

OTOMOBİL EGZOZ SİSTEMLERİNDE TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLÜ (TEJ) ATIK
ISI GERİ KAZANIM SİSTEMİNİN İRDELENMESİ

Uğur DALAR

Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Akif KUNT

Ocak 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Uğur DALAR'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı OTOMOBİL EGZOZ SİSTEMLERİNDE TERMOELEKTRİK JENERATÖRLÜ (TEJ) ATIK ISI GERİ KAZANIM SİSTEMİNİN İRDELENMESİ başlıklı bu çalışma, jürimizce Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

14/01/2019

Prof. Dr. Önder UYSAL
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Bölüm Başkanı, Makine Mühendisliği Bölümü

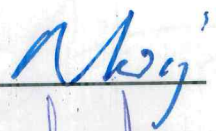
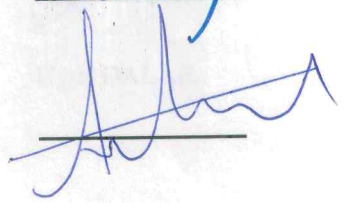
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Akif KUNT
**Danışman, Tavşanlı MYO Motorlu Araçlar
ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü**

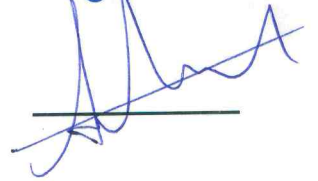
Sınav Komitesi Üyeleri

Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Doç. Dr. Özer CAN
Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Pamukkale Üniversitesi

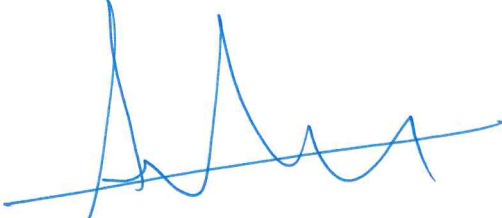
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Akif KUNT
Tavşanlı MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma
Teknolojileri Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan intihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 13 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.



Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Akif KUNT



Uğur DALAR

OTOMOBİL EGZOZ SİSTEMLERİNDE TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLÜ (TEJ) ATIK ISI GERİ KAZANIM SİSTEMİNİN İRDELENMESİ

Uğur DALAR

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2019

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Akif KUNT

ÖZET

Bu yapılan çalışmada yüksüz halde (herhangi bir güç aktarımı olmadan) çalıştırılan dizel bir motorun farklı motor devirlerinde (2000 d/d, 2500 d/d, 3000 d/d, 3500 d/d) motor tarafından egzozdan atık ısı olarak atılan yanmış gazların elektrik enerjisi üretme potansiyeli araştırılmıştır. Elde edilebilecek olan enerjinin çevre için faydalı ve ekstra güç sağlamasından dolayı öne mli bir potansiyeli olduğu anlaşılmaktadır. Burada gerekli deneyler yapılarak elde edilen sonuçlar ile matematiksel hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, elde edilen enerjinin gerilim ve akıma bağlı olarak araç bataryasını şarj edebilme potansiyeli araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilere göre 3500 d/d’ da 4 adet termoelektrik jeneratör kullanılarak maksimum 3,56 V gerilim ve 0,39 A akım elde edilmiş olup 12V 40Ah’ lik bir bataryayı şarj etmek için 72 adet termoelektrik modül kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Deneysel sonuçlar ile matematiksel sonuçlar kıyaslandığında çıkış voltajı-yük direnci grafiklerinde %5 akım-yük direnci grafiklerinde %7,69 bağıl hata elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık ısı, egzoz sistemi, geri kazanım, motor devri, performans analizi

INVESTIGATION OF THERMOELECTRIC GENERATOR (TEG) HEAT RECOVERY SYSTEM IN AUTOMOBILE EXHAUST SYSTEMS

Uğur DALAR

Mechanical Engineering, M.S. Thesis, 2019

Thesis Supervisor: Asist. Prof. Dr. Mehmet Akif KUNT

SUMMARY

In this study, a diesel engine operated with no load (without any power transmission) at different engine speeds (2000 rpm, 2500 rpm, 3000 rpm, 3500 rpm) by the engine exhaust from the exhaust waste as waste gas energy production potential has been investigated. It is understood that the energy that can be obtained has an important potential for the environment and because it provides extra power. The results obtained from the experiments and the results obtained from the mathematical calculations were compared and the potential of the energy obtained to charge the vehicle battery depending on the voltage and current was investigated. According to the results of the experiments, a maximum of 3,56 V voltage and 0,39 A current were obtained by using 4 thermoelectric generators at 3500 rpm and 72 thermoelectric modules were needed to charge a 12V 40Ah battery. When the experimental results and mathematical results were compared, 5% of output voltage-load resistance graphs and 7,69% relative error were obtained in current-load resistance graphs.

Keywords: Engine speed, exhaust system, recycling, performance analysis, waste heat

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	V
SUMMARY	Vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	İx
ÇİZELGELER DİZİNİ	Xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	Xii
 1. GİRİŞ	 1
1.1. Dizel Motorlarda Yanma ve Egzoz Sistemleri.....	3
1.2. Isı Etkisi ile Elektrik Enerjisinin Elde Edilmesi.....	7
1.1.1. Seebeck etkisi.....	9
1.1.2. Thomson etkisi	16
1.2. Termoelement	17
1.3. Termoelektrik Modül	18
1.4. Termoelektrik Malzemelerin Yapısı ve Özellikleri	22
1.5. Termoelektrik Modüllerin Çalışma Performansına Etki Eden Faktörler	24
1.5.1. Termoelektrik malzemelerin kalite faktörü (FOM)	24
1.5.2. Termoelektrik modüllere ΔT sıcaklık farkının etkisi	25
1.5.3. Termoelektrik modüllerin ısı aktarım gücü.....	25
1.5.4. Termoelektrik modüllerde alternatif akım	25
1.6. FOM Değeri Yüksek Olan Termoelektrik Malzemeler	26
1.6.1. Performans avantajları	26
1.6.2. Geliştirilme potansiyeli	26
1.6.3. Düşük maliyetli malzeme.....	27
1.6.4. Yüksek sıcaklığa uygun termoelektrik modüllerin geliştirilmesi.....	29
1.7. Termoelektrik Jeneratörler (TEJ) ve Kullanım Alanları	30
 2. LİTERATÜR TARAMASI.....	 34
 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	 40
3.1. Materyal	40
3.1.1. Termoelektrik modül.....	40
3.2. Yöntem	44

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2.1. Matematiksel model	44
3.2.1. Deney düzeneği	46
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	49
4.1. Deneysel Bulgular	49
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	67
KAYNAKLAR DİZİNİ	69



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Motorlarda üretilen enerjinin dağılımı	3
1.2. Silindir içi sıcaklık dağılımları.....	5
1.3. Benzinli (üst) ve Dizel (alt) motorlar için egzoz gazları sıcaklık dağılımları	6
1.4. Araç egzoz sistemi genel görünüşü.....	7
1.5. Seebeck etkisi.....	9
1.6. Seebeck voltajının ölçümü	11
1.7. TEM iç yapısı.....	14
1.8. TEM çalışma prensibi	16
1.9. Thomson olayı.....	17
1.10. Termoelement	17
1.11. Termoelektrik modülün yapısı	20
1.12. P tipi ve N tipi yarıiletkenin çalışma şeması	21
1.13. Tipik bir TEM'in şematik diyagramı	30
1.14. Brülör şematiği.....	31
1.15. Basit TEJ sisteminin şematik resmi	32
3.1. Termoelektrik modülün yapısı	41
3.2. P tipi eleman çalışma şeması.....	42
3.3. N tipi elemanın çalışma şeması.....	42
3.4. N tipi elemanın seri bağlanması.....	43
3.5. P-N çifti ile ısı pompalanması.....	43
3.6. Egzoza bağlanmış deney düzeneği.....	46
3.7. Deney sisteminin genel görünüşü	48
4.1. T_{sc} sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve sıcaklık farkı değişimi (2000 d/d).....	49
4.2. T_{sc} sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi (2000 d/d).....	50
4.3. T_{sc} sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi (2000 d/d).....	50
4.4. T_{sc} sıcaklığına bağlı iç direnç değişimi (2000 d/d).....	51
4.5. T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi (2000 d/d).....	52
4.6. T_{sc} sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve sıcaklık farkı değişimi (2500 d/d).....	52
4.7. T_{sc} sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi (2500 d/d).....	53
4.8. T_{sc} sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi (2500 d/d).....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9. T_{sc} sıcaklığına bağlı iç direnç değişimi (2500 d/d).....	54
4.10. T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi (2500 d/d).....	55
4.11. T_{sc} sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve sıcaklık farkı değişimi (3000 d/d).....	56
4.12. T_{sc} sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi (3000 d/d).....	56
4.13. T_{sc} sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi (3000 d/d).....	57
4.14. T_{sc} sıcaklığına bağlı iç direnç değişimi (3000 d/d).....	58
4.15. T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi (2500 d/d)	59
4.16. T_{sc} sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve sıcaklık farkı değişimi (3500 d/d).....	59
4.17. T_{sc} sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi (3500 d/d).....	60
4.18. T_{sc} sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi (3500 d/d).....	61
4.19. T_{sc} sıcaklığına bağlı iç direnç değişimi (3500 d/d).....	61
4.20. T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi (3500 d/d).....	62
4.21. T_{sc} sıcaklığına bağlı farklı motor hızlarına göre güç değişimi	63
4.22. T_{sc} sıcaklığına bağlı farklı motor hızlarına göre iç direnç değişimi	63
4.23. T_{sc} sıcaklığına bağlı yüklü voltaj değişiminin karşılaştırması (2000 d/d).....	64
4.24. T_{sc} sıcaklığına bağlı yüklü voltaj değişiminin karşılaştırması (2500 d/d).....	65
4.25. T_{sc} sıcaklığına bağlı yüklü voltaj değişiminin karşılaştırması (3000 d/d).....	65
4.26. T_{sc} sıcaklığına bağlı yüklü voltaj değişiminin karşılaştırması (3500 d/d).....	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Bazı maddelerin Seebeck katsayıları (Efunda, 2010).	12
1.2. BiTe yarı iletkenlerde farklı sıcaklıklara göre değişen Seebeck katsayıları.	13
1.3. Farklı termoelektrik malzemeler hakkında veriler	28
1.4. Enerji üretim maliyetlerinin karşılaştırılması (LeBlanc vd., 2014).	29
3.1. Termoelektrik jeneratörün teknik özellikleri.....	46
3.2. Deney motorunun teknik özellikleri.....	47
5.1. Araçta bulunan aydınlatma elemanları güç değerleri (Megep, 2010).	68
5.2. Araç batarya şarjı için TEJ ve alternatör karşılaştırması.....	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
DKP	Demir profil modeli
L	Termoelement uzunluğu (m)
L_c	Katman kalınlığı (m)
N	Modüldeki termoelement sayısı
P	Güç (W)
Q_p	Isı miktarı (W)
r	Isıl – Temas parametresi
R	Rezistans (K/W)
T	Sıcaklık (K)
T_{sg}	Soğuk yüzey sıcaklığı (K)
TEJ	Thermoelectric jeneratör
T_{sc}	Sıcak yüzey sıcaklığı (K)
V	Voltaj (V)
V_c	Çıkış voltajı (V)
α	Seebeck katsayısı (V/K)
ΔT	Sıcaklık farkı (K)
p	Elektriksel iletkenlik (Ωm)
λ	İletkenlik katsayısı (W/mK)
λ_m	Isıl iletkenlik (W/mK)

1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarının fosil yakıt tabanlı olması ve çevreye verdiği olumsuz etkilerden ötürü insanlık yeni nesil enerji teknolojileri geliştirmeyi kendine görev edinmiştir. Günümüz teknolojisinde yoğun bir şekilde kullanımda olan fosil tabanlı yakıtlar genel olarak kömür, petrol, doğal gaz ve orman mamülleridir. Bu ve bunlara benzer yakıtlardan ortaya çıkan enerji kimyasal reaksiyonlar veya elektronların bir atom ya da molekülden ayrılmasını sağlayan kimyasal tepkimeler (oksidasyon) gibi birtakım sonuçlar bu duruma neden olmaktadır. Kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan enerji, kimi zaman değiştirilmeden kullanıldığı gibi, kimi zamanlarda başka bir enerji türüne çevrilerek kullanılmaktadır. Buna güzel bir örnek olarak kimyasal reaksiyonlar neticesinde elde edilen elektriksel enerjiyi verebiliriz. Kimyasal yollardan elektrik enerjisi elde edilmesine örnek olarak bataryalar, kuru tip piller, araç aküleri verilebilir. Son yıllarda en çok ilgiyi yakıt bataryaları çekmektedir. Bunun nedeni ise araçları daha kullanılabilir hale getirmektir. Ülkelerin enerji ihtiyacının karşılanmasının yanı sıra çevre bilincinin korunması yani çevre bütünlüğünün korunması, verimliliğin artırılması yani aynı miktar yakıttan daha fazla enerji elde edilmesi önemlidir. Bu sayede daha az zararlı faktörler ortaya çıkacak daha az enerji harcanacaktır. Kaynak çeşitliliğinin ve sürekliliğinin sağlanması da son derece önemlidir. Enerji üretim yöntemlerinde düşünülmesi gereken temel unsur, teknolojik olarak ve sosyal olarak toplumsal gelişmeyi destekleyecek şekilde ülkelerin enerji ihtiyacını karşılayan, güvenli, kalitesi yüksek, ekonomik ve temiz enerji türlerine yönelmektir.

Küresel ısınma, başlıca atmosfere salınan gazların neden olduğu düşünülen sera etkisinin sonucunda, dünya üzerinde yıl boyunca kara, deniz ve havada ölçülen ortalama sıcaklıklarda görülen artışa verilen isimdir. Sera etkisi doğal bir olaydır ancak birtakım zararlı etkisi olan gazların insanlar tarafından atmosfere atılması sonucunda doğal denge bozularak küresel ısının artmasına neden olunmuştur. Dünya'daki sera etkisine sebep olan gazlar sayılacak olursa %36-70 Su buharı, %9-26 CO_2 , %4-9 CH_4 (Metan), %3-7 ile O_3 (Ozon) 'dur. Yapılarında karbon ve hidrojen elementlerini barındıran bu organik bazlı yakıtların, oluşmaları çok uzun zaman almakta fakat kısa sürede tüketilmektedirler. Dünyada belirli bölgelerde toplanmış olan bu fosil yakıtların günümüz koşullarında %50'sinin çıkarılması mümkün değildir; diğer %50'lik kısmının ise çıkarılması ve kullanılması teknik olarak çok pahalı görülmektedir. Bu yüzden organik esaslı yakıtlar yenilenemeyen ve sınırlı yakıtlar sınıfına girmektedir (Temizer, İ., 2010).

Petrol ve ondan elde edilen enerji kaynaklarının gün geçtikçe azalması ve üretiminin giderek pahalılaşması nedeniyle dünyanın birçok yerinde fosil esaslı enerji kaynaklarından farklı

enerji kaynaklarına yönelme görülmektedir. Fosil yakıtlardan farklı olarak yeni enerji kaynakları araştırılırken, bunların temiz enerji kaynağı olması yani çevreye duyarlı olması gerekmektedir. Motor yakıtlarının sınırlı olan petrol kaynaklarına dayanması gelecekte petrol kaynaklarına alternatif olacak yeni kaynakların bulunması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Bilindiği gibi içten yanmalı motorlarda alternatif enerji kaynağı olarak gaz veya sıvı yakıtlar kullanılmaktadır. Gaz yakıt olarak sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ve doğalgaz, sıvı yakıt olarak etanol, metanol, çeşitli bitkisel ve hayvansal yağlardan elde edilen biyodizel ile ilgili birçok araştırma yapılmaktadır. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak son yıllarda içten yanmalı motorlarda yakıt alanındaki gelişmeler hızla devam etmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar sonucunda, motorlarda pratik olarak en yüksek verimlere ulaşıldığı görülmüştür. Ancak, bu ilerlemeler motorun gelişimi için tüm olanaklar bitmiştir anlamına gelmemektedir. Daha iyi bir karışımın yapılması, daha iyi bir yanma ile çevrim parametrelerinin yükseltilmesi olasıdır. Bunun sonucunda daha düşük yakıt tüketimi ve daha yüksek güç elde edilebilir. Ayrıca yanmış gazların enerjilerinden istifade ederek ekonomikliği arttırmak, bu çalışmalarla beraber irdelenmesi gereken alanlar olmalıdır. Son zamanlarda yapılan çalışmaların büyük bir kısmının bu alana doğru yol aldığını gözlemlemek mümkündür. İçten yanmalı motorlarda yanma sonucunda oluşan ve kullanılmayan atık enerjinin geri kazanımı yeni teknolojileri de beraberinde getirmektedir. Uygulanacak bu teknolojinin motor sistemleri ile beraber uyumlu çalışması gerekmektedir.

İçten yanmalı motorlarda fosil yakıtlarla havanın karışımından elde edilen enerjinin ancak belli bir miktarı işe dönüştürülebilmektedir. Şekil 1.1 deki motor enerji dağılımı incelendiğinde otomobil motorlarında faydalı enerji %30-%35 arasındadır. Dolayısıyla enerjinin geri kalan %65-%70 kadarı faydası olmadan atılmaktadır (Balcı C., 2011).



Şekil 1.1. Motorlarda üretilen enerjinin dağılımı.

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

1.1. Dizel Motorlarda Yanma ve Egzoz Sistemleri

Yanma; yakıtın oksijenle birleşerek su ve karbondioksit meydana getirmesidir. Bu tepkime sırasında ısı ve enerjide açığa çıkar. İçten yanmalı motorlar kimyasal reaksiyonla açığa çıkan enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürmektedir. Dizel motorlarında yanma; sıkıştırma zamanı sonuna doğru silindire emme zamanında alınan havanın sıcaklığı yaklaşık olarak 600–900 C° yükseltilmesiyle, sıcaklığı ve basıncı yükselen havanın üzerine enjektör tarafından yakıtın basınçlı olarak püskürtülmesi sonucu gerçekleşir. Yanma olayı

1-Tutuşma gecikmesi

2-Kontrolsüz yanma (Hızlı yanma)

3- Kontrollü yanma

4-Gecikmiş yanma olmak üzere dört aşamada gerçekleşir.

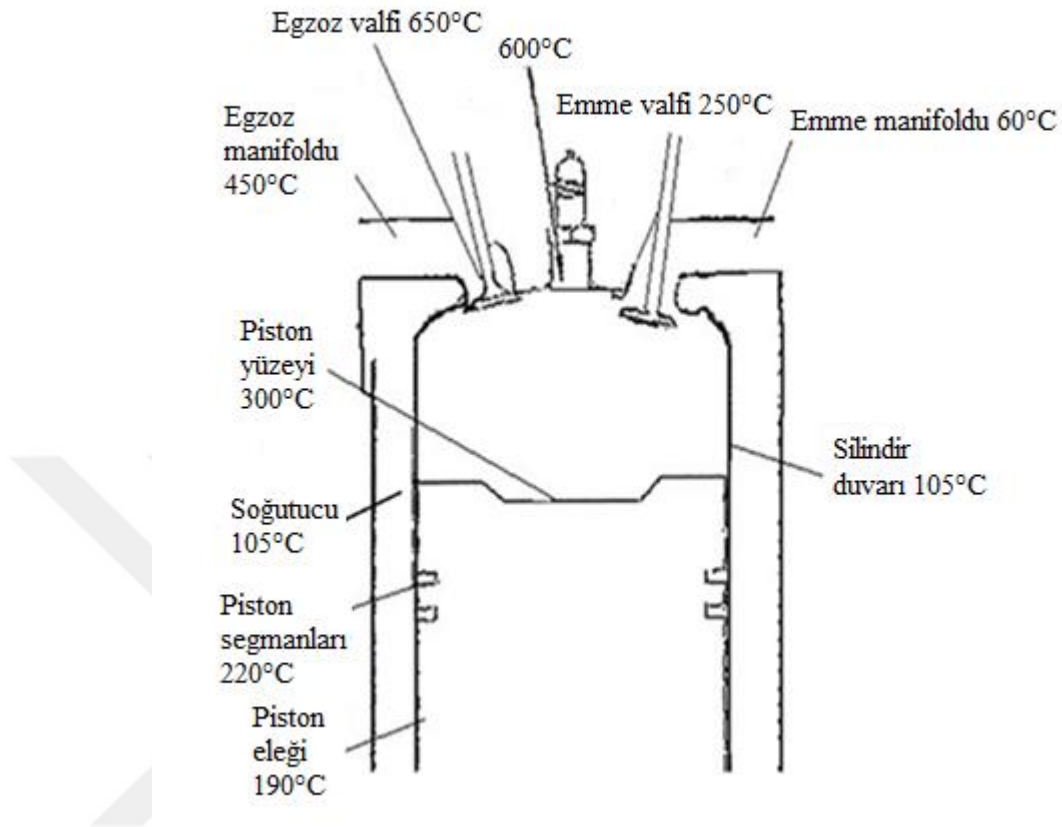
Sıkıştırma sonunda silindire püskürtülen yakıt hemen tutuşmaz. Tutuşabilmesi için oksijenle karışması ve sıcaklığının yükselmesi gerekir. Bu nedenle enjektörün yakıtı silindire püskürtmesinden, ilk alev çekirdeğinin meydana geldiği zamana kadar geçen süreye tutuşma gecikmesi denir.

Tutuşma gecikmesi süresi içinde silindire püskürtülen yakıt ısınır, oksijenle karışır ve buharlaşır. İlk alev çekirdeği meydana geldiği anda yakıtın hepsi birden yanmaya katılır ve hızlı bir yanma oluşur. Hızlı yanma basıncın aniden yükselmesine neden olur ve motor parçaları arasındaki boşlukların birden alınması sonucunda motor vuruntulu ve sert çalışır bu safhaya hızlı yanma denir.

KontROLSÜZ yanmanın sonunda silindir içindeki basınç ve sıcaklık enjektörden püskürtülen yakıtı doğrudan yakabilecek bir değere ulaşır. Bu nedenle püskürmeye devam eden yakıt hiçbir gecikme olmadan yanar. Basınç en yüksek noktaya erişinceye kadar yükselir. Geri kalan püskürme ve yanma sırasında basınç sabit kalır bu duruma da kontrollü yanma denir.

Yakıtın silindire püskürmesi bitmiş ve piston AÖN'ye inmektedir. Daha önce püskürtülen ve yanma fırsatı bulamamış yakıt genişleme süresince oksijen buldukça yanar. Bu yanmaya gecikmiş yanma denir

Şekil 1.3'te içten yanmalı bir motorda meydana gelen sıcaklık dağılımları belirtilmiştir. Şekil incelendiğinde sıcaklığın en fazla olduğu yerler enjektör ya da buji, egzoz supabı, portu ve piston yüzeyinde oluşmaktadır. Yüksek yanma sıcaklıklarına maruz kalan bölgeler sadece bu kısımlar değildir. Egzoz gazlarının akış noktalarında yer alan supap ve port bölgelerinin soğutulması zor olan kısımlarıdır (Deniz, O., 2008).



