ja'fari, M., Khan, M. I., Al-Ghamdi, S. G., Jaworski, A. J., & Asfand, F.** (2023). Waste heat recovery in iron and steel industry using organic Rankine cycles. *Chemical Engineering Journal*, 477, 146925. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146925>
- Jayamaha, L.** (2006). *Energy-Efficient Building Systems: green strategies for operation and maintenance*. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA85219983>
- Ji, D., Tseng, K. J., Wei, Z., Zheng, Y., & Romagnoli, A.** (2016). A Simulation Study on a Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery from a Marine Engine. *Journal of Electronic Materials*, 46(5), 2908–2914. <https://doi.org/10.1007/s11664-016-5038-8>
- Ji, D., Wei, Z., Mazzoni, S., Mengarelli, M., Rajoo, S., Zhao, J., Pou, J., & Romagnoli, A.** (2018). Thermoelectric generation for waste heat recovery: Application of a system level design optimization approach via Taguchi method. *Energy Conversion and Management*, 172, 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.016>
- Jiang, Y., Wang, Z., Ma, Y., Ji, Y., Cai, W., & Han, F.** (2022). Supercritical CO₂ power cycle and ejector refrigeration cycle for marine dual fuel engine efficiency enhancement by utilizing exhaust gas and charge air heat. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1404. <https://doi.org/10.3390/jmse10101404>
- Jiménez-García, J. C., Ruiz, A., Pacheco-Reyes, A., & Rivera, W.** (2023). A comprehensive review of organic rankine cycles. *Processes*, 11(7), 1982. <https://doi.org/10.3390/pr11071982>
- Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L., Axcell, B., Wrobel, L., & Dai, S.** (2021). Thermoelectric

- generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100063>
- Kalender, S.S.** (2017). Ultra Düşük Sülfürlü Dizel Yakıtın Gemilerden Salınan Partikül Madde ve Gaz Emisyonlarına Olan Etkilerinin Deneyisel Olarak İncelenmesi [Doctoral dissertation, Istanbul Technical University].
- Kim, T. Y., Negash, A. A., & Cho, G.** (2016). Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*, 124, 280–286. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.013>
- Kishore, R. A., & Priya, S.** (2018). A Review on Low-Grade Thermal Energy Harvesting: Materials, Methods and Devices. *Materials*, 11(8), 1433. <https://doi.org/10.3390/ma11081433>
- Konstantinou, G., Kyratsi, T., & Louca, L. S.** (2022). Design of a Thermoelectric Device for Power Generation through Waste Heat Recovery from Marine Internal Combustion Engines. *Energies*, 15(11), 4075. <https://doi.org/10.3390/en15114075>
- Konur, O., Yuksel, O., Korkmaz, S. A., Colpan, C. O., Saatçioğlu, Ö. Y., & Koseoglu, B.** (2022). Operation-Dependent exergetic sustainability assessment and environmental analysis on a large tanker ship utilizing organic rankine cycle system. *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4089570>
- Kristiansen, N. R., Snyder, G. J., Nielsen, H. K., & Rosendahl, L.** (2012). Waste Heat Recovery from a Marine Waste Incinerator Using a Thermoelectric Generator. *Journal of Electronic Materials*, 41(6), 1024–1029. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-2009-6>
- Lan, T., Su, K., Chang, C., Chen, C., Chen, C., Ou, M., Wu, D., Wu, P., Su, C., Wu, M., & Chen, Y.** (2020). Enhancing the figure of merit in thermoelectric materials by adding silicate aerogel. *Materials Today Physics*, 13, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100215>
- Li, H., Liu, C., Xu, Z., Liu, J., Du, Z., Li, M., Dong, J., Han, Z., Xu, M., & Pan, X.** (2022). Performance comparison of thermal power generation-organic Rankine cycle combined cycle system for ships waste heat utilization under different bottom cycle ratios. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42(2). <https://doi.org/10.1002/ep.13993>
- Liu, C., Ye, W., Li, H., Liu, J., Zhao, C., Mao, Z., & Pan, X.** (2020). Experimental study on cascade utilization of ship's waste heat based on TEG-ORC combined cycle. *International Journal of Energy Research*, 45(3), 4184–4196. <https://doi.org/10.1002/er.6083>
- Liu, X., Zhao, C., Guo, H., & Wang, Z.** (2022). Primary Factors Affecting the Efficiency of Thermoelectric Power Generation Sheets for Waste-Heat Recovery from the Ship's Exhaust Gas. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1281. <https://doi.org/10.3390/jmse10091281>
- Luo, D., Sun, Z., & Wang, R.** (2022). Performance investigation of a thermoelectric generator system applied in automobile exhaust waste heat recovery. *Energy*, 238, 121816. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121816>