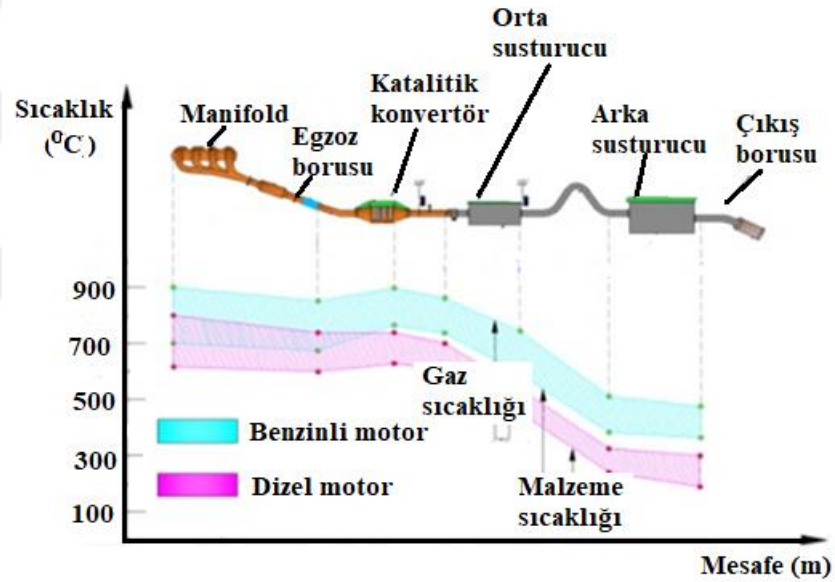
Şekil 1.2. Silindir içi sıcaklık dağılımları.

Yanma neticesinde oluşan egzoz gazlarının dışarıya atılması egzoz sistemi yardımıyla gerçekleşir. Motorlarda egzoz sistemi manifold, ön egzoz borusu, ara susturucu, merkez egzoz borusu, katalitik konvertör, kuyruk egzoz borusu ve ana susturucu gibi parçalardan oluşmaktadır. Bu sistem atık ısının tahliyesini, kirleticilerin azaltılmasını ve egzoz gazlarının gürültüsünün azaltılmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda bu çalışmamızda gerçekleştirilen TEJ sisteminin egzoz sistemi üzerine kurulması ile atık egzoz enerjisinin geri kazanımı da sağlanmış olacaktır. İçten yanmalı motorlar için tasarlanan TEJ sisteminin üretebileceği elektrik enerji kapasitesi egzoz gazlarının sıcaklığına, debisine ve özgül ısısına yani egzoz gazının ısıl kapasitesine bağlı olduğu için yanma odası içindeki sıcaklık değerleri büyük önem taşımaktadır (Temizer, İ., 2014).

Dizel ve benzinli motorların çalışmaları sırasında egzoz gazı sıcaklık dağılımları Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Motorun yük ve çalışma koşullarına göre değişkenlik gösterebilen egzoz gazının sıcaklık değerlerinin iyi bilinmesi gerekir. Bununla ilgili olarak tasarlanan TEJ

sistemleri için en uygun çalışılması gereken sıcaklık aralığı belirlenerek jeneratörün taşıta bağlanacağı bölümün belirlenmesi gerekmektedir.

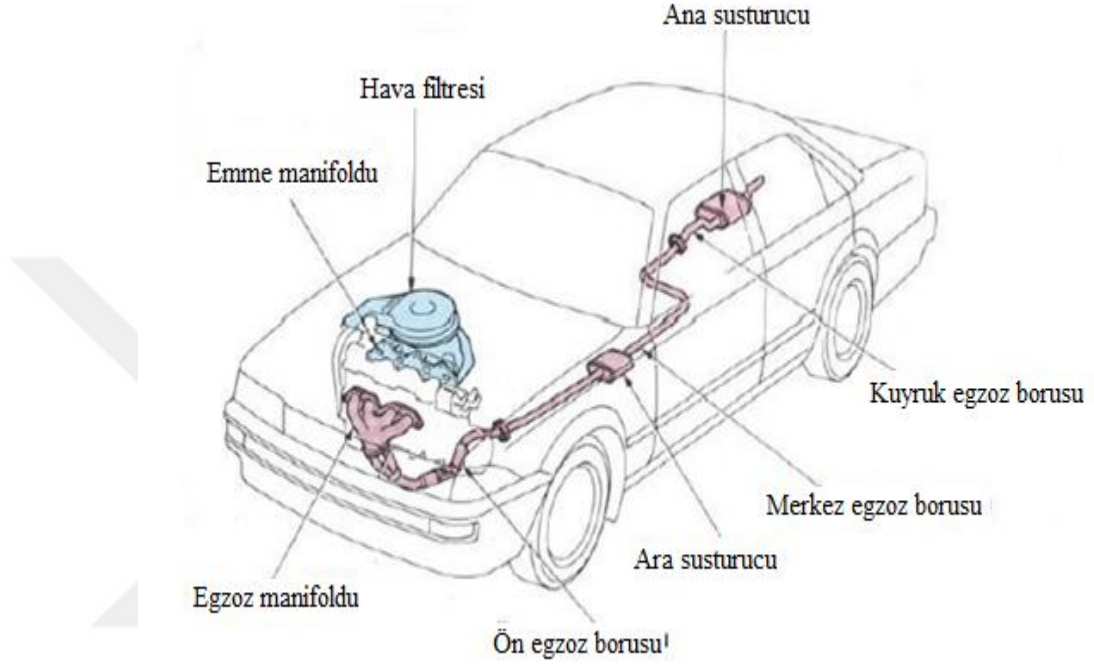
Egzoz gazlarının sahip olduğu bu sıcaklık değerleri önemli bir potansiyele sahiptir. Bundan dolayı enerjinin geri kazanımı alanındaki çalışmalar her geçen gün büyük önem kazanmaktadır. Çünkü teknolojinin ilerlemesi ve tüketicilerden gelen taleplere bağlı olarak araçlarda konfor gün geçtikçe artmaktadır. Artan konforla birlikte araçlarda enerji tüketimi de paralel olarak artmaktadır. Bu artış beraberinde taşıt alternatörünün elektrik üretim kapasitesini de arttırmaktadır. Bundan dolayı taşıtlarda alternatif elektrik enerjisi üretimi bu artışı az da olsa karşılayabilecek nitelikte olmalıdır (Temizer, İ., 2014).



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

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, atık ısı enerjisinin dönüşümünü yapabilecek sistemler üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Taşıtın elektrik ihtiyacını karşılayabilmek için atık ısıdan faydalanma yönteminin de alternatif bir çözüm olduğu görülmektedir. Son yıllarda bu konuda yapılan çalışmalar da bunun bir göstergesi niteliğindedir. Egzoz sistemine dayalı bir atık ısı geri kazanım sisteminin kullanılması durumunda enerjide süreklilik sağlanarak dünya üzerindeki sera gazlarının salınımları azaltılacaktır. Araç egzoz sisteminin kısımları Şekil 1.4'de gösterilmektedir. Ayrıca elektrik enerjisinin depo edilmesi ve akü için gereken donanımların aracın ağırlığını arttırmasından dolayı harcanan yakıt miktarı arttırmaktadır. Bundan dolayı enerjinin araç üzerinde daha hafif elemanlar tarafından üretimi aracın ağırlığının

azalmasını ve fosil yakıtların da sarfiyatını azaltacaktır. TEJ modüllerinin, egzoz gazlarının ısısından ürettiği elektrik enerjisi ile alternatör tarafından üretilen elektrik enerjisinin gücünün büyük bir kısmını karşılaması noktasında göz ardı edilemeyecek bir yere sahip olmaktadır (Temizer, İ., 2014).



Şekil 1.4. Araç egzoz sistemi genel görünüşü.

Motorlarda her silindirden gelen yanmış gazlar tek bir egzoz borusuna bağlanıp egzoz manifolduyla susturucuya gitmesi sağlanmaktadır. Susturucuda sönümlenen ses ve artık gazlar son olarak dışarı atılırlar. Yanmış gazlar egzoz borusuyla dışarı atılırken egzoz borularında ısınma meydana gelir. Meydana gelen bu ısınma TEJ'lerin elektrik üretebilmesi için ihtiyacı olan sıcak kaynak ısısını fazlasıyla sağlamaktadır (Temizer, İ., 2014).

1.2. Isı Etkisi ile Elektrik Enerjisinin Elde Edilmesi

Günümüzde termoelektrik olarak adlandırılan teknoloji 19. yüzyıl ortalarından beri biliniyor olmasına karşılık yeterince işlevsel bir kullanım alanına ulaşamamıştır. Termoelektrik, sıvı ya da katı maddelerin sıcaklık farklarına bağlı olarak malzemeler üzerinde oluşan elektriksel potansiyeli inceleyen bir bilim dalıdır. Isı enerjisinin elektrik enerjisine, elektrik enerjisinin de ısı enerjisine dönüşebilmesini öngören termoelektrik, 1821 yılında T. John

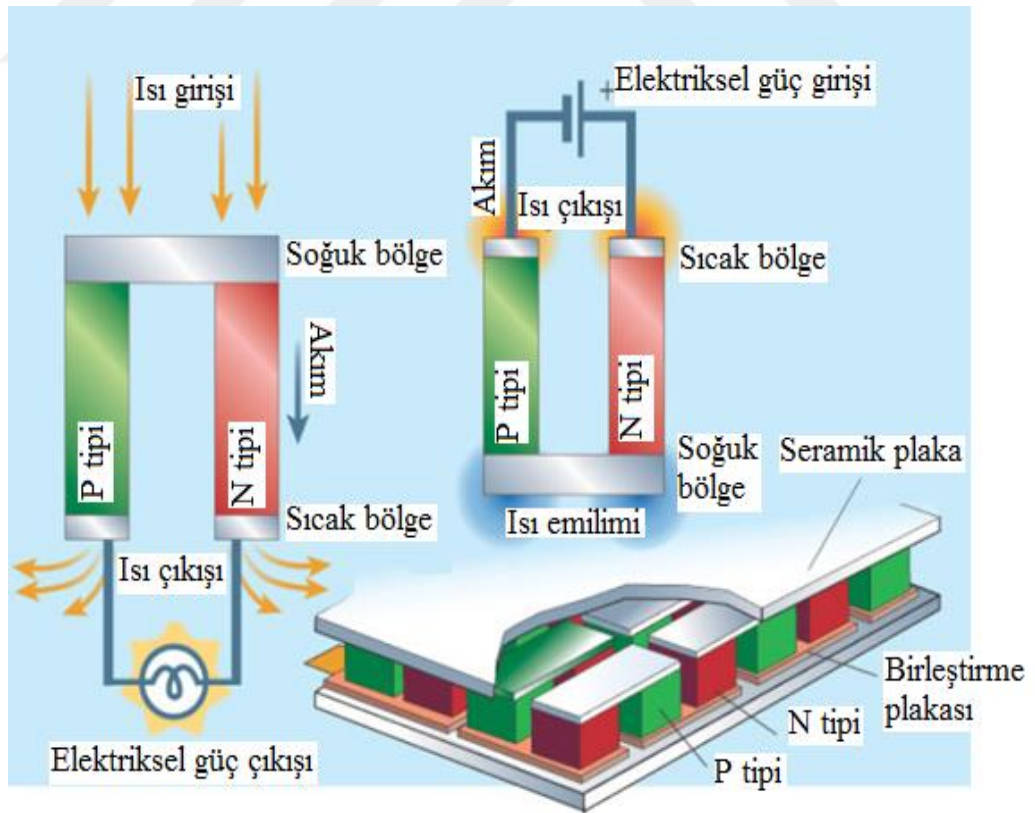
Seebeck tarafından keşfedilmiştir. Ancak o zamanın şartlarından dolayı değeri bugünkü kadar anlaşılamamıştır. T. J. Seebeck'in bu etkiyi bulmasından on iki yıl sonra 1834'de, J.C.A. Peltier Fransa Bilim Akademisinde, iki değişik iletken arasında bulunan birleşme bölgelerinde sıcaklık anormalliklerini anlattığı bir makale yayınlamıştır. Bu olgu Peltier etkisi olarak bilinmektedir. Bu etki, aralarında sıcaklık farkı olan ve ısı transferi gerçekleşen iki yüzeyin elektriksel gerilim üretmesiyle oluşur. Bir elektrik akımı oluşturmak için birleştirilmiş iletkenlere bir voltaj uygulanır. Akım, iki iletkenin bağlantılarından aktığı zaman bir tarafta ısı uzaklaştırılır ve soğutma gerçekleştirilir. Diğer tarafta ısı biriktirilir ve sıcaklık artışı meydana gelir. Absorbe edilen ya da üretilen sıcaklık miktarı akımla doğru orantılıdır ve orantı katsayısı Peltier katsayısı olarak bilinir. Sıcaklık absorpsiyonu ya da üretimi akımın yönüne bağlıdır. Başka bir deyişle bu olgu tersinirdir. Bundan bir anlam çıkarmaya çalışırsak Peltier'in düşüncesine göre, bunun nedeni sertlik, yumuşaklık ya da elektriksel iletkenlik gibi iletkenlerin özellikleridir. Deney sonuçlarının ortaya koyduğu teorik açıklamaya uyulmadığı zaman, ölçümlere inanmayı reddetmiştir. Sonraki birkaç yıl boyunca Becquerel ve diğer araştırmacılar Peltier etkisinin gerçek doğasını açıklamaya çalıştılar ve sonuç olarak 1898'de Lenz, Bizmut ve Antimon yolunun birleşim yerindeki bir çukura bir su damlası yerleştirmiştir. Akım ters çevrildiğinde bu damla buza dönüşür, sonra tekrar ters çevrildiğinde buz erir. Lenz bunun akım yönüne bağlı olduğunu açıkça izah etmiştir.

Termoelektrik, ısı enerjisinin elektrik enerjisine veya elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümüdür. Bu olayda, uygun olan malzemeler seçilerek termoelektrik etkilerin neler olduğunu belirlemek gerekir. İki adet farklı yarı iletken malzemenin kimyasal yöntemlerle birbirine birleştirilmesi ile yapılan bir devreden elektrik akımı geçirilmesiyle yarı iletkenler değişik sıcaklıklara sahip olurlar. Bu farklı sıcaklıklardaki yarı iletkenlerde, aynı anda çeşitli etkiler oluşmaktadır. Bunlar Peltier, Seebeck, Thompson, Joule ve Fourier etkileridir. Termoelektriğin özünü oluşturan fiziksel kurallar 1800'lü yıllara kadar dayanmaktadır. Geçmişten günümüze kadar devam eden bu alandaki çalışmalarda bilim adamları, maksimum materyal faktörü değerinin (ZT) üzerinde durmuşlardır. Bu faktörde ısı enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek için bir materyalin elektrik ve ısı iletkenliğinin hesaba katılması vurgulanmıştır. Sanfransisko'da yapılan materyalleri araştırma toplantısında Donald T. Morelli, otomobillerdeki termoelektrik sistemler için materyallerin ZT değerlerinin az 2 olması gerektiğini vurgulamışlardır. Araştırmacılar ZT değerinin 1 ile sınırlı olduğunu düşünerek bu konuda yıllarca bir gelişme sağlayamamışlardır. Vinning ZT değerinin herhangi bir teorik sınıra dayanmadığını ifade etmiştir. 1950 yılında Ioffe alaşımlandırılmış yarı iletkenlerin diğer malzemelere oranla daha iyi termoelektrik özelliklere sahip olduklarını bulmuş ve ev tipi

soğutucularda bu yarı iletkenlerden yararlanılacağı ifade etmiştir. Bu soğutuculara örnek olarak gösterilebilecek buzdolaplarında Freon'a ihtiyaç duyulmaz ve çok uzun süre dayanıklılığı sağlanabilir. Birkaç yıl süren bu aktivite sırasında değerlendirilen hemen hemen tüm bilinen yarı iletkenler, yarı metaller ve alaşımlar arasında oda sıcaklığında en iyi sonucu veren malzemelerin Bi_2Te_3 ve Sb_2Te_3 alaşımları olduğu ortaya çıkmıştır (Temizer,İ., 2012).

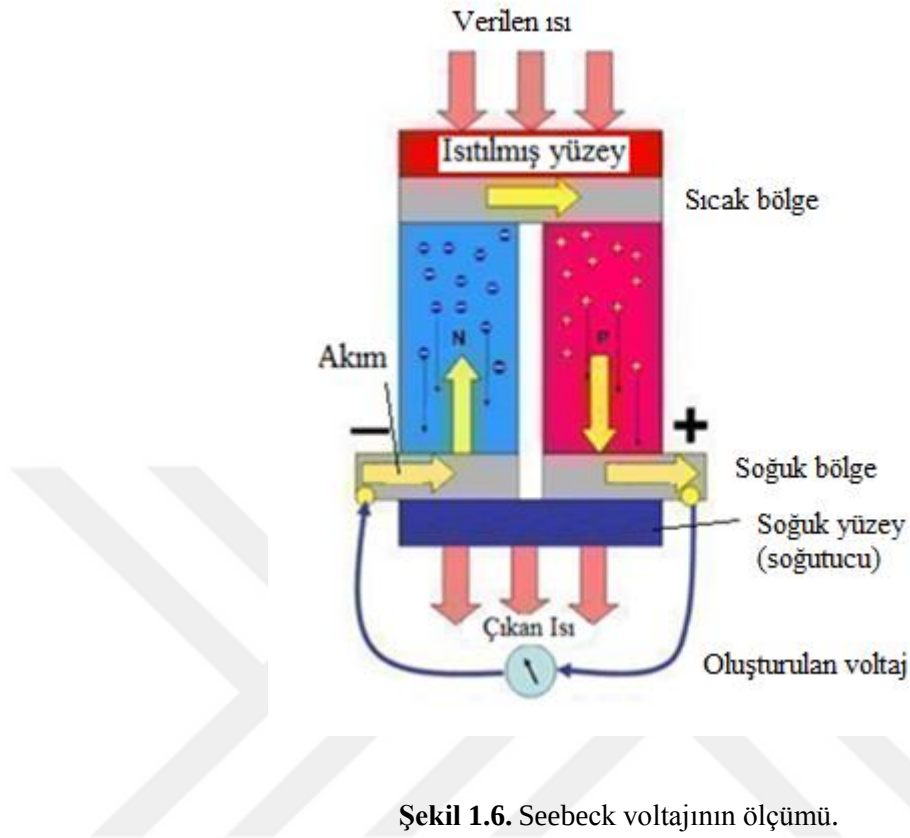
1.1.1. Seebeck etkisi

Seebeck etkisi, sıcaklık farkının elektriğe dönüşümü olarak tanımlanmaktadır. Yani bu da bir enerji eldesidir. Seebeck etkisi deneysel çalışmalarında Şekil 1.5' deki gibi iki metalden bir halka oluşturulmuştur. Metallerin uçlarını farklı sıcaklıklarda tutmuş ve bu halkaların yakınında bulunan pusula iğnesinin hareketini gözlemlemiştir. Çünkü bu sıcaklık farkına metaller değişik tepkiler göstermiş bu durum da halkalarda akım oluşmasına sebep olmuştur. Akımın neden olduğu manyetik alan da pusula iğnesini yörüngesinden saptırmıştır. Seebeck bu olayı termomanyetik etki olarak açıklamıştır ve akım oluştuğunu düşünmemiştir.



Şekil 1.5. Seebeck etkisi.

Danimarkalı fizikçi H. C. Ersted 'de çalışmalarında termoelektrik ifadesini kullanmıştır. Sıcaklık farkı uygulandığı zaman iki değişik metal ya da iki yarı iletken arasında termoelektrik voltaj farkı oluşmaktadır. Şekil 1.5'te Seebeck etkisinin ana teması gösterilmektedir. Termoelektrik çeviriciler P ve N tipi yarı iletkenlerden oluşur. Termoelektrik malzemeler elektriksel yük ve ısıyı ileten serbest taşıyıcılara sahiptir. Bu olayı anlamak için gaz halindeki yüklü parçacıklar örnek verilebilir. Gaz halindeki yüklü parçacıkları, bir bölümü sıcak diğer bölümü soğuk olan yani sıcaklık gradyeninin olduğu kapalı bir kutuda düşünelim. Böyle bir durumda gaz halindeki yüklü moleküller sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hızlı bir şekilde hareket ederler. Sıcak moleküller soğuk moleküllere göre kutu içinde daha fazla alana yayılacak ve böylece soğuk bölgede molekül yoğunluğu daha fazla olacaktır. Yoğunluktaki bu fark moleküllerin tekrar sıcak bölgeye yayılmasına neden olacaktır. Kararlı durumda sistem, molekül yoğunluğu, sıcaklık gradyeninin oluşmasını karşılayacak şekilde kalır ve böylece molekül hareketinde net akış olmasını engelleyecektir. Eğer moleküller elektriksel olarak birbirleri ile benzer yüklere sahip iseler soğuk bölgede yoğunlaşan moleküller içerdikleri elektriksel yüklerinden ötürü birbirlerini itecekler ve moleküllerin bir kısmı kutunun sıcak bölgelerine doğru itilecektir. Bu şekilde gaz elektrik yüklerinden ve sıcak soğuk bölgelerden dolayı yani molekül dağılımının ortaya çıkardığı durumdan ötürü bir elektriksel potansiyel farkı oluşturacaktır. Sıcaklık farkından ötürü oluşan bu elektrik potansiyeline Seebeck etkisi ve bu etki bir sabitle tanımlanabileceği için bu sabite Seebeck katsayısı denmektedir. Eğer serbest yük taşıyıcı moleküller pozitif yüklü ise P tipi malzeme denir. Benzer şekilde serbest yükler negatif yüklü iseler N tipi malzeme olarak adlandırılırlar (Özgün, H., 2009).



Şekil 1.6. Seebeck voltajının ölçümü.

Şekil 1.6’da birbirinden farklı iki yarı iletken malzeme ile oluşturulmuş devrede ölçülen voltaj eşitlik 1.1’de verilmiştir. Eşitlik 1.2 ‘de yüzeyler arası sıcaklık farkı (ΔT) ve eşitlik 1.3’te devrenin Seebeck katsayısı hesaplaması verilmiştir.

$$V = \alpha * \Delta T \quad (1.1)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (1.2)$$

$$\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (1.3)$$

Seebeck katsayısı devreyi oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Örneğin bakır konstantan ’dan yapılan bir termokupl için $\alpha = 40 \mu V/^\circ C$ ’dir. Yani her $1^\circ C$ sıcaklık farkı için $40 \mu V$ ’luk voltaj üretir. Bir yarı iletken α ’nın değeri $100 \mu V/^\circ C$ ’dan büyük ise bu tür yarıiletkenlere termoelektrik yarıiletkenler denir. N tipi bir yarıiletken için α değeri negatif, P tipi yarıiletken için α değeri ise pozitif olmaktadır. Bu durumda meydana gelen Seebeck etkisi yarı iletkenlerde jeneratör, metallerde ise termokupl veya ısı sensörü şeklinde kullanılmaktadır (Rowe ve Bhandari, 1983).

Çizelge 1.1. Bazı maddelerin Seebeck katsayıları (Efunda, 2010).

Madde	Seebeck Katsayısı	Madde	Seebeck Katsayısı	Madde	Seebeck Katsayısı
Alüminyum	3,5	Altın	6,5	Germanyum	300
Antimon	47	Demir	19	Potasyum	-9
Bizmut	-72	Kurşun	4	Selenyum	900
Kadmiyum	7,5	Cıva	0,6	Silikon	440
Karbon	3	Nikrom	25	Sodyum	-2
Konstantan	-35	Platin	0	Tellür	500

Çizelge 1.1’de bazı elementlerin Seebeck katsayıları verilmiştir. Seebeck katsayısının çıkış gerilimi ile arasındaki bağlantının doğru orantı olduğu eşitlik 1.1’de görülmektedir. Bundan dolayı Seebeck katsayıları yüksek olan maddeler ile yapılan termoelementlerin çıkış geriliminin daha yüksek olacağı anlaşılmaktadır.