- Lv, S., Qian, Z., Hu, D., Li, X., & He, W.** (2020). A comprehensive review of strategies and approaches for enhancing the performance of thermoelectric module. *Energies*, 13(12), 3142. <https://doi.org/10.3390/en13123142>
- Ma, Z., Wei, J., Song, P., Zhang, M., Yang, L., Ma, J., Liu, W., Yang, F., & Wang, X.** (2021). Review of experimental approaches for improving zT of thermoelectric materials. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 121, 105303. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105303>
- Musah, J., Ilyas, A., Novitskii, A., Serhiienko, I., Egbo, K. O., Saianand, G., Khovaylo, V., Kwofie, S., Yu, K. M., & Roy, V. A.** (2021). Effective decoupling of seebeck coefficient and the electrical conductivity through isovalent substitution of erbium in bismuth selenide thermoelectric material. *Journal of Alloys and Compounds*, 857, 157559. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157559>
- Nararom, M., & Bamroongkhan, P.** (2018). A Study on Thermoelectric Power Generator by Solar Energy Using Fresnel Lens. *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Krabi, Thailand, 2018, 1-4. doi: 10.1109/IEECON.2018.8712218
- Omar, S. F. N. S., Burham, N., Aziz, A. A., & Muhamad, M.** (2022). Electrical performance of single thermocouple with different types of materials using multiphysics simulations. *2022 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022. <https://doi.org/10.1109/icse56004.2022.9862954>
- Orr, B., & Akbarzadeh, A.** (2017). Prospects of waste heat recovery and power generation using thermoelectric generators. *Energy Procedia*, 110, 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.135>
- Pacheco-Reyes, A., & Rivera, W.** (2021). Thermodynamic cycles for the simultaneous production of power and cooling: A comprehensive review. *International Journal of Energy Research*, 45(9), 12500–12535. <https://doi.org/10.1002/er.6621>
- Pan, P., Yuan, C., Sun, Y., Yan, X., Lu, M., & Bucknall, R.** (2020). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of S-CO₂ Brayton cycle waste heat recovery system for an ocean-going 9000 TEU container ship. *Energy Conversion and Management*, 221, 113077. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113077>
- Patil, D. S., Arakerimath, R. R., & Walke, P. V.** (2018). Thermoelectric materials and heat exchangers for power generation – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.003>
- Saha, M., Tregenza, O., Twelftree, J., & Hulston, C.** (2023). A review of thermoelectric generators for waste heat recovery in marine applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 59, 103394. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103394>
- Sea temperature.** (n.d.). Eskihsar. Retrieved May 2, 2023, from <https://tr.seatemperature.net/current/turkey/eskihsar-kocaeli-turkey>

- Sugiarta, N., & Negara, P. S.** (2018). Technical feasibility evaluation on the use of a Peltier thermoelectric module to recover automobile exhaust heat. *Journal of Physics. Conference Series*, 953, 012090. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/953/1/012090>
- Tegmart.** (n.d.a). TEG Modules. Retrieved May 2, 2023, from <https://www.tegmart.com/thermoelectric-modules/19w-teg-module>
- Tegmart.** (n.d.b). TEG Modules. Retrieved May 2, 2023, from <https://www.tegmart.com/thermoelectric-modules/22w-teg-module>
- UNCTAD.** (n.d.). Review of maritime transport 2023. Retrieved March 1, 2024, from https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023_en.pdf
- Uusitalo, A., Honkatukia, J., Backman, J., & Nyyssönen, S.** (2015). Experimental study on charge air heat utilization of large-scale reciprocating engines by means of Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 89, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.009>
- Uyanık, T., Ejder, E., Arslanoğlu, Y., Yalman, Y., Terriche, Y., Su, C., & Guerrero, J. M.** (2022). Thermoelectric generators as an alternative energy source in shipboard microgrids. *Energies*, 15(12), 4248. <https://doi.org/10.3390/en15124248>
- Wahile, G. S., Malwe, P. D., & Kolhe, A. V.** (2020). Waste heat recovery from exhaust gas of an engine by using a phase change material. *Materials Today: Proceedings*, 28, 2101–2107. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.247>
- Wang, J., Yan, Z., Zhou, E., & Dai, Y.** (2013). Parametric analysis and optimization of a Kalina cycle driven by solar energy. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.002>
- Yang, X., & Cai, Z.** (2021). Thermodynamic Performance Analysis Of Supercritical CO₂ Brayton Cycle. *Thermal Science*, 25(5), 3933-3943. doi:10.2298/TSCI200314294Y
- Yin, F., & Rao, A. G.** (2020). A review of gas turbine engine with inter-stage turbine burner. *Progress in Aerospace Sciences*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100695>
- Yu, G., Shu, G., Tian, H., Wei, H., & Liang, X.** (2016). Multi-approach evaluations of a cascade-Organic Rankine Cycle (C-ORC) system driven by diesel engine waste heat: Part B-techno-economic evaluations. *Energy Conversion and Management*, 108, 596–608. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.085>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Furkan BÖBÜR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Bölümü

ÖDÜLLER:

- 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Bölümü, Üçüncülük Mezuniyet Derecesi

İŞ DENEYİMİ:

- İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Araştırma Görevlisi, 2021-
- Kumport Limanı, Stajyer, 2021
- Beşiktaş Tersanesi, Stajyer, 2020

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Bobur, F., & Ergin, S.** (2023). Thermal and Economical Analysis of Thermoelectric Generator for the Waste Heat Recovery from a Marine Diesel Engine Aboard a Ferry. *4th International Naval Architecture and Maritime Symposium (INT-NAM 2023)*, Istanbul, Türkiye, 2023, 429-443.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Bobur, F., & Ergin, S.** (2022). Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies - *Proceedings of the 19th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, IMAM 2022*, Istanbul, Turkey, 2022, 429-435.