Yarıiletken malzemelerin uçları arasında sıcaklık farkı olduğu anda sıcaklığı fazla olan bölgede diğerinden daha fazla elektron topluluğu enerji seviyesini aşp bir üst seviyeye geçebilecek enerjiye sahip olacaktır. Enerjinin yoğunlaştığı bölge sıcak olan kısımdır. Burada bulundukları enerji seviyesini aşarak bir üst seviyeye geçen serbest halde dolaşabilen elektronlar malzemenin derinlerine doğru yayılım göstererek net elektron yayılımı sıcak bölgeden soğuk olan kısma doğru akmaya başlayacaktır. Bu durum malzemenin içinde ölçülebilir bir voltaj farkı oluşması neden olmaktadır. Verimliliği yüksek bir termoelektriksel etki sağlayabilmek için Seebeck katsayısının mümkün olduğunca büyük olması gerekmektedir. Bazı malzemelerde verilen enerjiye bağlı olarak malzeme içerisindeki örgü titreşimleri azalır yada artar. Bu artan örgü titreşimleri elektronların ortalama serbest yolunun büyüklüğünü doğru, yayılımını ters yönde etkileyebilir ve bazı iletkenlerde elektronların yayılımı yönü soğuktan sığağa doğru olabilmektedir. Bu durumda Seebeck katsayısının değeri negatif olmaktadır. P ve N tipi, yarı iletkenlerin yük taşıma kapasiteleri üstünde alaşımlama yoluyla birtakım değişiklikler yapmak mümkün olmaktadır. Elektron yoğunluğunun yükselmesi, elektriksel iletkenliğin de artmasını sağlamaktadır. Bu durum Şekil 1.4 ‘te gösterilmiştir. Yani enerji akışı artmaktadır. Fakat alaşımlayarak yük taşıma yoğunluğunu arttırmak Seebeck katsayısında azalmaya neden olabilir. Sıcaklığın değişmesi de malzemenin Seebeck katsayısı üzerinde etkili olmaktadır. Bu değerler Çizelge 1.2’de gösterilmiştir (Jaegle,M., 2007).

Çizelge 1.2. BiTe yarı iletkenlerde farklı sıcaklıklara göre değişen Seebeck katsayıları.

Sıcaklık (°C) P tipi	Seebeck Katsayısı (V/K) P tipi	Sıcaklık (°C) N tipi	Seebeck Katsayısı (V/K) N tipi
150	0,000125	150	-0,000125
200	0,00017	200	-0,00017
250	0,0002	250	-0,0002
300	0,000218	300	-0,000218
350	0,000225	350	-0,000225

Seebeck olayı boyunca sisteme dahil olan ısı, yarı iletkenlerde bulunan elektronların bir miktarının enerji düzeyini arttırır. Yüksek enerji düzeyinde bulunan elektronlar yarı iletkenin kristal yapısında hareket ederek sistemden ayrılırlar. Elektronlar ayrıldıkça, kristalde yerinin doldurulması gereken yeni bir boşluk meydana gelmektedir. Düşük enerji seviyesindeki elektronlar, malzemenin içinde serbestçe hareket edememelerine rağmen buldukları bir boşluktan atlayabilirler. Yarı iletken malzeme içinde boşluklar bu şekilde konumlarını değiştirebilirler.

20. yy. ortalarına kadar termoelektrik etki, sıcaklığın ölçümünde termokupl olarak kullanılmıştır. Ancak termoelektrik modüllerin avantajı, termokupl elemanından daha fazla gerilim üretebilmesidir. 20. yy. yüzyılın ikinci yarısında bazı ülkelerde bir çok önemli firma bu alan ile alakalı projeler başlatmışlardır. Yıllar boyunca, termoelektrik uygulamalar için kullanılan malzemelerin ZT (etkinlik) ölçümleri 1 değerini geçmemiştir. 20. yy sonlarına doğru en iyi ZT (etkinlik) değeri Bi_2Te_3 (Bizmut Tellur) için yaklaşık 1 olarak tespit edilmiştir. Zaman içinde hızla gelişen bu teknoloji sayesinde nano boyutunda teknoloji yaklaşımları ile $ZT < 1$ engeli aşılmış oldu. Kısa bir süre içinde MIT laboratuvarı, RTI (Research Triangle Institute) enstitüsü ve Hi-Z (Hi Empedans) teknolojileri nominal $ZT > 2$ ile termoelektrik materyallerini geliştirildiğini ilan etmiştir. Bu değerin daha sonraki zamanlarda daha yüksek değerlere ulaşacağı yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir.

Termoelektrik jeneratörlerin termal verimliliği, net olarak üretilen elektriksel gücün, sıcak olan bölgeden absorbe edilen ısıya oranı olarak hesap edilmektedir. Performans olarak bakılırsa termoelektrik modülün malzemesinin Seebeck katsayısının karesiyle doğru, iç direnç ve termal iletkenliğiyle ters orantılı olmaktadır. Buna göre termoelektrik jeneratör imalatı için

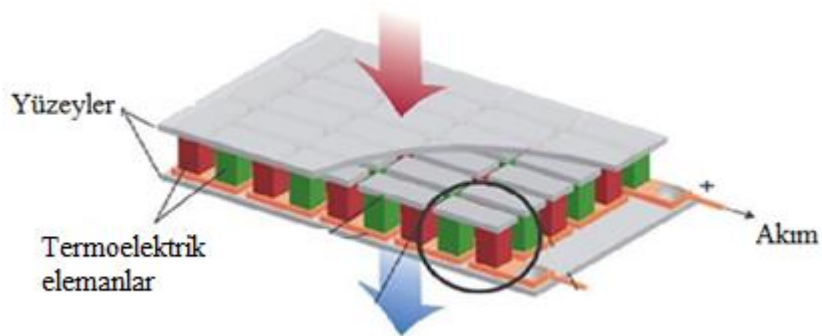
malzeme seçimi yapılırken, Seebeck katsayısının büyük olduğu, iç direnci ve termal iletkenliğinin ise düşük olduğu malzemelerin kullanılması durumunda verim arttırılmış olacaktır .

Termoelektrik sistemlerdeki performans, kullanılan termoelektrik malzemenin türüne göre değişkenlik göstermektedir. ZT (etkinlik) değerinin maksimum seviyesine ulaşmak için birtakım hususların göz önünde bulundurulması gerekir. Bunları, çalışma anında kimyasal içeriğin değişmemesi, karışımların difüzyon hızının düşük olması, iyi bir sertlik değerine sahip olmaları, ısıl etkilere olan dayanım, düşük geçiş dirençlerine sahip olmaları şeklinde sıralanabilir. Buradaki sorun değerleri hesaplama kısmında görülmektedir. Değer hesabı, bir malzemenin elektriksel iletkenliğinin oranlanması vasıtası ile yapılır. Asıl amaçlanan çalışma malzemenin içinden elektronların rahat bir şekilde geçmesine uygun fakat ısı veya termal titreşimlerin (fonon) geçişine dirençli olmasıdır .

Termoelektrik materyallerin performansı ZT (etkinlik) değerine göre belirlenir. ZT değeri;

$$ZT = \left(\frac{\alpha^2 \sigma}{k} \right) T \quad (1.4)$$

olarak bulunur. Eşitlik de α Seebeck katsayısı, σ elektrik iletkenliği, k termal iletkenlik ve T ise ortalama mutlak sıcaklıktır. Termoelektrik materyallerin nanoyapıları üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe artarak devam etmektedir.



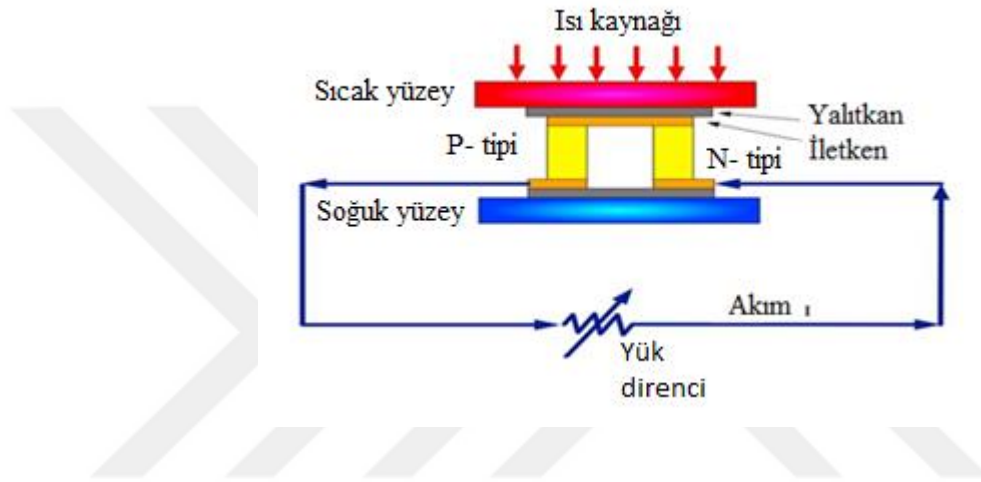
Şekil 1.7. TEM iç yapısı.

Şekil 1.7’ de iç yapısı gösterilen bir termoelektrik jeneratör aynı zamanda çok iyi bir ısı makinesidir. Sessiz çalışırlar ve güvenlidirler. Son on senede termoelektrikler cihazlar hem

çevreci ve hem de esnek olmalarından dolayı elektrik kaynağı olarak popülerliği artmaktadır. Özellikle son yıllarda atık ısının, yani ısı kaynağının bedava olması verimlilikteki düşük değerlerin dezavantajını ortadan kaldırmıştır. Atık ısının enerji kaynağı olarak özellikle 140 °C'den düşük değerlerde kullanımı elektrik üretimindeki bu sistemin ticari rekabetini yeteri kadar artırmıştır. Çevreye zararsız olan termoelektrik güç üretiminin geleneksel metodlara alternatif olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır. Termoelektrik yapıların en çok kullanıldığı alanlardan biri de soğutma sistemlerinde olmuştur. Otomobillerde kullanılan küçük buzdolapları, bilgisayar işlemcilerinin soğutulması bu sistemin kullanım alanlarından bazılarıdır. Termoelektrik modüllerin içinde buzdolaplarında olduğu gibi kompresör kullanılmadığı için oldukça sessizlerdir. Bu yüzden klimalarda da kullanılabilirliği yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Fakat termoelektrik enerji özellikle ısının atık durumda olduğu ve geri dönüşümünün yapılmadığı durumlarda kullanılması ile ön plandadır. Araç egzozları, sobalar, gazlı su ısıtıcıları, doğal sıcak su kaynakları, güneş ışınlarının odaklanması gibi atık ısının değerlendirilebileceği kaynaklardan kullanılır. Termoelektrik malzemeler, pek çok alanda temiz enerji vadetmektedir. Termoelektrik enerji bilhassa taşıt teknolojilerinde, pillerin ve akülerin şarj edilmesinde, aydınlatma parçalarının çalıştırılmasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bu kadar faydalı olmalarına rağmen şimdiye kadar bu malzemelerin elde edilmesi çok zor olmuştur. MIT ve Boston College'den araştırmacılar yaygın olarak kullanılan termoelektrik malzemelerin tercih edilmesinde %40 artış sağlayabilecek ucuz ve basit bir teknik üzerine çalışmaktadırlar.

MIT ve BC'den araştırmacılar nanoteknolojiden faydalanarak büyük kütleli Bizmut ve Antimon Tellür' u yarı iletken alaşım olarak 1950'den beri ticari aygıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu konu üzerinde çalışan bir ekip bu alaşımın değer katsayısında %40'lık bir artışı tespit etti. Bu başarı, yüzyılın ilk çeyreğinde oda sıcaklığından 250 °C'ye kadar işlev görebilecek dayanıklı bir malzeme kullanılarak elde edilen ilk kazanımdı. Göreceli olarak ucuz ve çevreye dost alaşım kullanılarak kazanılan bu başarı, yüksek soğutma ve enerji üretim etkinliği sağlayan bu keşfin hızla artarak yaygın olarak kullanılabileceği anlamına geliyor. Nanoteknoloji kullanılarak, parçalanıp yeniden nano bileşiklerden büyük kütle halinde tekrar birleştirilen eski bir malzemenin geliştirilmesi için yeni bir yol keşfettiklerini söyleyen Boston College de fizikçi olan ve aynı zamanda projenin sorumlularından biri olan Zhifeng Ren, bu yöntemin düşük maliyetli ve yığın üretiminin yapılabilir olduğundan söz etmiştir. Termoelektrik malzemelerin maliyetini etkin tarzda düşürülmesinin heyecan verici fırsatları temsil ettiği de anlatılmaktadır. Termoelektrik etkinlikte düşük maliyet anlayışıyla geline bu nokta, yeni nesil ürünlerin de önünü açmakta onlara ışık tutmaktadır. Ekibin, mikro soğutucu ve enerji üretici

olarak görev yapacak, çok ince alaşımlar kullanarak oluşturduğu nano yapılar için faydalandığı düşük maliyetli yaklaşım detaylı olarak Science Dergisinde yayımlanmıştır. Araştırmacılara göre bahsedilen yöntem, ucuz oluşuna ilave olarak, yakın gelecekte yapılacak iyileştirmelerle, daha düşük enerji tüketen veya atıl enerjinin geri kazanılmasına yönelik araçları üretmek için pratik sonuçlar sağlayabilecektir. Bu sonuçlar, keşfedildiği 19. yüzyılın başlarından beri bilim adamlarını kendine çekmiş ve termoelektrik enerji üretimi arayışında çok faydalı bir kilometre taşını oluşturmuştur (Suter,C., 2012).



Şekil 1.8. TEM çalışma prensibi.

Termoelektrik etki, birtakım malzemelerin ısıyı elektriğe çevirmesi veya tam tersini ifade etmektedir. Şekil 1.8’de görüldüğü gibi ısı transferi sıcak yüzey bölgesinden N ve P yarı iletken bacakları üzerine ve oradan da soğuk yüzey bölgesine doğrudur. Bu etkiden faydalanılmasında bir engel bulunmaktadır; çoğu malzemeler elektriği ilettiği kadar ısıyı da içinde iletir, bundan dolayı ısı malzemenin her yerinde hızlı bir şekilde eşitlenir. Etkinliği arttırmak amacıyla bilim adamları, elektriği daha iyi iletebilen fakat ısıyı daha az ileten malzemeler üzerinde yoğunlaşmışlardır (Suter,C., 2012).

1.1.2. Thomson etkisi

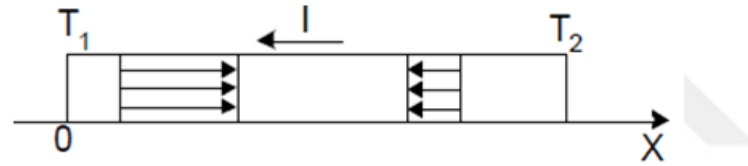
Isı gradyeni bulunun metal bir çubuktan akım geçirildiğinde ısı atılır veya emilir. Bu duruma Thomson etkisi denir. Isı gradyeni metal içinde bir elektriksel alan oluşturur. Thomson olayı Peltier etkisine benzer fakat Thomson olayında alan bir birleşme noktasıyla (ya da birleşme noktalarıyla) değil bir sıcaklık gradyeniyle oluşmaktadır. Bir metal çubuktan akım geçirildiğinde ısı sıcaklık gradyeniyle ilişkili alanın yönüne bağlı olarak salınır ya da soğutulur. Şekil1.9’da Thomson olayını gösteren şematik resim verilmiştir.

Sıcaklık gradyeninin elektrik alanı oluşturmaları şu şekilde açıklanabilir. Metal çubuğun bir ucunun ısıtılması o uçtaki elektronların hızlarını yükseltmektedir. Bu elektronlar diğer uca akarak bir elektriksel elektron akışı yani elektriksel bir akım ortaya çıkarmaktadır.

Bir bakır tel kullanıldığında akım telin sıcak bölümünden soğuk bölümüne geçtikçe ısı absorbe etmesi sebebiyle telin sıcaklık dağılımını sabit tutmak için tele ısı vermek gerekir. Sıcak bölgeden soğuk bölgeye akım geçen telde ısı atılmaktadır.

Akımı oluşturan elektrik yükleri telden geçtikçe ısınmaları ya da soğumaları sebebiyle ısı alıp ısı vereceklerdir. Ancak bu durumda demir telde bozulur. Akım, telin sıcak kısımlarına hareket ettikçe ısı verir (yada soğuğa doğru hareket ettikçe ısı alır).

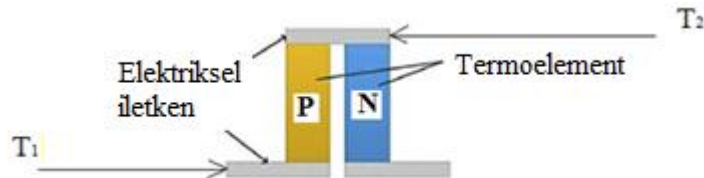
Thomson etkisindeki tüm olay uçlardaki T_1 ve T_2 sıcaklıklarına, metalin türüne, I akımının verilmiş yönüne bağlı olarak değişiklik gösterir. Thomson olayının günümüzde doğrudan kullanıldığı bir alan bulunmamaktadır (Döşkaya H.E., 2010).



Şekil 1.9. Thomson olayı.

1.2. Termoelement

Termoelement, Şekil 1.10'da görüldüğü gibi N tipi ve P tipi yarıiletkenlerin bakır bir iletken yardımıyla seri bağlanması esasına göre meydana gelmektedir. N tipi yarıiletken, termoelementin negatif ucu ve P tipi yarıiletken ise pozitif ucu olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1.10. Termoelement.

Termoelementlerin çalışma prensibi incelendiğinde, termoelement parçaya doğru akım (DA/DC) verildiği zaman yük taşıyıcıları, enerji seviyesi düşük olan üstteki bakırdan yarı iletkenine doğru harekete geçerler. Elektron ve delikler bakır ve yarıiletken arasında bulunan enerji duvarını aşmak için bakırın örgüsünden enerji sağlarlar. Bu durumdan dolayı üstteki bakırın sıcaklığı azalacaktır. Bununla birlikte, yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine ilerleyen yük taşıyıcıları üzerlerinde bulunan fazla enerjiyi alt tarafta bulunan iletkenine aktararak altta bulunan bakırın sıcaklığının artmasına neden olacaktır. Bu enerji geçişi sırasında soğuyan yüzeyden ısının çekilmesi soğuk yüzeyin sıcaklığının hızlı bir şekilde azalmasına, ısının pompalandığı sıcak yüzeyin sıcaklığının ise artmasına neden olacaktır. Devreye uygulanan akımın yönü tersine çevrilmesi soğuyan yüzey ısınmasına, ısınan yüzeyin ise soğumasına sebep olur. (Yavuz vd., 2006). Eğer çalışır durumdaki bir termoelementin sıcak yüzeyinde açığa çıkan ısıyı absorbe edip transfer sistemiyle çevreye atarak T_1 sıcaklığı sabit olacak şekilde tutulursa devreden geçen I akım şiddetine bağlı olarak soğuk yüzeyin sıcaklığı da belli bir T_2 değerine kadar düşecektir. Bir termoelement üzerinden geçen akım şiddetinin değeri değiştirilmediği sürece T_2 sıcaklığının değeri soğuk olan yüzeye gelen ve buradan emilen ısı yüküne bağlıdır. Bu ısı yükü çevreden gelen ve sıcak levhadan soğuk levhaya doğru geçen ısıdan dolayı ve termoelementin devresinden geçen akım şiddetinin etkisi ile ortaya çıkan Joule ısısından meydana gelmektedir (Yavuz vd., 2006). Termoelement malzemelerden elde edilecek maksimum akım değeri termoelektrik yarıiletken malzemelerin kalitesine, ölçülerine ve yapısal özelliklerine göre farklılık göstermektedir (Kapıdere, 2005., Ahıska vd., 2004).

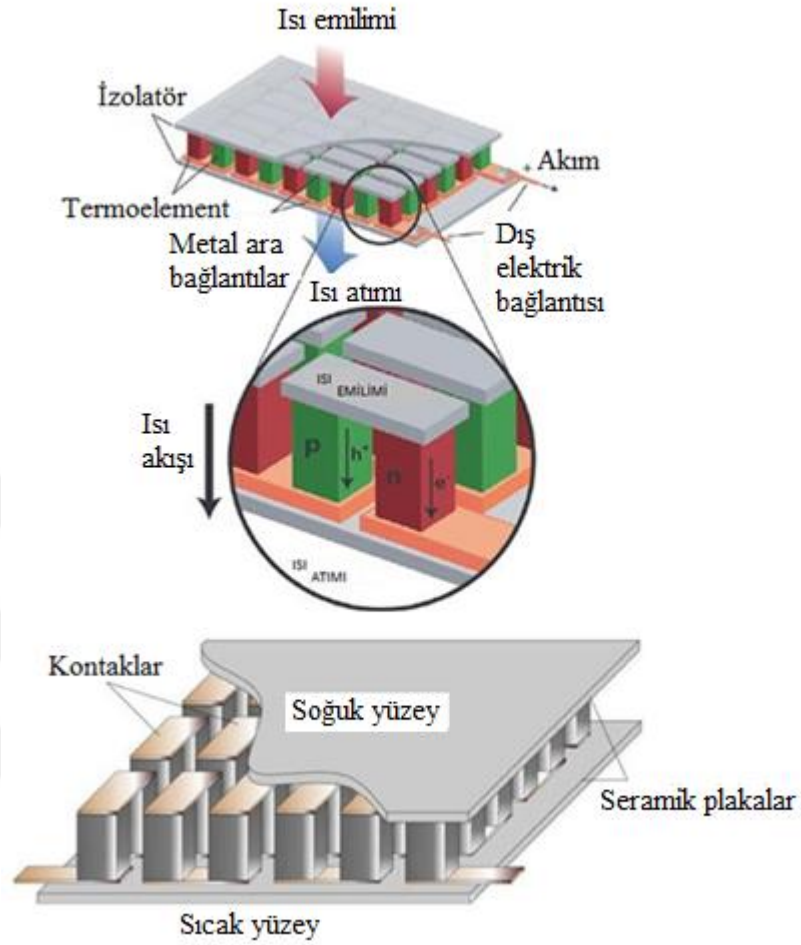
1.3. Termoelektrik Modül

Bir termoelektrik modül veya çift, tipik olarak P ve N kutuplardan oluşmasına karşılık, her ikisinin de aynı anda olma zorunluluğu bulunmamaktadır. Ancak, P tipi ve N tipi malzemelerin her ikisinin de kullanılması, termal gücü ve buna bağlı olarak TEJ'in açık devre voltajını önemli miktarda arttırmaktadır. Çünkü bir P ve N tipi termoelektrik çiftin toplam termik gücü her bir kutbun termodinamik büyüklüğünün toplamına eşit olmaktadır. Yani, termoelektrik materyallerin Figure of Merit (FOM) (Termoelektrik malzemelerin performansını değerlendirmek için kullanılan ZT değeri metrik sisteme göre çok önemli bir termoelektrik özellik olarak karşımıza çıkmaktadır ve bununla birlikte özel bir termoelektrik malzemenin elektriksel ve termal özelliklerinin sıcaklığa bağlı çalışmasını ifade etmektedir (Freedman, 2011).) ZT değerlerindeki ilerlemeleri dikkatle incelemek gerekmektedir. Örneğin, bir N tipi (P tipi) kalkokimid yarıiletken malzemenin ZT değeri artırılabilir, ancak buna karşılık gelen bir P tipi (N tipi) kalkojenit yarıiletken malzemenin özelliklerinde benzer bir artış söz konusu

olmamaktadır. Bu sebepten dolayı, bir termoelektrik modül için çift ZT değerindeki genel artış, tek tek materyaller için hesaplanan ZT değerindeki artıştan daha yüksek kazanım ile orantılı olmamaktadır. Malzemenin termoelektrik karakteristiğine göre çok daha az etkilemesine rağmen malzemelerin mekanik özellikleri hem termoelektrik modülün yapılışı hem de çalışması açısından için kritik önem taşımaktadır. Spesifik termoelektrik malzemeler oldukça hassastır ve mekanik olarak seramik gibi davranmaktadırlar. Fakat sertlik, kırılma tokluğu ve kırılma mukavemeti ile ölçülen hassasiyeti karakterize etmek zor olmaktadır. Karakterizasyon sonuçları, malzeme sabit tutulmasına rağmen numune geometrisine ve testin yapılış tekniğine bağlı olarak değişmektedir (Ravi vd., 2008, Eilertsen vd., 2013) ve aynı element takımının alaşımlanması sırasında içerik değişiklikleri mikro yapıda ve mekanik özelliklerde farklılığa neden olabilmektedir (Ren vd., 2008). Termal genleşme katsayısı (CTE), yüksek çalışma sıcaklıkları ve potansiyel TEJ çalışmalarında termal döngü sebebiyle önemli bir parametre olmaktadır (Paik vd., 2011, Ni vd., 2013). Her termoelektrik kutup, elektrik bağlantısına ve alt tabakaya lehim bağlantısıyla sıkıca tutturulduğundan, özellikle köşe ve kenarlardaki gerilmeler malzeme içinde birikebilir. Termoelektrik modül, ara yüz katmanları, bağlantılar ve alt tabakalar arasında olan CTE uyumsuzluğu gerilme konsantrasyon sorununu arttırmaktadır. Bu konuda önerilen çözümler arasında, sıvı metal katmanlar (Crane ve Bell., 2006) ve karbon nanotüp dizileri gibi yeni sistemler bulunmaktadır (Gao vd., 2010).

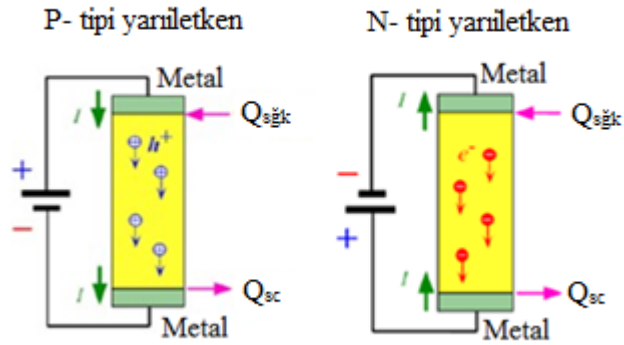
Termoelementler, Şekil 1.7'den anlaşılacağı gibi elektrik iletimi olarak seri, termal iletimi olarak da paralel bağlanmaktadır. Farklı amaçlara yönelik değişik güçlerde termoelektrik modüller üretilmesi mümkün olabilmektedir. Termoelektrik modüller, hareket edebilen herhangi bir parçası olmayan birer küçük ısı pompaları gibi düşünülebilir. Bu modüller genellikle alanın sınırlı olduğu, bakım maliyetlerinin düşük olmasının istendiği ve soğutucu gaz kullanımının düşünülmediği durumlarda tercih edilirler. (Yavuz vd., 2006).

Şekil 1.10'da görüldüğü gibi, şekildeki modül yapısal olarak incelendiğinde, P tipi ve N tipi yarı iletkenlerinin seri bağlantısı elektriği iyi ileten (bakır) malzemeler ile oluşturulmuştur ve elektriksel izolatör olan seramik yüzeyler arasına yerleştirilirler. Elektronlar (-) negatif kutuptan (+) pozitif kutba doğru yönelirler. Elektrik akımının doğrultusu elektronların hareket doğrultusuna göre belirlenmektedir. Bundan dolayı bir malzemede elektronların ilerleme yönünün tersi elektriksel akımın yönü olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade şekliyle elektronların oluşturduğu boşlukların (deliklerinin) takip ettiği yönde elektrik akımının yönü olarak kabul edilmektedir (Atalay, 2010).



Şekil 1.11. Termoelektrik modülün yapısı.

Şekil 1.12’de P tipi ve N tipi yarıiletkenin çalışma prensibi verilmektedir. P tipi yarıiletkende akım serbest “delikler” aracılığıyla taşınmaktadır. Isının hareket doğrultusu, deliklerin ilerleme yönü ile aynı doğrultudadır ve N tipi yarıiletken ile seri olarak birleştirilince ısıyı bunun tersi yönünde iletir. N tipi yarıiletkende ise yüksek miktarda bulunan serbest elektronlar ilerlerken ısıyı da üzerlerinde taşıyarak hareket ederler. Isının iletildiği yön, elektrik akımı ve delik hareketi hepsi aynı yöndedir.



Şekil 1.12. P tipi ve N tipi yarıiletkenin çalışma şeması.

Hem ısı'nın iletimini hem de oluşan gerilimi arttırabilmek için birçok N tipi parça birbirine seri olarak bağlanır. Bu sayede, ısı iletiminin yönü değişmemektedir. Bağlantıyı kolaylaştırmak adına P ve N tipi materyaller birbiri ardına gelecek şekilde yani seri bağlantı yapılırsa elektrik akımı tek bir hattı takip edecek dolayısıyla yukarı aşağı yönde tüm sistemi dolaşacaktır, ısı iletimi ise sürekli yukarı doğrultuda olacaktır.

Termoelektrik elemanlardan elektriksel güç elde etmenin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Küçük, hafif ve yapıları basittir,
- Hareketli parçaları olmadığından dolayı sessiz, sarsıntısız, güvenilir ve kararlı bir çalışma karakteristiğine sahiptirler,
- Montaj edildikten sonra uzun süre bakım gerektirmezler,
- Ortalama ömürleri 200 000 saat kadardır (> 22 yıl).
- Sıcaklık kontrolüne etkin ve kolaylıkla olanak tanır (±0,1°C),
- Elektrik enerjisinin doğrudan elde edilmesini sağlarlar,
- Elektriksel ve elektromanyetik gürültüleri minimum seviyededir,
- Rejime girme süresi kısadır,
- Çevreye zararlı etkileri yoktur,
- Yerçekimi ve titreşimden etkilenmezler,

Yukarıda belirtilen avantajlarının yanında en büyük dezavantajı, enerji dönüşüm verimliliklerinin %5-10 aralığında kalmasıdır.

1.4. Termoelektrik Malzemelerin Yapısı ve Özellikleri

İletkenler ile yalıtkanlar arasında kendilerine yer bulan yarı iletkenler, normalde yalıtkandırlar. Fakat ısıya, ışığa ve manyetik etkiye maruz bırakıldığında veya bu malzemelere gerilim uygulandığında valans elektronlarından bazıları (son yörünge) serbest hale geçerek iletkenlik kazanır. Bu şekilde kazanılan iletkenlik özelliği kalıcı olmayıp, dış etki ortadan kalkınca valans elektronları tekrar eski yörüngelerine geri dönerler. Bu malzemeler doğal yollardan elde edilebildiği gibi laboratuvar ortamında da elde edilebilirler. Yarı iletkenler malzemeler kristal yapıya sahiptirler. Bu demek oluyor ki atomları kübik kafes sisteminin içinde belirli bir düzende sıralanmıştır. Bu şekildeki yarı iletkenlere ilave edilen bazı özel katkı maddeleri ile iletkenlikleri artırılabilir.

Elektronığın iki önemli elemanı transistör ve bir diğeri olan diyotların imalatında kullanılan silisyum (Si) ve germanyum (Ge) gibi yarı iletkenler termoelektrik modüllerde de kullanılmaktadır (Boylestad, 1994., Floyd, 1996). Her biri birbirinden farklı iki yarı iletken malzemenin (N tipi ve P tipi), birbirine seri olarak birleştirilmesi ile oluşturulan devrede, malzemelerin farklı sıcaklıklara maruz bırakılması ile elektriksel gerilimin oluştuğu görülür. Bu oluşan voltaj Seebeck voltajıdır. Devreden ölçülen voltaj, yarıiletkenlerin yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır. Yüzeyler arasındaki ΔT ($T_1 > T_2$) sıcaklık farkı ile P tipli yarıiletkende (+), N tipli yarıiletkende ise (-) kutbu oluşturmaktadır (Rowe ve Bhandari, 1983).

Termoelektrik malzemeler genel olarak malzeme yapısı ve bileşimine göre sınıflandırılır. Bazı sınıflandırma tipleri şunlardır, klatrat (kafes bileşikler), kalkojid (GeSbTe), skutterudit (Co, Ni) As₃, yarı-Heusler, silisid ve oksittir. GeSbTe (germanyum-antimon-tellür) bu materyallerin, en dikkat çekici özelliği termoelektrik bileşiklerden olan bizmut tellür ve kurşun tellür ile birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıkta kullanılması için ticari olarak üretilen termoelektrik modüller; bizmut tellür, antimon veya selenyumun katı çözeltilerini içerisinde barındırmaktadır. Kurşun tellür, yüksek sıcaklıklarda ($\approx 500-600$ °C) daha iyi termoelektrik özelliklere sahiptir. Klatrat ve skutterudit tipi malzemeler bir taban yapısına boşluk doldurma veya konuk atomların içlerine dahil edilmesini içermektedir. Bu eklentiler, elektron dağılımını optimize edebilir veya fonon saçılma alanları olarak görev yapabilmektedirler. 0 K'de atomlar en düşük enerjilerine sahiptirler ve sıcaklık arttıkça titreşim oluşmaya başlar. Bu titreşimlere fonon denilmektedir. Malzeme fonon' un artmasıyla ısınır veya azalmasıyla ısı kaybeder.

Kristal yapısında bulunan bir tane boş alt katman ile yarı-Heusler malzemelerinin özellikleri ve boşluk doldurmalarının yanı sıra dolgulu olan alt katmanların katkı maddesi eliyle üretilen silikon gibi silisitler, doğada bol miktarlarda bulunmaları ve maliyetlerinin düşük olması nedeniyle kullanım alanı bulmaktadır. Düşük sıcaklık aralığında çalışan termoelektrik parçalar için geliştirilen nano yapıdaki bizmut tellür (Poudel vd., 2008), polimerler ve polimer-inorganik matrisler (Sun vd., 2012, Bubnova ve Crispin, 2012) ve MgAgSb esaslı malzemeler (Zhao vd., 2014) yine çokça tercih edilmektedir. Yüksek sıcaklık aralığında çalışan termoelektrik modüller için üretilen malzeme özellikleri ile ZT değeri 1'i aşarak kayda değer kazançlar sağlanmıştır. Bununla beraber nano-mezo ölçekli yapılandırmalar (Biswas vd., 2012) ve tetrahedritler vb. yeni malzemeler (Lu vd., Mart 2013) bu kazanımlara katkıda sağlamaktadır.

Malzemelerin özellikleri sıcaklığa bağlıdır ve uygulamaya özel malzeme seçimi birçok zorluğu da beraberinde getirmektedir. Bazı çalışmalarda ısı kaynakları tek bir sıcaklık değerinde bulunduğu için bir termoelektrik malzemedeki ZT değeri ile çalışma sıcaklığının eşleştirilmesi gerçekçi olmamaktadır. Isı kaynağının bir akışkan olması halinde, akışkanın sıcaklığı akış boyunca değişim göstermektedir. Bunla beraber, sıcaklık her termoelektrik bacağın uzunluğu boyunca azalmaktadır. Malzemenin, akışkanın aktığı yönde kademelenmesi, segmentlere ayrılması ve değiştirilmesi yöntemleriyle birbirinden farklı malzemelerin tek bir cihazda birleştirilmesi yolları geliştirilmiştir (Snyder ve Ursell, 2003, El-Genk vd., 2003). Bununla beraber, yüksek sıcaklığa uygun malzemeler için ZT üst değerleri genellikle 600°C'nin üstündeki sıcaklıklarda ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, termoelektrik malzemenin ısınan tarafındaki sıcaklık, ısı kaynağının sıcaklığından daha düşüktür. Nedeni ise ısı kaynağı ve termoelektrik malzeme arasında sistem bileşenlerine ait termal dirençlerin bulunmasıdır. Endüstriyel işlem fırınları ve egzoz gaz akışları gibi 600 °C'nin üzerindeki ısı kaynaklarını kullanan çalışmalar bulunmaktadır. 250-500 °C aralığındaki ısı kaynakları ile yapılan çalışmalarda termoelektrik enerjinin üretimi için birçok imkân bulunmaktadır (Alexander vd., 2012). Her iki durumda da uygulama sıcaklığı aralığındaki ortalama ZT değeri, malzemenin seçilmesi ve tasarlanması ile oldukça yakından ilgilidir. Uygulama sıcaklık aralığında termoelektrik malzeme havayla temas ettirildiğinde okside olmamalıdır. Düşük sıcaklık uygulamalarında termoelektrik modüllerde bazen katı bir dolgu kullanılmaktadır. Ancak yüksek sıcaklık uygulamaları için katı dolgu ortamı mümkün olduğunca kararlı olmalı ve termoelektrik malzeme ile reaksiyona girmemelidir. Mesela, yüksek sıcaklık aralığında çalışan bazı termoelektrik maddeler süblimleşmeye tabi tutulur. Malzemenin özellikleri, aralığın veya uygun çalışma sıcaklığının bir çoğu için yeterli olmasına rağmen sıcaklık artışı esnasında malzemenin süblimasyon riski

termoelektrik modüllerde ciddi bir performans kaybına ve hatta bozulması sebep olabilmektedir (Paik vd., 2011).

1.5. Termoelektrik Modüllerin Çalışma Performansına Etki Eden Faktörler

Termoelektrik malzemelerin çalışma performansı, termoelektrik malzemelerin kalite faktörü, termoelektrik modüllere etki eden ΔT sıcaklık farkı, termoelektrik modüllerin ısıyı aktarma gücü, termoelektrik modüllerde voltaj ve akım gibi parametrelere etkilemektedir.

1.5.1. Termoelektrik malzemelerin kalite faktörü (FOM)

Termoelektrik malzemelerin fiziksel ve kimyasal yapıları, termoelektrik malzemelerin boyutları, malzemelerin termal güçleri ve dirençleri, ayrıca malzemeye uygulanmış olan ısı işlemler ve malzemeye eklenen alışım miktarları gibi faktörler termoelektrik malzemelerin performanslarını belirlemektedir. Bu performans değeri kalite faktörü (FOM) olarak isimlendirilmektedir. Bu tür sistemlerin soğutma performansının verimliliği (Figure of Merit - FOM) eşitlik 1.5'deki gibi formüle edilebilir (Snyder vd., 2002).

$$ZT = \left(\frac{\alpha^2}{\rho * k} \right) \quad (1.5)$$

Eşitlik de; α Seebeck katsayısını, ρ elektriksel öz direnci, k ısı iletim katsayısını ifade etmektedir. Termoelektrik modüllerde soğutma veriminin Seebeck katsayısı ile orantılı olmasının nedeni Peltier soğutması esnasında sevk edilen ısının, $Q = \alpha T I$ 'ye eşit olmasından dolayıdır. Burada T sıcaklığı, I sembolüyse akımı karakterize etmektedir. Ancak aynı zamanda Joule ısısı olarak bilinen ve $I^2 \rho$ ile orantılı olan ısıtma tipi, soğuk olan bölgede ısınmanın önüne geçilebilmesi için öz direncinin mümkün olduğunca az olması gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte, Joule ısısının uygulanan akımın karesiyle, iletilen ısınsa sisteme verilen akımla doğru orantılı olması halinde, Peltier soğumasının gerçekleşebilmesi için akımın en yüksek değeri Joule ısınmasının Peltier soğumasından daha tesirli duruma vardığı akım tarafından belirlenmektedir. Buna benzer bir mantıkla, sıcak olan kısımdan soğuk olan tarafa ısı geçişini engellemek için sistemin termal iletim katsayısı mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Bir termoelektrik soğutucudan (Peltier) maksimum verim elde edebilmek için “ZT” değerini mümkün olduğunca yüksek tutmak gerekmektedir. Bu da elektriksel direnci yüksek, yani elektriksel iletkenliği düşük, bununla beraber termal iletkenliği de düşük olan ve Seebeck katsayısı yüksek olan malzemeler kullanılmasını şart koşmaktadır.

$$\sigma = n_e \mu_e \quad (1.6)$$

Eşitlik de, n_e elektron yoğunluğunu, μ_e elektron mobilitasını göstermektedir. Görüldüğü gibi elektronların yoğunluğu yükseldikçe elektriksel iletkenlik de yükselmektedir. Ancak yük taşıyıcıların yoğunluğunu arttırmak Seebeck katsayısında ters etki yaparak azalmaya neden olmaktadır. Bundan dolayı FOM grafiğinin değişimi belli bir katkılanma miktarında maksimum olmaktadır. Katkılanma miktarı bu maksimum değere göre uygun hale getirilmelidir.

1.5.2. Termoelektrik modüllere ΔT sıcaklık farkının etkisi

Termoelektrik modüllerin sıcak ve soğuk yüzleri arasında oluşan sıcaklık farkına ΔT denir. ΔT farkı soğutma sisteminin sıcaklık değerinden daha büyüktür. ΔT , termoelektrik modülün pompaladığı ısı gücüne bağlı olmaktadır. Isı aktarımının olmadığı durumlarda veya $Q = 0$ durumunda ΔT en yüksek değerine (ΔT_{maks}) ulaşır (Yalçınkaya, 2008).

1.5.3. Termoelektrik modüllerin ısı aktarım gücü

Termoelektrik modüllerin ısı aktarım gücü, Q (W), birim zamanda modülün yüzeyleri arasından iletilen ısı miktarıdır. Kısaca söylemek gerekirse modülün soğutma gücüdür. Sıcaklık farkı (ΔT) yükseldikçe, ısı aktarım gücü (Q) azalmaktadır. $\Delta T = 0$ durumunda Q en yüksek değerine (Q_{max}), ulaşır (Godfrey, 1996).

1.5.4. Termoelektrik modüllerde alternatif akım

Snyder vd. (2002), termoelektrik modüle doğru akım yerine, alternatif akım verilmesi halinde kısa süreliğine sıcaklık farkının yükseltilebileceğini tespit etmişlerdir. Verilen akım, ısı iletimi ve Joule etkisinin arasında belirli değerler göstererek sonucu etkilemektedir. Joule etkisi, uygulanan akımın karesiyle orantılı olması sebebiyle uygulanabilecek bir maksimum akım değeri bulunmaktadır. Fakat bu darbeli akım (pulse current) yöntemini kullanarak, bu maksimum akımdan daha büyük bir akımın kısa bir süreliğine de olsa, daha büyük sıcaklık farkı oluşturarak daha verimli bir soğutma sağlayabilmektedir. Bunun nedeni, Peltier soğumasının soğuk tarafa doğrudan etki etmesi, Joule ısıtmasının ise eşit olarak aygıtın bütün yüzeyine tesir etmesidir. Burada sözü edilen ısınma, soğuk uca varmadan, soğuk uç şiddetli bir soğutmanın etkisi altında kalmaktadır. Bu şekilde tasarlanmış soğutucular, orta dalga boylu kızılötesi gaz lazer sensörleri gibi çok hızlı bir şekilde istenen soğukluğa ulaşması gereken sistemler için kullanımı son derece uygundur.

1.6. FOM Değeri Yüksek Olan Termoelektrik Malzemeler

1.6.1. Performans avantajları

Geçirdiğimiz son yirmi yılda 1'den büyük ZT değerine sahip termoelektrik malzemeler üzerinde belirli ilerlemeler kaydedilmiştir (Heremans vd., 2013). Basit ya da karmaşık yapılı malzemeler içinde maksimum performansı, fonon cam elektron-kristal davranışını sergileyen malzemeler sağlamaktadır. Bu tip malzemeler, sıcaklığın artması ile iletken malzemenin iletkenliğinde azalmayı ve bununla beraber ZT değerlerinde de bir artış sağlamaktadırlar. Bu davranışa neden olabilen malzemeler, özellikle ağır elementler veya kafese benzer yapılarıdaki moleküllerin, hareketli fononlarını dağıtmaya yardımcı olmaktadır (Tian vd., 2013). Bilinen dökme termoelektrik materyaller için en uygun bileşimler çoğunlukla 1980'de keşfedilmiştir (Heremans vd., 2013). Hicks ve Dresselhaus aracılığıyla 1993' te yayınlanan bir araştırmanın sonuçları ZT değerlerinde bilinenden daha da fazla iyileştirmeler sağlandığını ortaya koymuştur. Malzemelerin nano yapılarının, düşük ölçekli kuantum kuyularını oluşturabileceklerini ve termal olarak iletkenliği düşüren tanecik sınırlarında fonon dağılımına neden olabileceklerini kanıtlamışlardır (Hicks ve Dresselhaus, 1993).

(Heremans vd., 2013)'de Hicks ve Dresselhaus'un 1993 yılında yayınladıkları literatürde, ZT değerlerinin o güne kadar kaydedilmiş maksimum değerlere ulaştığını ve bundan bir süre sonra bu değerlerin yükselmeye devam ettiğini belirtilmektedir. Gerçek saha çalışmalarında, en uygun dökme termoelektrik malzemeler ile ZT değerleri 1,3-1,5 civarına ulaşmıştır ve hiç kimse 2,27'lik ZT tepe değerine ulaşamamıştır. Bununla beraber, termoelektrik malzemeler içinde nano yapı oluşturabilmek için kullanılan tekniklerin maliyeti oldukça pahalıdır. Ulaşılabilecek verimlilik kazançlarına erişebilmek için bu tekniklerin maliyetleri uygun seviyelere çekilmesine yönelik daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir (LeBlanc vd., 2014).

1.6.2. Geliştirilme potansiyeli

Son zamanlarda birçok materyal sistemlerinde yüksek ZT'li malzemeler keşfedilmiş ve laboratuvar ortamlarında daha verimli bir şekilde üretilmeleri sağlanmıştır. Skutteruditler, klatratlar, yarı-Heusler ile kobaltit gibi oksitler ve perovskitler gibi oksitler bu ZT sayısını arttırmak adına daha umut verici sonuçlar doğurmaktadırlar (Tian vd., 2013). Bu malzemelerin üretim maliyetlerini aşağılara çekmek, daha kabul edilebilir maliyetlere daha fazla verimli termoelektrik malzemeler üretimi sağlamakla beraber, atık ısı geri kazanımının daha da verimli hale getirilmesini sağlayabilir. Termoelektrik jeneratörler ile atık ısı geri kazanımının yaygın

olarak kullanılması için, ZT değerlerinin artmaya devam etmesi, malzemelerin verimlilik ve maliyetlerini düşürmek adına yapılan araştırma ve geliştirmeler büyük önem arz etmektedir. Öncelikle, şu anda kullanılan malzemeler ile ilgili potansiyel sorunlardan dolayı alternatif materyallerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yüksek elektriksel direnç, yüksek sıcaklıklara dayanabilme kabiliyeti, ZT sınırları ve termal döngü ile beraber düşük ısı direnç, düşünülmesi gereken önemli kıstaslar arasındadır. Buna ek olarak, kurşunun kullanımı çok sayıda hükümetin düzenlemesine tabidir ve tellür piyasaları, CdTe güneş pilleri piyasasına bağlı olarak taleplerde beklenmedik değişiklikler görülebilir. Daha önce de anlatılan alternatif malzeme türleri, yukarıdaki sorunların yaşanmamasını ve diğer avantajları da beraberlerinde getirirler.

Yarı-Heusler malzemeler yüksek sıcaklıklara (GMZ, 2014a) ve tetrahedritlere (Lu ve Morelli, Nisan 2013) ve magnezyum silisitlere (LeBlanc vd., 2014) tolerans gösterebilirler ve bilinen malzemelere nazaran maliyet avantajları sunmaktadırlar. Yüksek ZT materyallerin herkes tarafından bilinmesi isteniyorsa termoelektrik materyallerde nano yapı elde edilmesine yönelik daha ucuz yaklaşımlar da gerekmektedir. DOE (Amerika Enerji Bakanlığı)/VTO (Araç Teknolojileri Bürosu) vasıtasıyla finanse edilen projelerde motora eklenen bir dinamometre ile tam yükte TEJ sisteminin performans testleri yapılmıştır. TEJ malzemesi olarak (örn., Skutterudit, yarı-Heusler) kullanımı ile TEJ sisteminin dolaylı yoldan yakıt tüketimini azaltmaya yönelik sağladığı katkının minimum yüzde 5'lik bir değere ulaşabilmesi için testlere devam edilmektedir. Bu gelişmiş TEJ'ler geliştirilmiş imalat yöntemleri ile ticari olarak uygulanabilir olacaktır ve ilk olarak yıllık 100 000 ünitelik üretim, giderlerin azalması için yeterli olacaktır (Cleary, 2014; Jovovic, 2014; Salvador ve Meisner, 2014).

1.6.3. Düşük maliyetli malzeme

Silisitler (LeBlanc vd., 2014) ve tetrahedritler (Lu ve Morelli, Nisan 2013) gibi bazı termoelektrik malzemeler genellikle nispeten düşük maliyetleri için tercih ediliyorlardı. Bu malzeme ailelerinin birkısına ilişkin bilgiler Tablo 1.3' te gösterilmektedir. Maksimum ZT ve ilgili sıcaklık bilgileri (Seshadri Group, 2013) 'dan alınmıştır ve verimlilik, 600 °C'lık ΔT için maksimum ZT'ye dayanmaktadır ve malzeme maliyet verileri (LeBlanc vd., 2014) 'ten alınmıştır. Verilen maliyetler, ölçek ekonomilerinin hesaba katılmadığı tahminlere dayanmaktadır. Bundan dolayı, eğer bu materyallerden herhangi birisi yaygın bir şekilde kullanılırsa, maliyetler muhtemelen düşecektir (LeBlanc, Eylül 2014). İmal edilebilen P tipi kobalt oksit ile benzer yapıya sahip sınırlı N tipi oksit olduğundan, günümüzde kobalt oksit benzeri oksit malzemeler kullanılmamaktadır. Oksit bir TEJ sistemi denendiğinde, bilinen en iyi ZT değerleri yaklaşık 0,3'tür. Bu malzemelerin daha fazla kullanılması ve termoelektrik

performanslarının iyileştirilmesi, şebeke elektriğinde maliyet bakımından rekabet edebilecek termoelektrik enerji üretimi sağlayabilir.

Çizelge 1.3. Farklı termoelektrik malzemeler hakkında veriler (LeBlanc vd., 2014; Seshadri Group, 2013).

Malzeme Ailesi	Maksimum ZT Değeri	Sıcaklık (°C)	Verimlilik	Ortalama Malzeme Maliyeti (\$/Kg)
Kobalt Oksit	1,4	727	%12	\$345
Klatrat	1,4	727	%12	\$5.310
SiGe	0,86	727	%9	\$6.033
Kalkojenit	2,27	727	%16	\$730
Yarı-Heusler	1,42	427	%17	\$1.988
Skutterudit	1,5	427	%18	\$562
Silisid	0,93	727	%9	\$151

TEJ sistemleri üretim maliyetleri açısından incelendiğinde, sistemde kullanılan termoelektrik malzeme maliyetlerinin önemli derecede pay sahibi olduğu görülmektedir ve bu malzeme maliyetleri tüm üretim maliyetlerinin yaklaşık olarak %50-80'ini oluşturmaktadır (LeBlanc vd., 2014). Tablo 1.4'te gösterildiği gibi, günümüzde kullanılmakta olan bazı termoelektrik malzemelerin üretim maliyetleri; kömür, doğal gaz, jeotermal ve fotovoltaik gibi diğer rakip teknolojilere kıyasla bugün kat kat daha fazladır. Sistem maliyetlerine ait rakamlar, (LeBlanc vd., 2014)'te tartışılan P tipi ve N tipi yarı iletken malzemelere ait birkaç varsayıma dayandırılmıştır. Alternatif enerji dönüşüm sistemlerine yönelik pazarda termoelektrik jeneratörler 45 milyon dolarlık toplam pazar büyüklüğüne ulaşmıştır. Bu pazar en büyük pay sahibi olan askeri ve havacılık sektörleri ile sınırlanmaktadır (Das, 2013). Uzay araçlarında kullanılan güç üretim sistemleri nükleer enerjiler kullanmaktadır. Çeşitli uzay keşif görevleri için termal kontrol sağlayan NASA Jet Tahrik Laboratuvarı'nın öncülüğünde bu nükleer enerji kullanan sistemlerde ortaya çıkan atık ısılar kullanılarak TEJ'lerden elektrik üretilmesi sonucu ilk TEJ uygulamaları ortaya çıkmıştır. Çok amaçlı bir radyoizotop termoelektrik jeneratörü (MMRTG) (Caponiti, 2008) ile desteklenen NASA Mars Bilim Laboratuvarının Curiosity Rover'ı (Jet Propulsion Laboratory) 2015 yılı ağustos ayında Mars'a iniş yapmıştır.

Çizelge 1.4. Enerji üretim maliyetlerinin karşılaştırılması (LeBlanc vd., 2014).

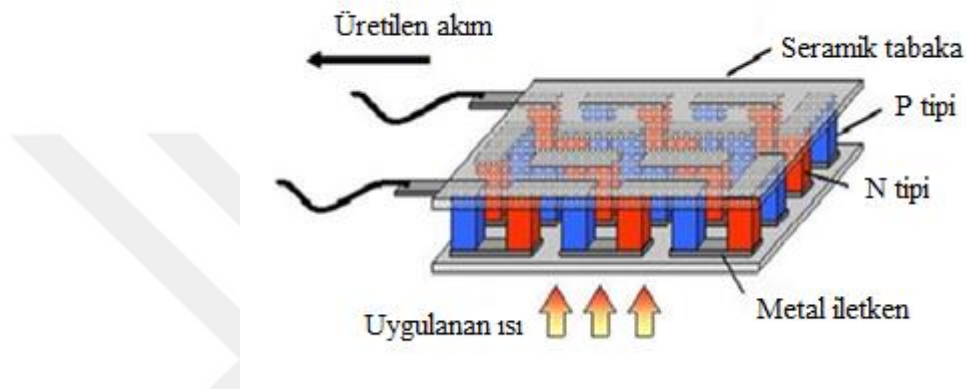
Uygulama Sıcaklığı	Güç Üretim Teknolojisi	Sistem Maliyeti (\$/W)
Düşük ($T_{sc} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Geothermal	\$4,14
	Half-Heusler Thermoelectric (Bulk $Zr_{0.25}Hf_{0.25}Ti_{0.5}Ni_{0.994}Sb_{0.006}$)	\$125,05
	Silicon Nanowire Thermoelectric	\$104,18
	Chalcogenide Thermoelectric (Nanobulk $Bi_{0.52}Sb_{1.48}Te_3$)	\$62,44
Orta ($T_{sc} - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Organic Rankine Cycle	\$4,00
	Concentrating Solar Power	\$3,60
	PV Target	\$1,00
	Skutterudite Thermoelectric (Bulk $Yb_{0.2}In_{0.2}Co_4Sb_{12}$)	\$19,02
	Half-Heusler Thermoelectric (Bulk $Zr_{0.25}Hf_{0.25}Ti_{0.5}Ni_{0.994}Sb_{0.006}$)	\$14,45
	Chalcogenide Thermoelectric (Nanobulk $Bi_{0.52}Sb_{1.48}Te_3$)	\$11,92
Yüksek ($T_{sc} - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Nuclear	\$5,34
	Coal	\$2,84
	Natural Gas	\$0,98
	Silicide Thermoelectric (Bulk $Mg_{2}Si_{0.6}Sn_{0.4}$)	\$5,56
	Chalcogenide Thermoelectric (Bulk $AgPb_{18}Sb_{20}Te_{20}$)	\$5,06
	Half-Heusler Thermoelectric (Bulk $Zr_{0.25}Hf_{0.25}Ti_{0.5}Ni_{0.994}Sb_{0.006}$)	\$4,48

Termoelektrik enerji üretiminin hedef uygulamalardan biri de binalardaki kablosuz sensör ağlarına güç sağlamaktır (Zervos, 2014). Termoelektrik enerji ile üretim gerçekleştiren cihazlar için toplam pazarın 2024 yılına kadar 950 milyon dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Zervos, 2014).

1.6.4. Yüksek sıcaklığa uygun termoelektrik modüllerin geliştirilmesi

Şekil 1.13’de tipik bir TEM’in şematik gösterimi bulunmaktadır. Burada bulunan modüller sayesinde termoelektrik üretim gerçekleşmektedir. Termoelektriksel verimlilik sıcaklığa paralel olarak arttığı için, yüksek sıcaklık termoelektrik modüllerde son yıllarda ortaya çıkan gelişmeler umut verici olmaktadır. Bizmut tellürün değişen oranlarda nikel, kalay, zirkonyum, titanyum ve hafniyum gibi elementleri ihtiva etmesi (Tritt, 2011) ve 583 °C erime noktasından daha yüksek sıcaklıklarda üretilmesi, yarı-Heusler alaşımlarının pazarda yükselişe geçmesine imkân sağlayacağı görülmektedir. GMZ, yarı-Heusler malzemelerini

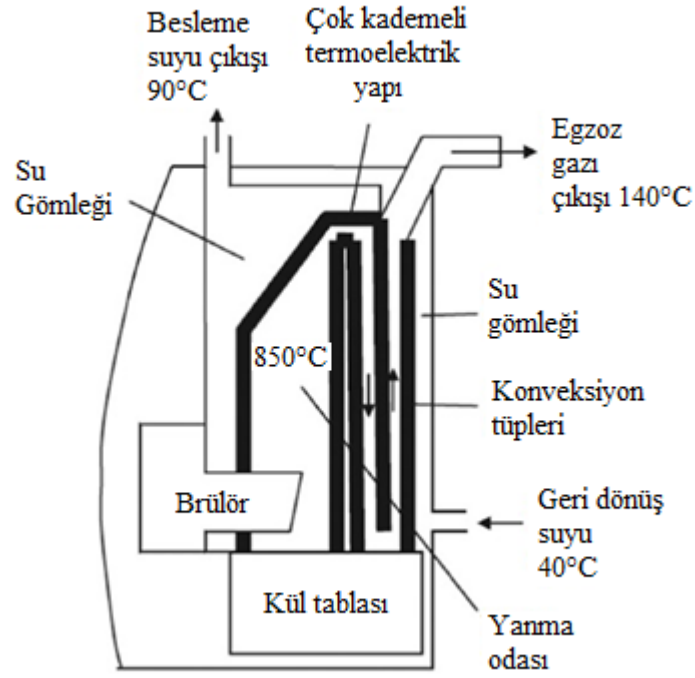
kullanarak 600 °C sıcak yüzey, 100 °C soğuk yüzey sıcaklığına (GMZ, 2014b) dayanabilecek bir modül üretmişlerdir. Bu koşullar altında, 16 cm²'lik alana sahip bir TEM'ün 15,3 W üretildiği açıklanmıştır. Novus Energy Technologies, yarı-Heusler'i kullanarak rakip bir yüksek sıcaklık modülü üzerinde çalışmaktadır ve projesinin aynı bölgede 55 W üretebileceğini ve büyük ölçekli seri üretim ile 0,10 \$/W skalasına kadar maliyetlerin düşürülebileceğini öngörmektedir (Thomas, 2014).



Şekil 1.13. Tipik bir TEM'in şematik diyagramı.

1.7. Termoelektrik Jeneratörler (TEJ) ve Kullanım Alanları

Tarihsel olarak, binlerce radyoizotop TEJ'ler (termoelektrik jeneratör gücünü radyoaktiviteden sağlayan), deniz fenerlerine ve gemilerin uyarı ışıklarına güç sağlamak için Rusya'da kurulmuştur. Bu cihazlar hakkında çok fazla bilgi mevcut olmayıp, bunların birçoğu şimdi terk edilmiş durumdadır. Bugün, Gentherm şirketi uzak bölgelerde kullanılan elektrik jeneratörlerinin üretiminde dünya lideridir. Şirket 30 yıl gibi bir süreçte yaklaşık olarak 22 000 sistemin üretimini ve kurulumunu gerçekleştirmiştir. Bu TEJ sistemleri doğal gaz, bütan veya propanın yanması sonucu açığa çıkan ısıyı kullanırlar. Şekil 1.14'de görüldüğü gibi, brülör vb. ısı üreten bir kaynak tarafından kurşun kalay tellür malzemesinden oluşan TE modüllerin bir tarafı doğrudan ısıtmakta ve modüllerin diğer tarafı ise doğal konveksiyonla veya soğutucu su tarafından soğutulularak yüzeyler arası bir sıcaklık farkı oluşturulmaktadır. Bu şekilde işlemler gerçekleştirilerek TEJ sistemleri 15-550 W arasında elektrik üretebilmekte ve 5000 W'a kadar tesisatlar için kombine edilebilmektedirler. Bu TEJ'ler genellikle gaz boru hatlarında, kuyu girişlerinde, deniz platformlarında, telekomünikasyon sitelerinde ve güvenlik için gözetim ve denetimin sistemlerinde kullanılabilmektedir.



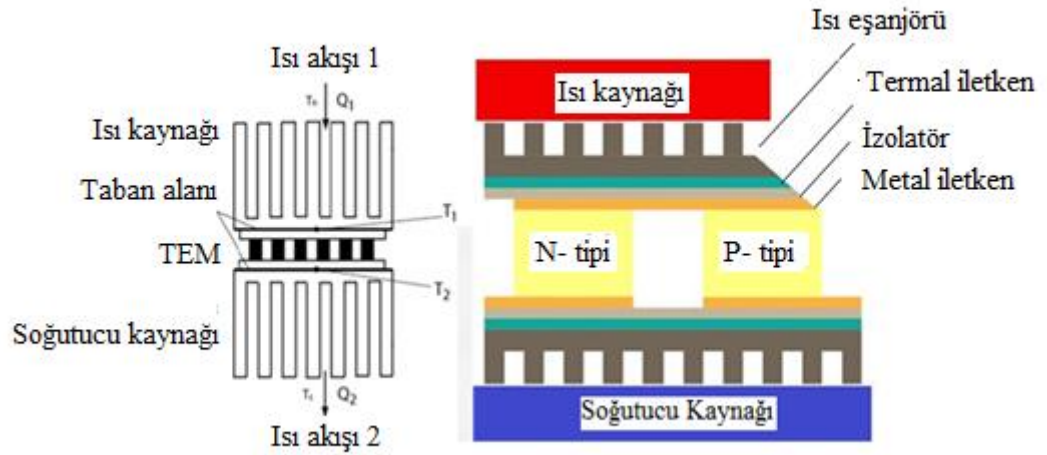
Şekil 1.14. Brülör şematiği.

TEJ'ler kullanıldığı koşullara ve ısı kaynaklarının niteliğine göre beş madde altında incelenmektedir.

- Ekstrem ortamlarda elektrik üretimi için TEJ kullanımı. Bu sistemlerde, ısı kaynakları TEJ sistemlerinin çalışma ilkesine uygun konvansiyonel kaynaklarından oluşmaktadır.
- Atık ısı geri kazanımında TEJ'in kullanılması. Bu sistemlerde, genellikle fosil yakıtların kullanıldığı içten yanmalı motorlarda silindir içi yanma sonucu oluşan egzoz atık ısı enerjisi optimize edilmektedir.
- İhtiyaç olunan elektrik enerjisinin kullanılacağı yere yakın olarak üretilebilecek yerel güç, kombine ısı ve elektrik üretim sistemlerinde TEJ'in kullanılması. Bu sistemlerde, alternatif yenilenebilir enerjilerin baskın durumda olmasından dolayı yaygın kullanım alanı bulamamıştır.
- Solar sistemlerde TEJ'lerin kullanıldığı sistemlerde, enerji kaynağı olarak güneşin ısı enerjisi kullanılmaktadır.

- Sensörler ve mikro elektronik için mikro-güç üretiminde TEJ'in kullanılması. Bu sistemler güç seviyelerinin çok düşük olması sebebi ile tüm ısı kaynakları sıcak kaynak olarak kabul edilebilmektedir.

Son zamanlarda, nano yapıda üretilen teller ve ince film materyallerin geliştirilmesi gibi yeni yaklaşımlar termoelektrik modüllerde kullanılan malzemelerin gelişmesine büyük katkı sağlamaktadır. Termoelektrik malzemeler, kompleks yapıdaki yüksek verimli bu materyallerin keşfedilmesi gelişimine hızlı bir şekilde devam etmektedir (Snyder, 2008). Atık ısı geri dönüşüm sistemlerinde kullanılan termoelektrik ısı değiştiriciye ait resim Şekil 1.15'de verilmektedir.



Şekil 1.15. Basit TEJ sisteminin şematik resmi.

TEJ sistemlerinin kullanım alanları içerisinde büyük oranda tercih edilen uygulama atık ısının geri kazanımıdır. Dünya üzerinde birçok şekilde enerji tüketimi gerçekleşmekte ve bunun sonucunda çevreye atık ısı bırakılmaktadır. Günümüzde kullanılmakta olan içten yanmalı motorlu araçlar, çevreye atılan atık ısı enerjisinde oldukça önemli bir paya sahiptir. Bu sebeple TEJ sistemleri fosil kökenli yakıt kullanan motorlu araçların egzoz atık ısı enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi noktasında en çok tercih edilen sistemler haline gelmektedir. Taşımacılık endüstrisi ise muhtemelen kaybolan bu ısı enerjisini kurtarmak için TEJ sistemlerinin kullanımı için en çekici sektördür. Bununla birlikte, havacılık alanında kullanılan uçak veya helikopterler ya da denizcilik alanında kullanılan gemi motorlarının sıcak egzoz

gazlarının atık ısısının geri kazanılmasında TEJ'in kullanılması üzerine araştırmalar halen devam etmektedir.

Tipik olarak benzin yakıtının kullanıldığı içten yanmalı motorlarda yanma sonucu oluşan toplam enerjinin yaklaşık %25'i aracın tahrikine, %30'u soğutma sıvısına, %5'i diğer kayıplara ve kalan %40'lık büyük bir kısım ise egzoz gazı atık ısısı olarak atmosfere atılmaktadır. Örneğin 100 kW'lık yakıt gücüne sahip dizel motora sahip hafif kamyonlarda egzoz yolu ile atılan ısı, yaklaşık olarak 30 kW olmaktadır. Bu egzoz atık ısı enerjisi, yalnızca %3'lük verimlilikle bile elektrik enerjisine dönüştürülebilse, atık ısıdan 900 W'lık bir elektrik enerjisi geri kazanılmış olacaktır. Bununla birlikte Fiat araştırma merkezi, kilometre başına yaklaşık 12-14 gr CO₂ üretiminin dolaylı olarak azaltılabileceği anlamına geldiğini belirtmektedir. Termoelektrik jeneratörler otomobillerin egzoz sistemi ile kullanılması durumunda elde edilen elektrik enerjisi, aracın şarj sistemine yardımcı olarak kullanılması durumunda aracın alternatöre olan ihtiyacı azalacak veya tamamen ortadan kalkacaktır. Böylelikle alternatörün araç motoru üzerindeki yükü azalarak yakıt verimliliğinde %10-20 arası bir yükselişe sebep olmaktadır.

Yu ve Chau (2009) tarafından yapılan teorik bir çalışmada, egzoz atık ısısı kullanılan termoelektrik jeneratörün orta boy bir aracın elektrik ihtiyacını karşılayabileceği sonucuna varılmıştır. Yang vd. (2000), termoelektrik teknolojinin araçların egzoz ısısını dönüştürerek onlarca kilovat elektrik enerjisi üretme yeteneğine sahip olduğunu öne sürmektedir. Atık ısılar başka pek çok alanlardan da elde edilebilirler. Endüstrideki odun sobaları, pişirme fırınları, tavlama ocakları bunlara örnek olarak verilebilir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Atık ısıdan geri kazanımı amaçlayan pek çok farklı çalışmalar bulunmaktadır. Ümit Topalcı,(2017) İçten yanmalı motorlu taşıtların egzozundan atılan atık ısı enerjisi termo elektrik jeneratör modüller ile kullanılabilir enerjiye dönüştürülebilmesi hakkında çalışma yapmıştır. Çalışmasında 2 silindirli içten yanmalı bir motorun egzoz atık ısısı kullanılarak elektrik enerjisi üretildiği TEJ' in matematiksel model yardımı ile sistem optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Yaptıkları analizler sonucunda ısı değiştirici yapısı ve malzeme tipine bağlı olarak uzun kenarı egzoz hattı boyunca uzanan dikdörtgen TEJ geometrisi ile birlikte 16 adet modülün birbirine elektriksel olarak seri bağlandığı ve ısı değiştirici yüzeyine geometrik olarak 2x8 diziliminde yerleşim düzenine sahip modelin en yüksek TEJ çıkış gücü verdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte kullanılan yarı iletken malzemeler arasında performans açısından en uygun malzeme çiftinin N tipi için Bizmut-Tellur ve P tipi için Bi₂Te₃, 5Sb₂Te₃ olduğu belirlenmiştir.

Kim vd. (2016), atık ısı geri kazanımı için deneysel olarak termoelektrik jeneratör modül üzerinde araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu deneysel çalışmada ilk olarak 253,5x72x60 mm ölçülerine sahip dikdörtgen geometride ısı değiştirici üzerine 40 adet TEJ modül monte edilerek bir termoelektrik jeneratör sistemi için prototipini geliştirmişlerdir. Termoelektrik jeneratör sistemi, içten yanmalı bir dizel motorun egzoz hattına bağlanarak, 1000-1500 ve 2000 d/d sabit motor devirleri için 0,2-1,0 MPa arasında değişen farklı ortalama efektif basınç değerine karşılık gelen motor yüklerinde test edilmiştir. Termoelektrik jeneratör sisteminde, ısı eşanjörünün soğuk tarafında 8 l/d soğutucu akışkan debisi ve 293 K sıcaklığına sabitlenmiştir. Egzoz gaz debisi ise motor devir ve yük şartları altında $\approx$ 66-178 kg/s arasında değişmektedir. Tüm bu şartlar altında testlerde TEJ sisteminden motorun 2000 d/d sabit devrinde ve 0,6 MPa ortalama efektif basınç ortalama değerine karşılık gelen motor yükünde maksimum 119,1 W elektriksel güç çıkışı ve %2,8 dönüşüm verimi elde etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda, artan motor yükü veya devri ile birlikte termoelektrik jeneratörün güç çıkışının arttığını, TEM'ler ile soğuk taraf ısı değiştirici yüzeyi arasındaki temas dirençlerinin azaltılması ile TEJ'in güç çıkışının ve dönüşüm verimliliğinin daha da arttırılabileceğini belirtmişlerdir.

Mesut Kaya,(2016) Egzoz sistemi ile çevreye atılan atık ısının geri dönüşümü sayesinde, belirli miktarda yakıt tasarrufu elde edilmesi söz konusudur. Bu kapsamda egzoz borusuna monte edilen termoelektrik üreteçler yardımıyla atık ısıdan elektrik enerjisi elde edilmesine yönelik

çalışmalar son zamanlarda yoğunlaşmıştır. Bu tezde, egzoz borusunu simüle eden ve içerisinde 600 W 'lık üç adet ısıtıcının bulunduğu sistemin yan ve üst yüzeylerine dokuzar sıra halinde, birbirine seri bağlı termoelektrik üreteçler yerleştirilmiştir. Birbirine seri bağlı dokuzar sıra halindeki bu üreteçlerin oluşturduğu sistemlerin de birbirine paralel bağlanması neticesinde oluşturulan kojenerasyon sisteminin üzerinde analiz ve gözlemler yapılmıştır. Bütün bu termoelektrik üreteçlerin sıcak yüzeyleri egzoz borusuna, soğuk yüzeyleri de soğutucu akışkanın geçtiği soğutma bloklarına temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, sistemde bulunan 9 Ah'lık akünün termoelektrik üreteçler tarafından ne kadar sürede şarj edildiği görülmüştür. Ayrıca sistemde termoelektrik üreteçler tarafından üretilen voltaj, akım ve enerji değerleri ile ilgili veriler toplanmış ve atık egzoz gazından elektrik üretiminin taşıtlarda ne derece uygulanabileceği konusunda tespitler yapılmıştır.

Hassan Fagehi (2016), kendi yapmış olduğu doktora tez çalışmasında içten yanmalı motor sahip bir taşıtın egzoz yoluna yerleştirilen termoelektrik jeneratörünün (AETEG) optimizasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, termoelektrik jeneratör sisteminin performansını hesaplamak için analitik modeller geliştirilmiş ve deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmıştır. Geliştirilen modeller, General Motor tarafından yapılan modül ile kıyaslanarak doktora tez çalışmasında geliştirilen modellerin geçerliliği doğrulanmıştır. Bununla birlikte AETEG sisteminde bulunan eşanjör, termoelektrik jeneratör gibi elemanlar üzerinde gerçekleştirilecek modifikasyonlar ile mevcut termoelektrik jeneratör sistemlerine göre daha fazla güç yoğunluğuna sahip ve 400 kW'lık bir içten yanmalı motorun egzoz sistemine yerleştirilebilecek yeni bir tasarım sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen tasarımın kabul edilebilir ve pratikte hayata geçirilerek araç üzerinde kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Akçay (2015), TEJ performans ve çalışma karakteristiği üzerine yapmış olduğu çalışmada, içten yanmalı bir motorun egzoz atık ısını elektrik enerjisine dönüştürerek, kullanılan motorun yakma mekanizmasında, dolaylı olarak kullanılması ile motor performans parametrelerinin değişimlerini incelediği deneysel bir çalışma yapmıştır. Yaptıkları çalışmada test motoru olarak iki silindirli, su soğutmalı ve 15 kW'lık benzinli bir motor kullanmıştır. Daha sonra 210*170*40 mm ebatlarında dikdörtgen geometri yapısına sahip egzoz, motor soğutma suyu ve LPG yakıtının geçtiği 5 katmandan oluşan ısı eşanjörleri ve 64 adet Bi_2Te_3 yarı iletkenlerinden oluşan termoelektrik modüllerin kullanıldığı bir Akçay (2015), termoelektrik jeneratörlerin performans ve çalışma karakteristiği üzerine yapmış olduğu çalışmada, içten yanmalı bir motorun egzoz atık ısını elektrik enerjisine dönüştürerek, kullanılan motorun yakma mekanizmasında, dolaylı olarak kullanılması ile motor performans parametrelerinin değişimlerini incelediği deneysel bir

çalışma gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmada test motoru olarak iki silindirli, su soğutmalı ve 15 kW'lık benzinli bir motor kullanmıştır. Daha sonra 210*170*40 mm ebatlarında dikdörtgen geometri yapısına sahip egzoz, motor suyu ve LPG yakıtının geçtiği 5 katmandan oluşan ısı eşanjörleri ve 64 adet Bi_2Te_3 yarı iletkenlerinden oluşan termoelektrik modüllerin kullanıldığı bir TEJ sistemini birlikte tasarlayarak imal etmiştir. Yapılan testler sırasında eşanjör içi akış tiplerine göre en yüksek eşanjör performansın sağlandığı akışın, ters akış olduğunu ve termoelektrik jeneratör sisteminde yer alan LPG eşanjörlerinin sistemden çıkartılarak 3 katmanlı hale getirilmesi durumunda bu termoelektrik jeneratör sisteminin güç çıkışının %4,1-%17,9 aralığında düştüğünü tespit etmiştir. Ayrıca 1/2 gaz kelebek açıklığında ve 4000 d/d motor devrinde TEJ sisteminin elektriksel yük altındaki maksimum çıkış gücünün 63,18 W olduğunu gözlemlemiş ve motor devri ile birlikte artan egzoz debisinin, TEJ sisteminin güç çıkışında oldukça etkili olduğunu belirtmiştir.

Liu ve vd. (2014), termoelektrik jeneratör modül sistemi kullanarak bir otomobilin egzoz atık ısının geri kazanımı için bir prototip geliştirmişlerdir. Savaşçı adlı verilen prototip araç üzerine yerleştirilerek geliştirdikleri yol testinde; termoelektrik modüllerin sıcak ve soğuk yüzeyi arasındaki 182 °C sıcaklık farkında 600 W güç çıkışını %1,25 sistem verimi ile elde etmişlerdir. Çalışmalarında, eşanjör sisteminin optimizasyonu üzerine yapılacak çalışmaların termoelektrik jeneratör'in performansını artırmak için kritik olacağını belirtmişlerdir.

Salvador vd. (2013), Marlow Company tarafından skutterudit (CoAs_3 , Kobalt Arsenit) malzemeye dayanarak imal edilen çok yüksek sıcaklıklarda çalışabilen termoelektrik modüller kullanılarak testler gerçekleştirmişlerdir. Termoelektrik jeneratör sisteminde, bir tarafa 24 tane olacak şekilde skutterudit (CoAs_3 , Kobalt-Arsenit) modül ve diğer tarafta da Bi_2Te_3 malzemesinden oluşan 18 tane modül ile toplamda 42 modül kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda, modüllerin sıcak yüzeyini 550 °C ve soğuk yüzeyini 80 °C sabit sıcaklıklarda çalıştırarak maksimum 9 W çıkış gücü elde etmişlerdir.

Doug Crane vd., (2012) Bir yüksek sıcaklık termoelektrik jeneratörünü (TEJ) yakın zamanda iki yolcu aracına entegre ettiler: bir BMW X6 ve bir Lincoln MKT. Yaptıkları bu çalışma, ileri aşamada bir Enerji Dairesi (DOE) tarafından atılan ısıya karşı dirençli (TE) atık ısı geri kazanım programlı araçların (# DE-FC26-04NT42279 sayılı kararı) doruk noktası olmuştur. Bu 7 yıllık program sırasında birkaç nesil termoelektrik jeneratörü mod, motor ve tam cihaz seviyesinde modellenmiş, tasarlanmış, inşa edilmiş ve test edilmiş, ayrıca araç seviyesinde modellenmiş ve entegre edilmiştir. Yaptıkları tez proje süresince elde edilen geliştirme çabalarının ve

sonuçlarının tarihini özetlemekte ve bu alanda devam eden araştırmalar için bir motivasyon oluşturmaktadır. Sonuçlar, mevcut jenerasyon TEJ'de yürütülen tezgah, motor dinamometresi ve araç üstü testler için sunulmakta ve tartışılmaktadır. Test tezgahında 700 W'tan fazla güç üretilmiştir. Araç üstü testlerde 600 W'den fazla üretilmiştir. Hem kararlı durum hem de geçici modeller, bu TEJ'lerin ölçülen performansına karşı onaylanmıştır. Bu çalışmanın başarısı, TEJ'lerin gelecekte geçerli bir otomotiv ürünü olarak kabul edilmesini sağlayan önemli teknik ve işle ilgili konuların ele alınmasına odaklanan yolcu araçlarına yönelik DOE destekli TE atık ısı geri kazanım programının yapılmasına neden olmuştur.

Espinosa vd. (2010), sırasıyla yüksek ve düşük sıcaklık değerleri için Mg_2Si , Zn_4Sb_3 ve Bi_2Te_3 'den oluşan termoelektrik jeneratörü (Peltier) , içten yanmalı dizel bir motorun egzoz yolunu kullanarak test etmek amacı ile bir model oluşturmuşlardır. Daha sonra geliştirdikleri termoelektrik jeneratör modülünü bir otomobil üzerinde test etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, radyatör yerine egzoz borusunun kullanılmasının termoelektrik jeneratörün performansına olumlu yönde etki edeceğini tespit etmişlerdir.

Crane ve LaGrveeur (2010), ABD Enerji Bakanlığı (DOE) bünyesinde yaptıkları projede, geliştirdikleri silindir şeklinde termoelektrik jeneratör ile yüksek güç yoğunluğun sağlanması üzerinde çalışılmıştır. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nda (NREL) altı silindirli bir BMW motoru ile gerçekleştirilen testlerde, termoelektrik jeneratör'den maksimum 125 W çıkış gücü elde etmişlerdir.

Ali Yunus Kaya, (2010) tezinde araçlarda elektrik enerjisini depo eden aküleri, şarj etmek için kullanılan belirli zamanlarda bakım ve onarım gerektiren alternatörlerin yerine araç egzoz gazının ısısı ile çalıştırılan, bakım ve onarım gibi herhangi bir müdahale gerektirmeyen ve daha uzun ömürlü olan termoelektrik sistem üzerinde inceleme yapılarak, deneylerin sonuçları tezde sunulmuştur. Egzozun sağladığı sıcaklık ile ortam sıcaklığının farkı kullanılarak termoelektrik jeneratör kullanılarak elektrik enerjisi elde edilmiştir. Alternatörün aracın aküsünü şarj edebilecek olan gerekli gücü sağlayabilmesi için aracın motor devrinin belirli bir limit değerinin altına inmemesi gerekirken, yapılan deneylerde incelenen sistemde aracın motor devrinden bağımsız olarak güç sağlanmaktadır. Kış mevsiminde bulunduğu üzere havanın sıcaklığının düşük olduğundan sistem için gerekli olan sıcaklık farkı da artmış olacak ve sistemin verimi bu sayede daha artacaktır. Alternatör gücünü bir kayış vasıtasıyla motordan almaktadır, fakat burada incelenen sistemim motorla herhangi bir mekanik bağlantısı

olmadığından dolayı motor üzerinde ekstra bir yük oluşturmamaktadır. Günümüz şartları ile kullanılan TEJ modüllerin araçlardaki alternatörlerin yerini alabilmesi için gereken modül sayısının fazla olması, buna paralel olarak da sistemin maliyetinin de yüksek olduğu anlaşılmıştır.

Trottmann vd., (2010), yaptıkları çalışmada araçların egzozundaki yanmış gazlardan dolayı oluşan atık ısıyı kullanmak için susturucu egzozun üzerine monte edilmiş TEJ sistemini Volkswagen Touran marka araçta test etmişler ve yapılan deneyler sonucunda %5'lik oranda yakıt tasarrufunun sağladığını belirtmişlerdir. Diğer bilinen soğutma sistemlerinin aksine, sıcaklığın istenen değerin üstüne çıkması halinde, bimetalik çubukların modülleri ısı kaynağından ayırması prensibiyle çalışılmıştır.

Wojciechowski vd., (2007), yayınladığı makalesinde otomatik ateşlemeli 1,3 l dizel bir motorun egzozu üstünde yaptığı deneylerde termoelektrik modülden 750W güç elde ettiğini ve bunun alternatörlerle kıyaslanabilir bir durumda olduğunu altını çizmiş ve sistemin egzozun içine monte edilerek kıvılcım ateşlemesi ile çalışan motorlarda uygulanmasının daha iyi sonuçlar doğurabileceğine ve bu sayede atık enerjiyi azaltılarak, kullanım miktarının daha fazla artırılabilceğini ileri sürmüştür.

Thacher vd., (2006), makalesinde 1999 model GMC Sierra marka 5,3l V8 motorlu aracın egzozuna hazırladığı Termoelektrik jeneratör modülünü takarak yaptığı denemelerde aracın %4 - %5,3 aralığında yakıtta tasarrufu sağladığını beyan etmiştir.

Eakburanawat ve Boonyaroonate, (2006), tezlerinde en yüksek güç noktası takibi tekniğini kullanarak termoelektrik enerji vasıtasıyla aküyü şarj edebilme üzerine çalışmışlardır. En yüksek güç noktası takibini yapabilmek için Atmel 89C52 mikrodenetleyicisini kullanmışlar ve 7,99 W güç elde edildiğini tespit etmişlerdir. Kullandıkları TEJ modül TEP-1-1264-1-5' dir. Normal yolla yapılan şarjdan %15'lik bir oranda daha verimli bir şarj sonucuna varmışlardır.

Bass vd., (2001), makalesinde 550 HP güç üreten dizel kamyonun motorunun egzozuna taktığı 72 tane HZ-14 TEJ (9'u seri 8 paralel kol) ile yaklaşık 1 kW güç elde etmeyi başarmıştır. TEJ modülünün çıkışta verdiği gücün, motorun devrine (d/d) değil çoğunlukla motorun yükü (HP) ile ilgili olduğunu altını çizmiştir.

Bu sözü geçen yayınları özetleyecek olursak termoelektrik enerji, pillerin, akülerin şarjında, aydınlatma elemanlarında kullanılan enerjinin sağlanmasında ve araçların yakıtlarında tasarruf sağlamak için kullanılmıştır. Termoelektrik enerji özellikle atık ısının geri kazanımının mümkün olduğu fakat yapılmadığı durumlarda kullanımı ön plana çıkmıştır. Sobalarda, araçların egzozlarında, jeotermal enerji kaynaklarında, gazlı su ısıtıcılarında, güneş ışınlarının odaklanmasında vb. gibi atık enerjinin değerlendirilebileceği kaynaklarda da kullanım alanı bulabilmektedir.

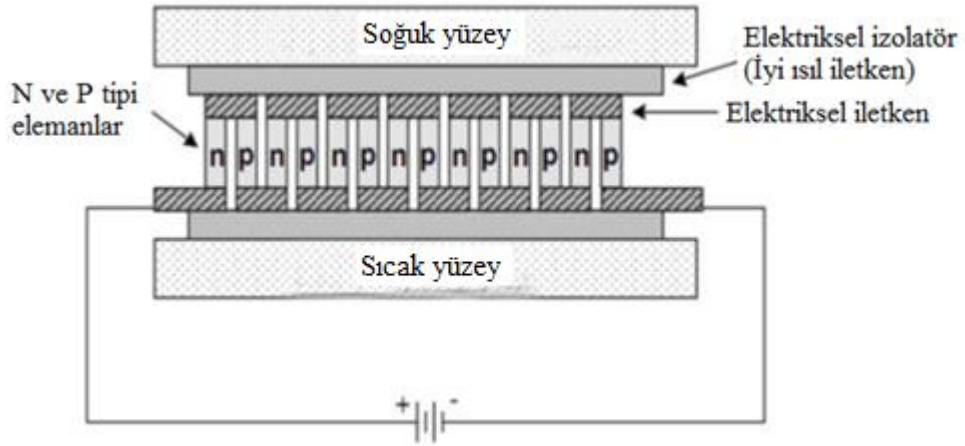


3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Termoelektrik modül

Termoelektrik; elektrik enerjisi ile ısı enerjisinin birbirleri arasındaki dönüşümü olarak bilinmektedir. Termoelektriksel olay Joule yasası, Seebeck etkisi, Peltier etkisi ve Thomson etkisi olarak özetlenebilir. Bir TEJ modül N ve P tipi yarıiletkenlerden oluşmuş yüzlerce termoelementin birleşmesi ile meydana gelmektedir. Bu termoelementler elektriksel olarak seri ve termal olarak da paralel birleştirilerek farklı amaçlar için farklı (e-Journal of New World Sciences Academy Technological Applied Sciences, 2A0044, 5, (2), 131-143. Yavuz, C., Özkaymak, M. ve Kaya, M. 134) özelliklerde TEJ modüller elde edilmesi mümkündür. TEJ modüller soğutmada ve ısıtmada kullanımlarının yanında, enerji üretilmesinde de kullanılmaktadır. TEJ modülün yüzeylerinin arasında istenilen sıcaklık farkı elde edilebilirse, modülde oluşan Seebeck etkisi neticesinde modül, bir doğru akım güç kaynağı gibi davranır ve sisteme elektrik enerjisi verir. Termoelektrik jeneratörler mevcuttaki güneş pillerinden farklı olarak, yüksek seviyede akım ve orta seviyede gerilim üretebilmeleri mümkündür. Termoelektrik modülün yapısında elektrik akımı her N ve P tipi yarıiletkenlerin altındaki ve üstündeki tabakalar boyunca hareket etmektedir. Uygulanan elektrik akımı neticesinde hareketine devam eden elektronlar modüllerin bir yüzeyinin ısınmasını, diğer yüzeyinin de soğumasını sağlamaktadırlar (Şekil 3.1) (Kunt MA., Güneş H.).

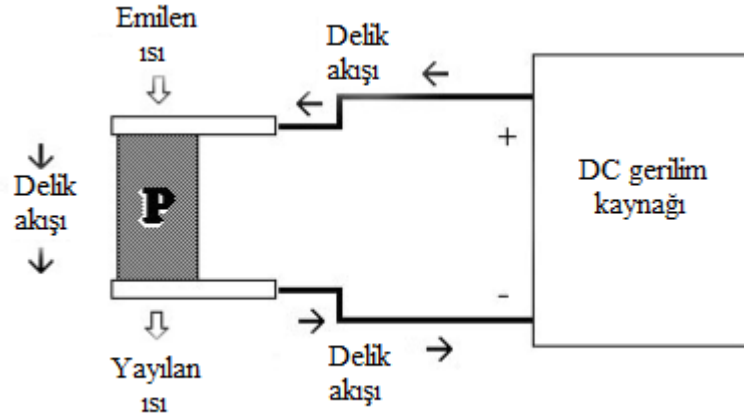


Şekil 3.1. Termoelektrik modülün yapısı.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi Termoelektrik modül elektriksel izolatör yüzeyler P ve N yarı iletkenlerinin seri bağlanması ile meydana getirilmiştir. Elektronlar negatif uçtan pozitif uca doğru hareket eder. Elektronların hareket yönünün tersi elektrik akımının yönü olarak belirlenmiştir. Bir diğer ifade şekliyle elektron boşluklarının (delikler) hareket yönü elektrik akımının da yönü olarak kabul edilmiştir (Atalay, 2010).

P tipi elemanda (Şekil 3.2);

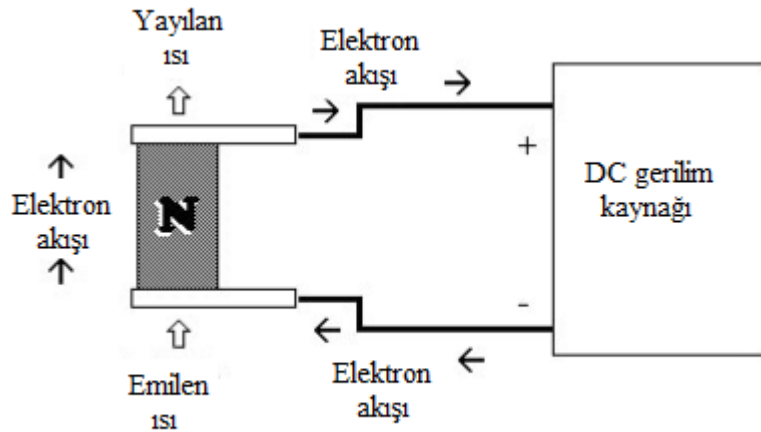
- Elektrik akımı elektron boşlukları tarafından taşınır.
- Isı akış yönü, elektron boşluklarının (delikler) hareket yönü ile aynı yöndedir.
- N tipi yarı iletken ile seri bağlanınca ısı ters yönde akar.



Şekil 3.2. P tipi eleman çalışma şeması.

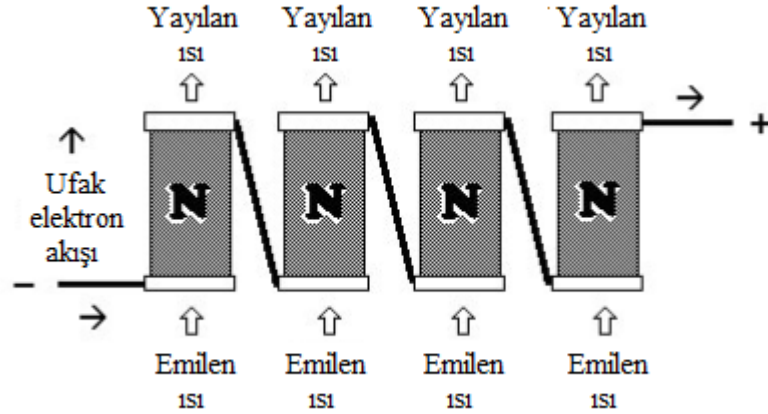
N tipi elemanda (Şekil 3.3);

- Serbest elektronlar hareket ederken, ısıyı da beraberlerinde taşırlar.
- Isının akış yönü, elektriğin akımıyla aynı yöndedir.



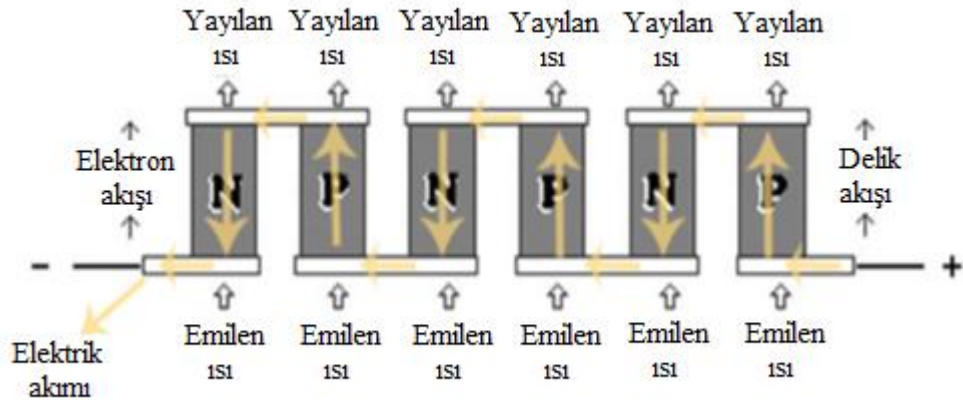
Şekil 3.3. N tipi elemanın çalışma şeması.

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de anlaşılabacağı üzere ısı akış yönü, elektrik akımı ve delik hareketi ile aynı yönlüdür. Şekil 3.4’de ısı akışını ve gerilimi artırmak için kendi içinde birden fazla eleman birbirine seri bağlanmaktadır. Isı akışı aynı yönde kalmalıdır.



Şekil 3.4. N tipi elemanın seri bağlanması.

Bağlantı kolaylığı için P ve N tipi elemanlar Şekil 3.5’de görüldüğü gibi art arda bağlanmıştır. Elektrik akımı (-) den (+)’ ya bağlantı yolunu izlerken, ısı akışının doğrultusu sürekli yukarı yönde olmaktadır.



Şekil 3.5. P-N çifti ile ısı pompalanması.

Termoelektrik modüllerin seri/paralel bağlantıları uygun yükte çalıştırıldığında, V_0 çıkış voltajı, I_0 çıkış akımı ve P_0 çıkış gücü olarak kabul edildiğinde; V_0 çıkış gerilimi, eşitlik 3.1’de, I_0 çıkış akımı, eşitlik 3.2’de, P_0 çıkış gücü eşitliği de 3.3’deki eşitliklerle hesaplanır.

$$V_0 = \frac{\alpha N(T_{sc} - T_{sg})}{\frac{1+2rL_{sq}}{L}} \quad (3.1)$$

$$I_0 = \frac{\alpha A (T_{sc} T_{sg})}{2p(L+n) \left(\frac{1+2rLsg}{L} \right)} \quad (3.2)$$

$$P_0 = \frac{\alpha^2}{2p} * \frac{NA}{(L+n) \left(\frac{1+2rLsg}{L} \right)} * (T_{sc} - T_{sg})^2 \quad (3.3)$$

Burada $n = \left(\frac{2 * p_c}{p} \right)$, $r = \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)$ ve α Termoelektrik malzeme Seebeck katsayısı (V/K), elektriksel direnç (Ω/cm), p_c elektriksel temas direnci, N modüldeki termoelement sayısı, A termoelement kesit alanı (mm^2), L termoelement uzunluğu, L_{sg} katman kalınlığı (mm), T_{sc} Sıcak yüzey sıcaklığı, T_{sg} Soğuk yüzey sıcaklığı, λ termoelement ısı iletkenliği, λ_c temas yüzey ısı iletkenliğidir (Eakburanawat ve Boonyaroonate, 2006).

3.2. Yöntem

Bu deney düzeneği ile motorun yüksüz durumdaki atık ısı performansı araştırılmıştır. Deney yapılan her bir motor hızında egzoz sıcaklık değişimine bağlı olarak yüzey sıcaklığı, yüklü-yüksüz gerilim, güç, iç direnç ve termik verim değişimleri incelenmiştir. Ayrıca teorik ve deneysel performans karşılaştırması yapılmış, standart bir binek araç bataryasını şarj edebilecek termoelektrik modül sayısı ve maliyet analizi yapılmıştır.

3.2.1. Matematiksel model

Ticari olarak üretimde bulunan firmalar üretilen TEJ'lerde soğuk yüzey sıcaklığı (T_{sg}) sıcak yüzey sıcaklığı (T_{sc}) maksimum güç ($P_{\max}$) gibi parametrelerini belirtirler. Maksimum gücün elde edilmesinde TEJ iç direnci R, yük karşılaşmasındaki ($R_L=R$) yük gerilimi $V_{\max}(=VR)$ ve maksimum verimlilik ($\eta_{\max}$) öne çıkar. Bu verilen değerlerle devrenin elektriksel parametreleri hesaplanabilir. Kullanılacak bir TEM için verimliliğin yüksek olmasında; büyük Seebeck sabiti α , düşük elektriksel direnç R ve düşük termal iletkenlik (κ_{th}) değerleri etkindir. Termoelektrik jeneratörlerde sıcak bölge ısısı (Q_h), soğuk bölge ısısı (Q_c), elektriksel güç (P_e) ve açık devre gerilimi (V_{adg}) aşağıda verilen bağıntılarla ifade edilmektedir (Hun, S.H. , Yun, H.K.; Seo, Y.K., Sukkee, U.; Jae, M.H.).

$$Q_{sc} = 2\alpha I T_{sc} + \frac{2kA}{\ell} \Delta T - \frac{1}{2} I^2 \frac{2\rho\ell}{A} \quad (3.4)$$

$$Q_{sg} = 2\alpha I T_{sg} + \frac{2kA}{\ell} \Delta T + \frac{1}{2} I^2 \frac{2\rho\ell}{A} \quad (3.5)$$

$$P_e = Q_{sc} - Q_{sg} = 2\alpha I \Delta T - I^2 \frac{2\rho\ell}{A} \quad (3.6)$$

$$V_{ocv} = \alpha \Delta T \quad (3.7)$$

Elde edilen akım değeri Ohm kanunu esas alınarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$I = \frac{V_{ocv}}{R_I + R_L} = \frac{\alpha A \Delta T}{\rho \ell (1+m)} \quad (3.8)$$

(3.8) no'lu eşitlikte gösterilen “m” simgesi yük direncinin (R_L) elektriksel iç direncine (R_I) oranıdır. (3.8) no'lu eşitlik (3.6) no'lu eşitliğin içerisine yazıldığında elektriksel güç aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$P_e = \frac{2Nm\alpha^2 \Delta T^2 A}{\rho \ell (1+m)^2} \quad (3.9)$$

Maksimum elektriksel gücün elde edilebilmesi için $m=1$ durumunun sağlanması gerekmektedir. Elde edilen yüklü gerilim;

$$V = \frac{P_e}{I} = 2N \left(\frac{m}{1+m} \right) \alpha \Delta T \quad (3.10)$$

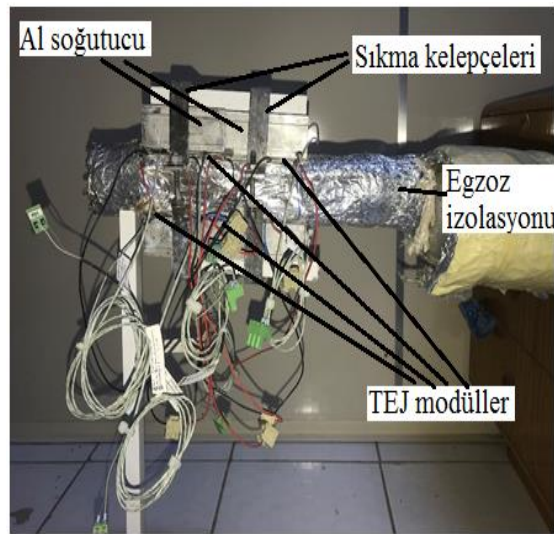
Pelet ve seramik yüzeyler arasındaki bağlantı, bağlantı malzemelerinin seçimi, elektriksel bağlantıların durumu, termal temas kalınlıkları TEJ modüllerin performansını önemli ölçüde değiştirmektedir. Buna göre (3.9) ve (3.10) no'lu eşitlikler temas durumları göz önüne alınarak yeniden düzenlenirse akım ve elektriksel güç bağıntıları aşağıdaki gibi elde edilir (Rowe, D.M. and Min G.)

$$I = \frac{\alpha A \Delta T}{\rho \ell_m (1+m)} \quad (3.11)$$

$$P_e = \frac{2Nm\alpha^2 \Delta T^2 A}{\rho \ell_m (1+m)^2} \quad (3.12)$$

3.2.1. Deney düzeneği

Geri kazanım sisteminin ana gövdesi DKP saç profilden oluşmaktadır. TEJ' ler DKP saç profil gövde üzerine yerleştirilmiş, soğuk kısımların soğutulması amacıyla dikdörtgen kanatlı alüminyum soğutucular kullanılmıştır. Sıkma kelepçeleri kullanılarak TEJ modüller ile alüminyum soğutma kanatçıkları sistemin gövdesi üzerine monte edilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Egzoza bağlanmış deney düzeneği.

Sistemde 4 adet TEG1-199-1.4-0.5, termoelektrik modül kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan TEJ modüllerin teknik özellikleri tablo 3.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Termoelektrik jeneratörün teknik özellikleri.

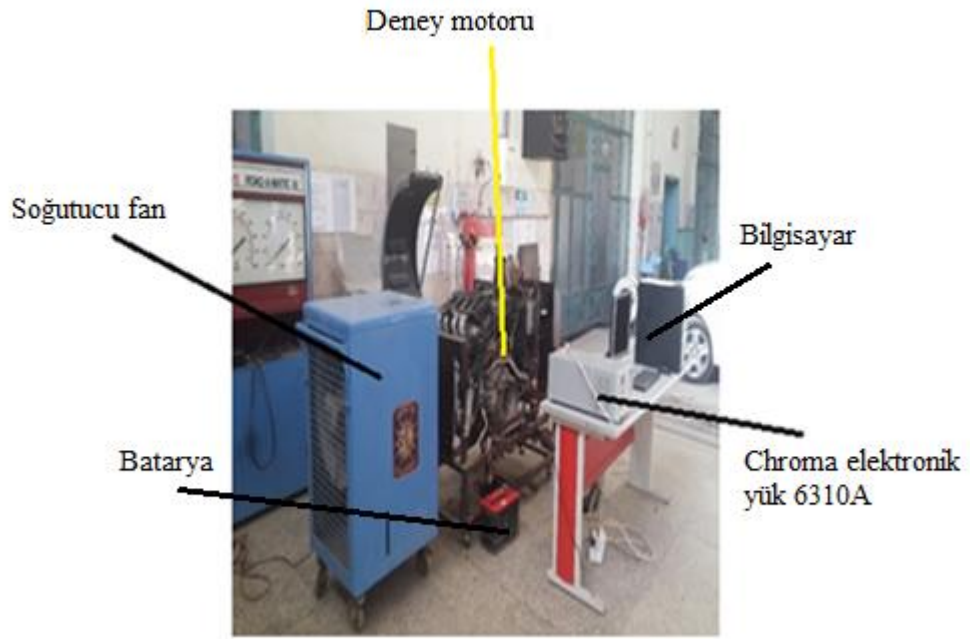
TEJ Modül	TEG1-199-1.4-0.5
Genişlik x boy x yükseklik (mm)	40x40x4,2
Açık devre voltajı (V)	11,1
Optimum yük direnci (Ω)	3,07
Yüklü maksimum çıkış voltajı (V)	5,6
Yüklü maksimum çıkış akımı (A)	1,8
Maksimum sıcak kısım sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	400
Maksimum soğuk kısım sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	200

Gövde içerisinde geçen egzoz akışkanının ısısının bir kısmı termoelektrik jeneratörlerin üzerine transfer edilirken soğuk kısım elektrikli bir fan tarafından soğutulmaktadır. Soğutma fanı olarak şasi dinamometrelerinde kullanılan SUN ROAD-A-MATIC XI kullanılmıştır. Modüllerin uçları birbirlerine seri olarak bağlanmış olup soğuk ve sıcak yüzeyler arasında oluşan sıcaklık farkı ölçüsünde elektriksel gerilim elde edilmektedir. Sıcak ve soğuk seramik yüzeylerdeki ısı transferini arttırmak için her iki yüzeye de iletken macun uygulanmıştır. Deney motoru; 2006 model 1399 cm³ 68 HP Ford Fiesta motorudur. Deney motorunun teknik özellikleri tablo 3.2’ de gösterilmiştir (Kunt MA., Dalar U.).

Çizelge 3.2. Deney motorunun teknik özellikleri.

Marka	Ford Fiesta
Motor hacmi	1,399 l
Maksimum güç	68HP/4000d/d
Maksimum tork	160Nm/1750d/d
Valf yapısı	DOHC
Silindir adedi	4
Silindir çapı	73,7 mm
Sıkıştırma oranı	17,9
Silindir başına düşen valf	4
Yakıt tipi	Dizel

Açık devre voltajı, yüklü gerilim, akım, güç değerlerinin ölçülerek kaydedilmesi ve bilgisayara kaydedilmesi için CHROMA 6310A marka elektronik yük kullanılmıştır. Sıcak ve soğuk tarafların sıcaklıklarını ölçmek için ELİMKO E-TC15-1K1PT tip termokupl kullanılmıştır. Sıcaklık ölçerler soğuk tarafta modüller ile alüminyum soğutucu arasındaki kanallara, egzoz geri kazanım sistemi giriş ve çıkışına yerleştirilmiştir. Ölçülen sıcaklık değerleri ELİMKO E680 tarayıcı cihazdan geçirilerek ölçüm bilgisayarına aktarılmıştır. Tüm ölçüm noktalarında sabit sıcaklık koşulları elde edildikten sonra ölçümler yapılmıştır. Deney düzeneğinin genel görünüşü Şekil 3.7’ te gösterilmiştir.

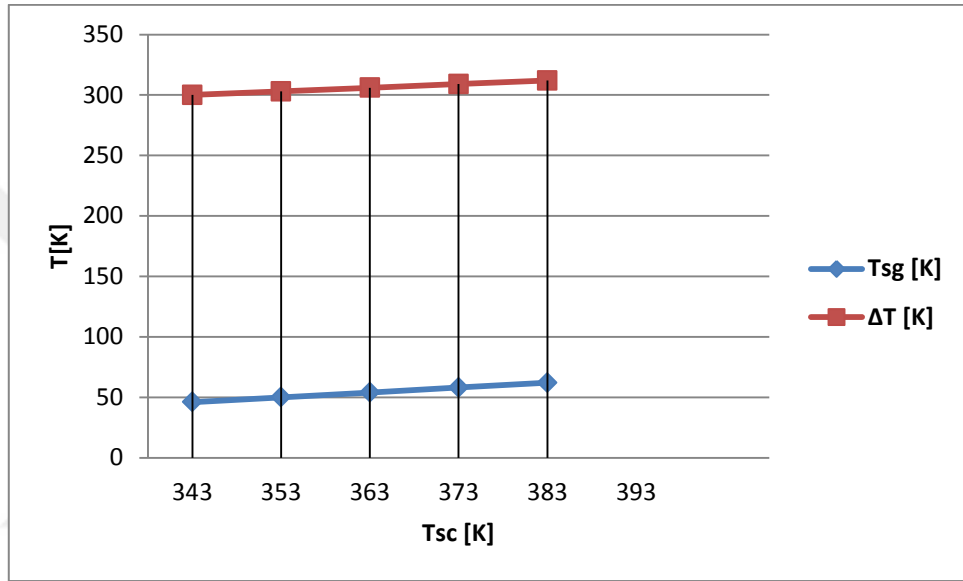


Şekil 3.7. Deney sisteminin genel görünüşü.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

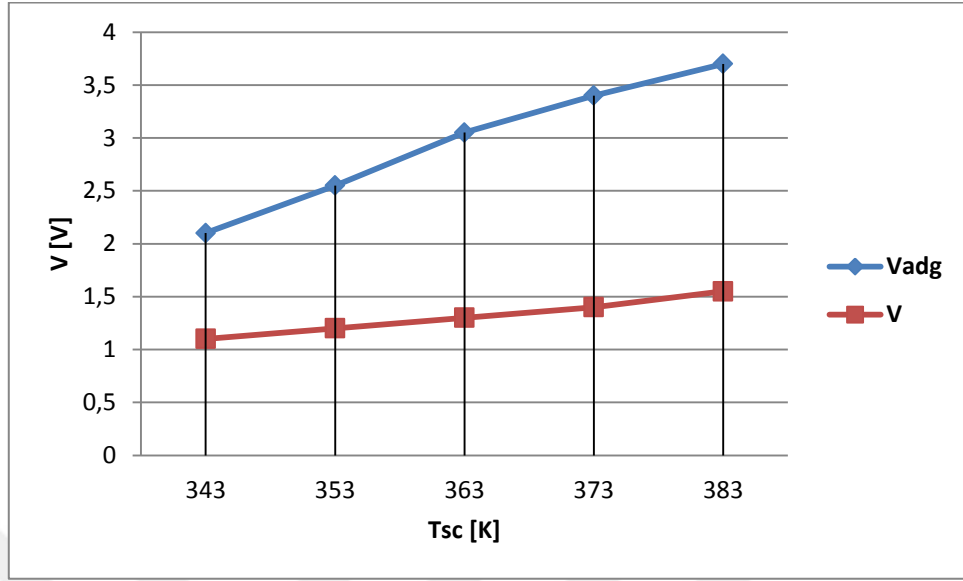
Bu bölümde kurulan deney düzeneği yardımıyla araç egzozunda oluşan ısıdan faydalanılarak termoelektrik jeneratörlerin ne düzeyde bir geri kazanım sunduğu irdelenecektir.

4.1. Deneysel Bulgular



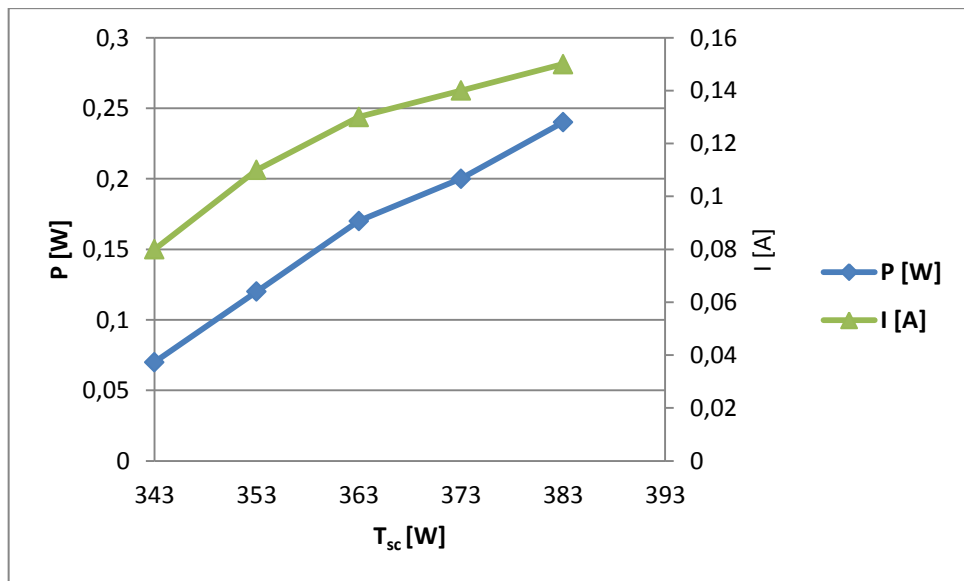
Şekil 4.1. T_{sc} sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve sıcaklık farkı değişimi (2000 d/d).

Şekil 4.1’de egzoz sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve iki yüzey arası sıcaklık farkı değişimi görülmektedir. Sabit devir sayısında motor dönerken T_s artış hızına göre T_{sg} sıcaklık artış hızı daha düşük gerçekleşmiştir. İki yüzey arasındaki sıcaklık artış hızlarının farklı olması sıcaklık farkını arttırmıştır. Deney sonuçlarına göre $T_s=383$ K sıcaklıkta $T_{sg}=313$ K ve $\Delta T=70$ K sıcaklık farkı ölçülmüştür.



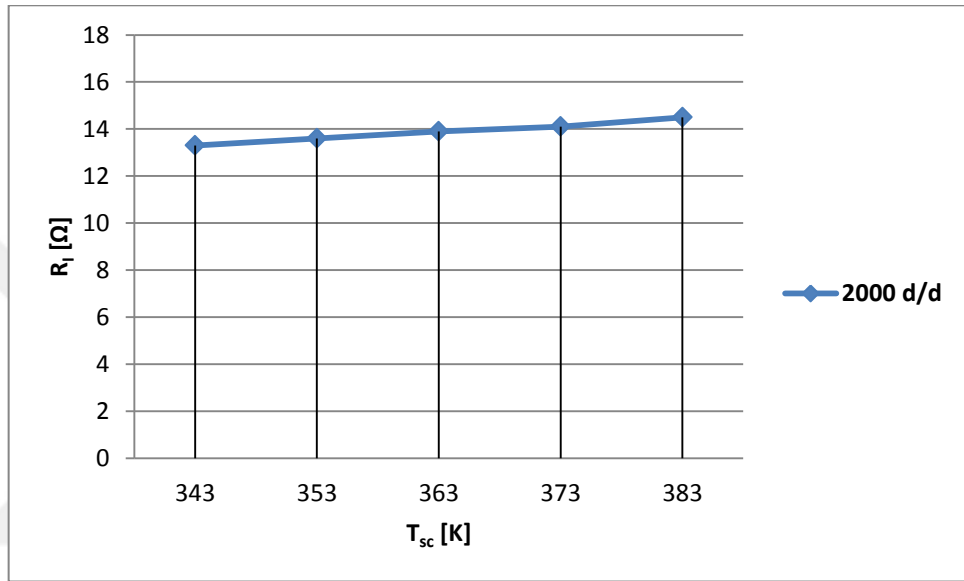
Şekil 4.2. T_{sc} sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi (2000 d/d).

Şekil 4.2’de egzoz iç sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi görülmektedir. T_{sc} sıcaklığının artmasıyla birlikte iki yüzey arasında sıcaklık farkı artmış, bunun sonucunda da V_{adg} ve V değerleri yükselmiştir. V yüklü voltaj değeri dış yük sabit tutularak elde edilmiştir. 2000 d/d motor hızında T_s=383 K sıcaklıkta maksimum V_{adg}=3,8 V ve V=1,55 V voltaj elde edilmiştir.



Şekil 4.3. T_{sc} sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi (2000 d/d).

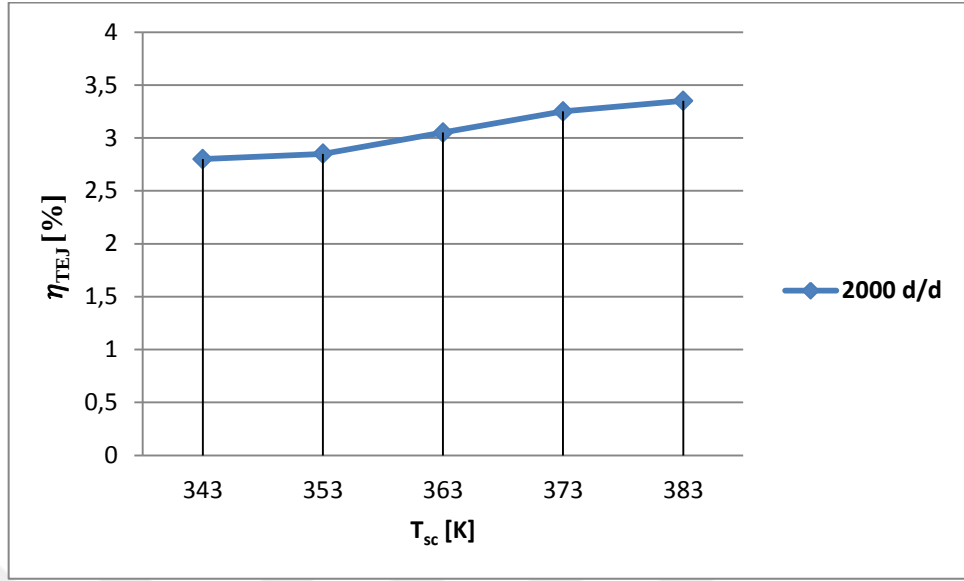
Şekil 4.3'te egzoz iç sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi görülmektedir. Egzoz sıcaklığının artması ile termoelektrik elemanların üzerinden geçen elektron miktarı artmıştır. Bu durum akım değerini ve akımın bir fonksiyonu olan gücü de arttırmıştır. En yüksek akım ve güç değerleri $T_{sc} = 383$ K egzoz sıcaklığında $I = 0,154$ A, $P = 0,239$ W güç elde edilmiştir.



Şekil 4.4. T_{sc} sıcaklığına bağlı iç direnç değişimi (2000 d/d).

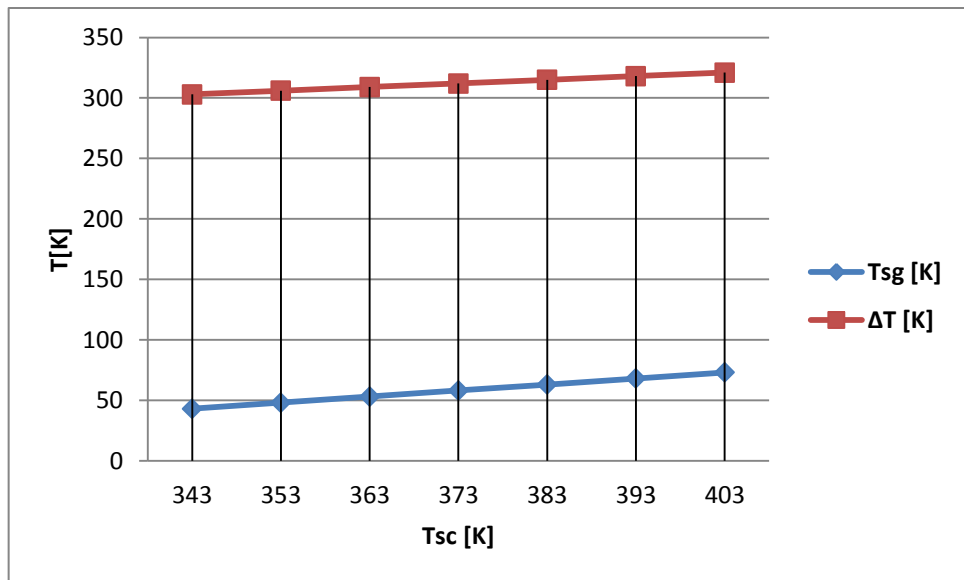
Şekil 4.4'te T_{sc} sıcaklığına bağlı modül iç direnç değişimi görülmektedir. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte modül iç direnci de artmıştır. İç direnç ($R_i = (V_{adg} - V)/I$)

yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akımın bir fonksiyonudur. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akım değerleri artmıştır. Ancak gerilimler arası farkın artış hızı akım artış hızından daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak iç direnç artmaktadır. 2000 d/d motor hızında en yüksek direnç 383 K egzoz sıcaklığında 14,61 Ω olarak gerçekleşmiştir.



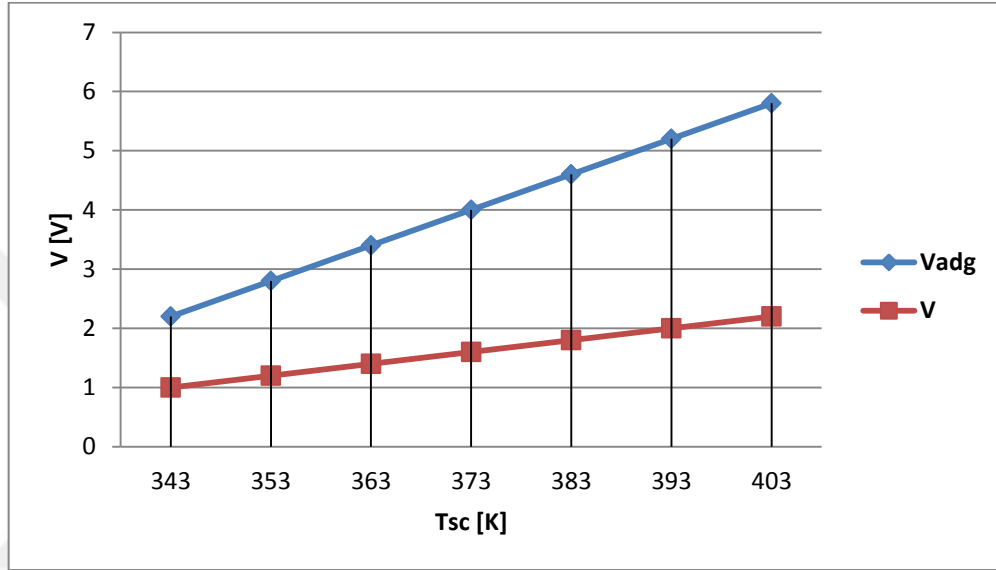
Şekil 4.5. T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi (2000 d/d).

Şekil 4.5'te T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi görülmektedir. Verim ($\eta = P/Q_{sc}$) elde edilen gücün sistemden geçen ısı güce oranıdır. T_{sc} sıcaklığının artmasıyla birlikte geri kazanım sisteminin verimi de artmaktadır. 2000 d/d motor hızında en yüksek verim 383 K sıcaklıkta %3,3 olarak elde edilmiştir.



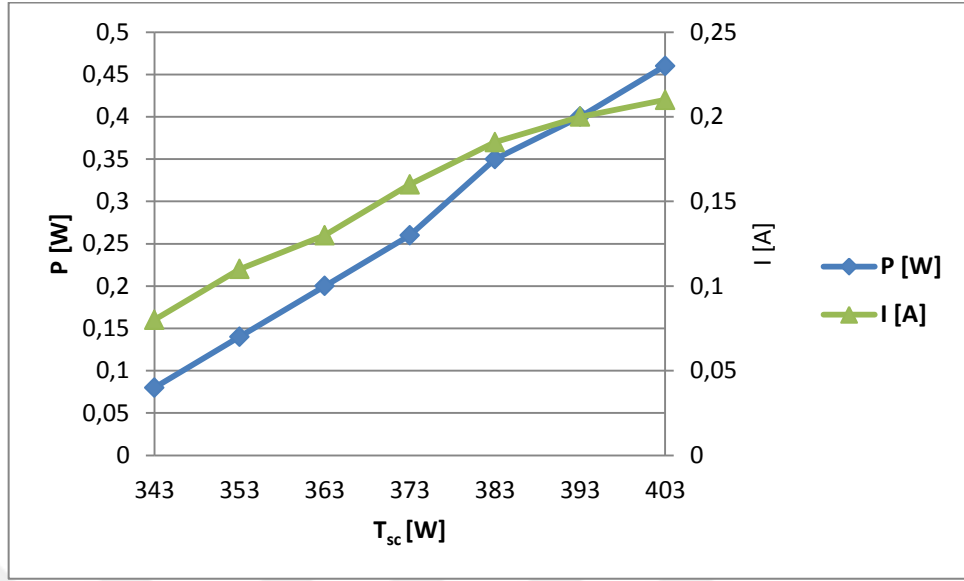
Şekil 4.6. T_{sc} sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve sıcaklık farkı değişimi (2500 d/d).

Şekil 4.6'da egzoz sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve iki yüzey arası sıcaklık farkı değişimi görülmektedir. Sabit devir sayısında motor dönerken T_{sc} artış hızına göre T_{sg} sıcaklık artış hızı daha düşük gerçekleşmiştir. İki yüzey arasındaki sıcaklık artış hızlarının farklı olması sıcaklık farkını arttırmıştır. Deney sonuçlarına göre $T_s=403$ K sıcaklıkta $T_{sg}=324$ K ve $\Delta T=78,8$ K sıcaklık farkı ölçülmüştür.



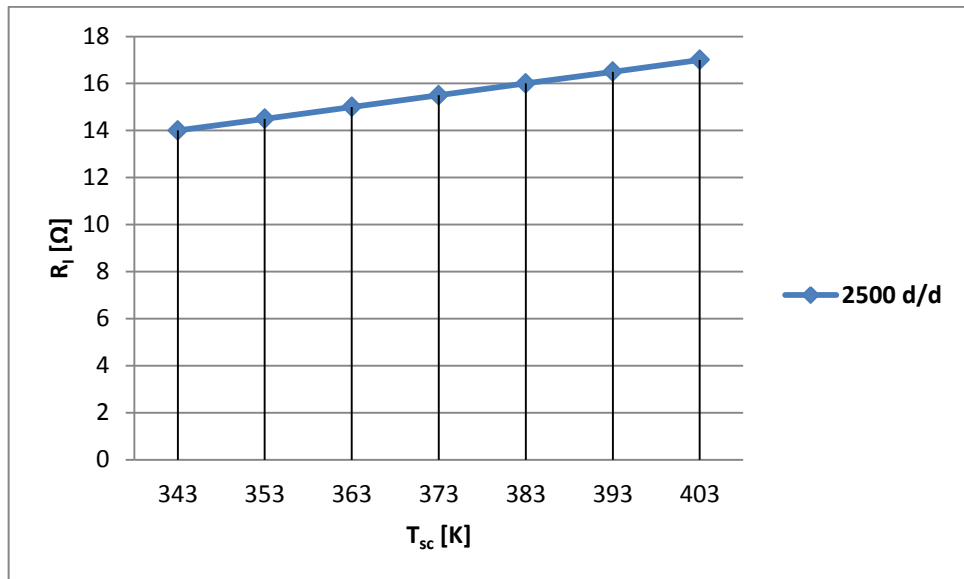
Şekil 4.7. T_{sc} sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi (2500 d/d).

Şekil 4.7'de egzoz iç sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi görülmektedir. T_{sc} sıcaklığının artmasıyla birlikte iki yüzey arasında sıcaklık farkı artmış, bunun sonucunda da V_{adg} ve V değerleri yükselmiştir. V yüklü voltaj değeri dış yük sabit tutularak elde edilmiştir. 2500 d/d motor hızında $T_{sc}=403$ K sıcaklıkta maksimum $V_{adg}=5,5$ V ve $V=2,15$ V voltaj elde edilmiştir.



Şekil 4.8. T_{sc} sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi (2500 d/d).

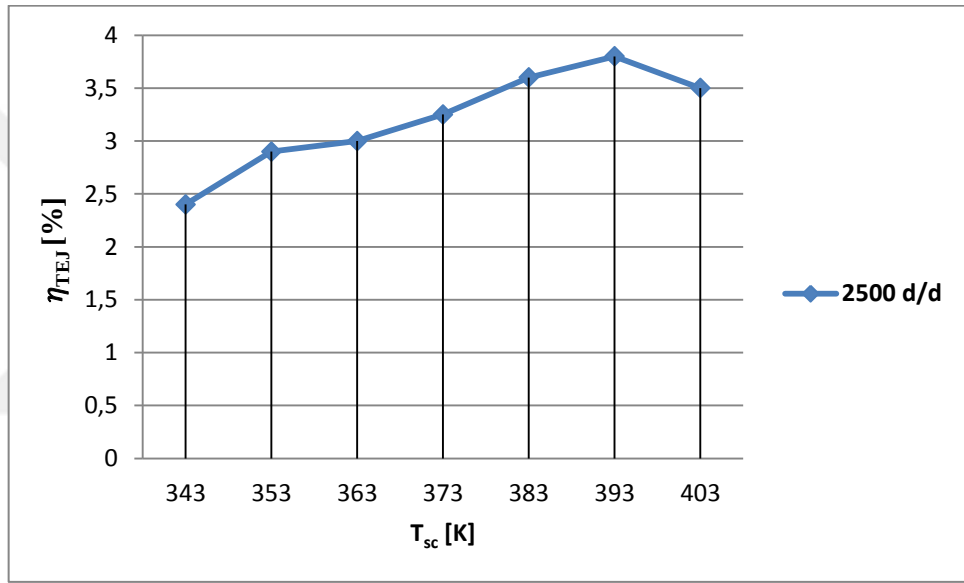
Şekil 4.8’de egzoz iç sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi görülmektedir. Egzoz sıcaklığının artması ile termoelektrik elemanların üzerinden geçen elektron miktarı artmıştır. Bu durum akım değerini ve akımın bir fonksiyonu olan gücü de arttırmıştır. En yüksek akım ve güç değerleri 403 K egzoz sıcaklığında I=0,212 A, P=0,455 W güç elde edilmiştir.



Şekil 4.9. T_{sc} sıcaklığına bağlı iç direnç değişimi (2500 d/d).

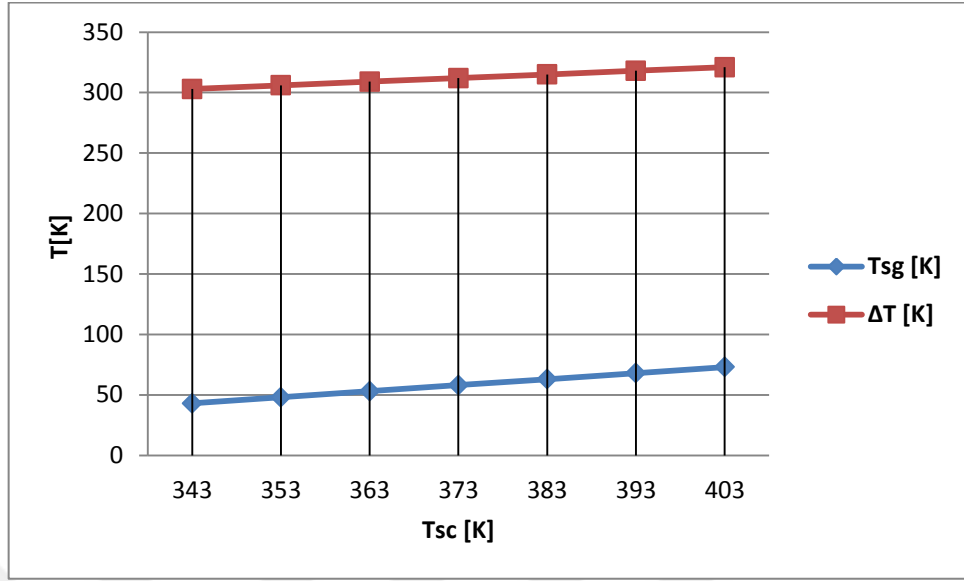
Şekil 4.9'da T_{sc} sıcaklığına bağlı modül iç direnç değişimi görülmektedir. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte modül iç direnci de artmıştır. İç direnç ($R_I = (V_{adg} - V)/I$)

yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akımın bir fonksiyonudur. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akım değerleri artmıştır. Ancak gerilimler arası farkın artış hızı akım artış hızından daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak iç direnç artmaktadır. 2500 d/d motor hızında en yüksek direnç 403 K egzoz sıcaklığında 16,55 Ω olarak gerçekleşmiştir.



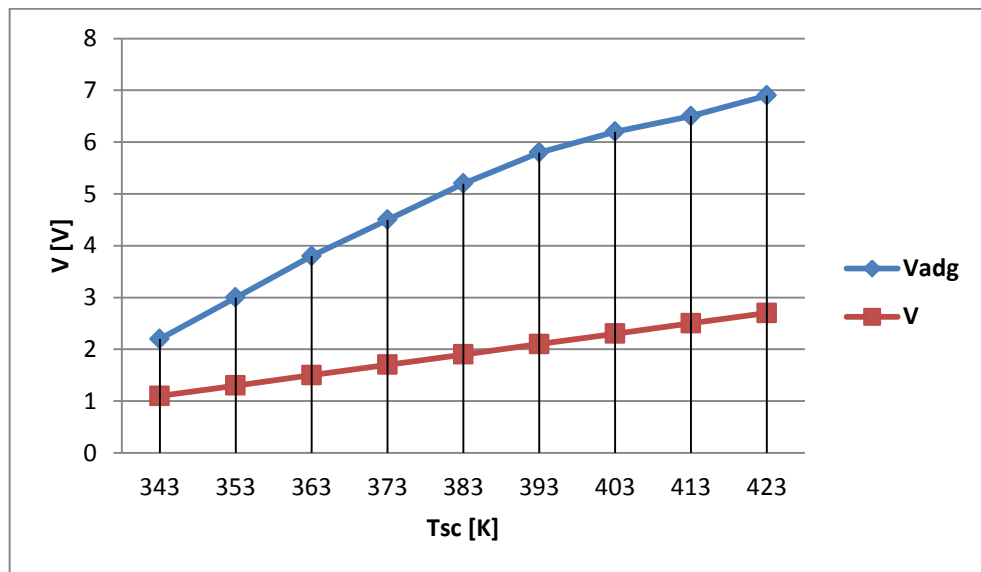
Şekil 4.10. T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi (2500 d/d).

Şekil 4.10'da T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi görülmektedir. Verim ($\eta = P/Q_{sc}$) elde edilen gücün sistemden geçen ısı güce oranıdır. T_{sc} sıcaklığının artmasıyla birlikte geri kazanım sisteminin verimi de artmaktadır. 2500 d/d motor hızında en yüksek verim 403 K sıcaklıkta %3,50 olarak elde edilmiştir.



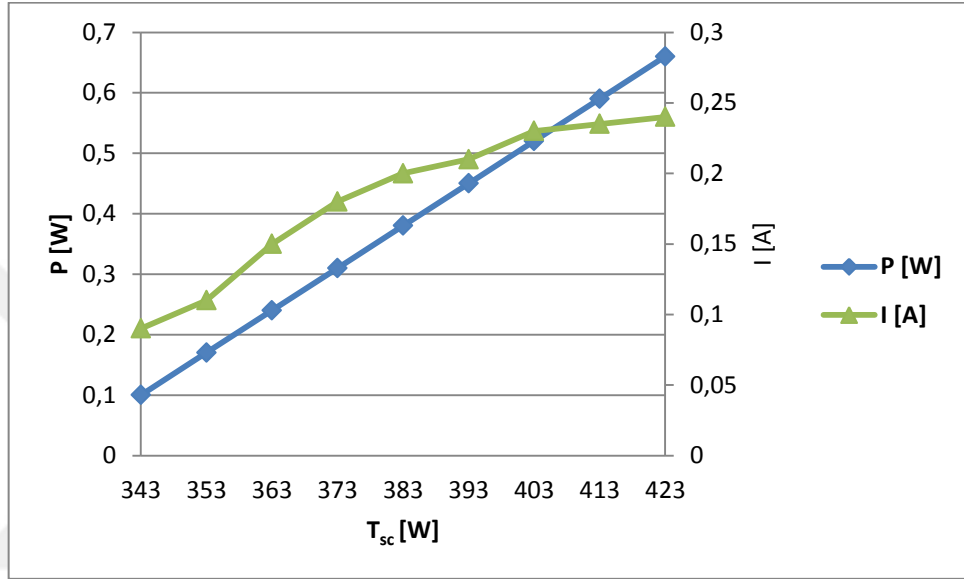
Şekil 4.11. T_{sc} sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve sıcaklık farkı değişimi (3000 d/d).

Şekil 4.11'de egzoz sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve iki yüzey arası sıcaklık farkı değişimi görülmektedir. Sabit devir sayısında motor dönerken T_{sc} artış hızına göre T_{sg} sıcaklık artış hızı daha düşük gerçekleşmiştir. İki yüzey arasındaki sıcaklık artış hızlarının farklı olması sıcaklık farkını arttırmıştır. Deney sonuçlarına göre T_{sc} =423 K sıcaklıkta T_{sg}=335,2 K ve ΔT=88 K sıcaklık farkı ölçülmüştür.



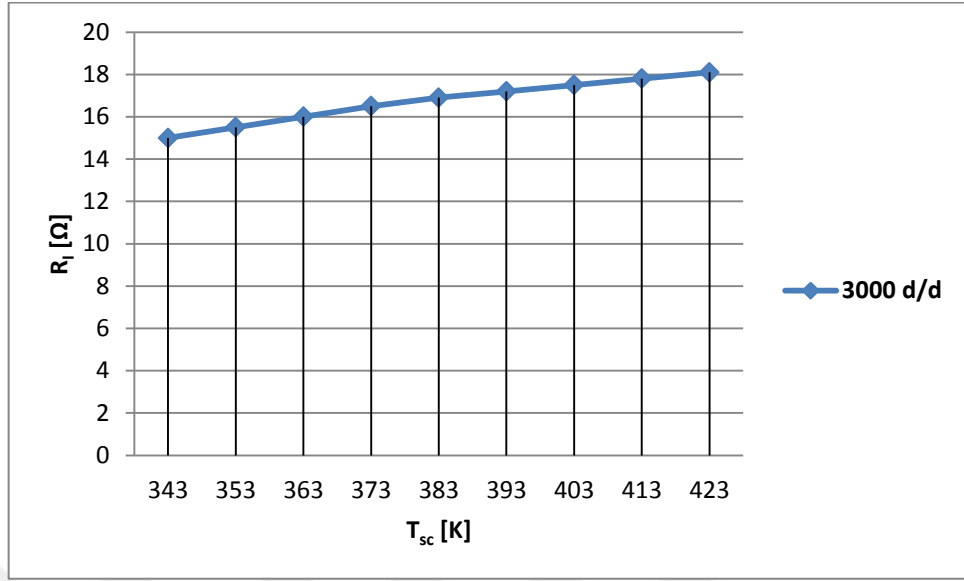
Şekil 4.12. T_{sc} sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi (3000 d/d).

Şekil 4.12’de egzoz iç sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi görülmektedir. T_{sc} sıcaklığının artmasıyla birlikte iki yüzey arasında sıcaklık farkı artmış, bunun sonucunda da V_{adg} ve V değerleri yükselmiştir. V yüklü voltaj değeri dış yük sabit tutularak elde edilmiştir. 3000 d/d motor hızında $T_s=423$ K sıcaklıkta maksimum $V_{adg}=6,3$ V ve $V=2,55$ V voltaj elde edilmiştir.



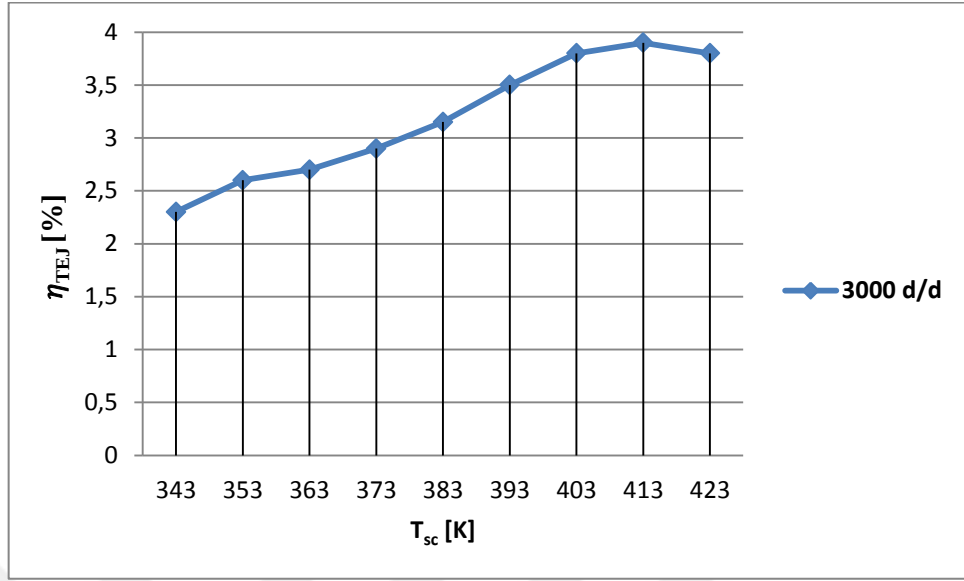
Şekil 4.13. T_{sc} sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi (3000 d/d).

Şekil 4.13’te egzoz iç sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi görülmektedir. Egzoz sıcaklığının artması ile termoelektrik elemanların üzerinden geçen elektron miktarı artmıştır. Bu durum akım değerini ve akımın bir fonksiyonu olan gücü de arttırmıştır. En yüksek akım ve güç değerleri 423 K egzoz sıcaklığında $I=0,249$ A, $P=0,635$ W güç elde edilmiştir.



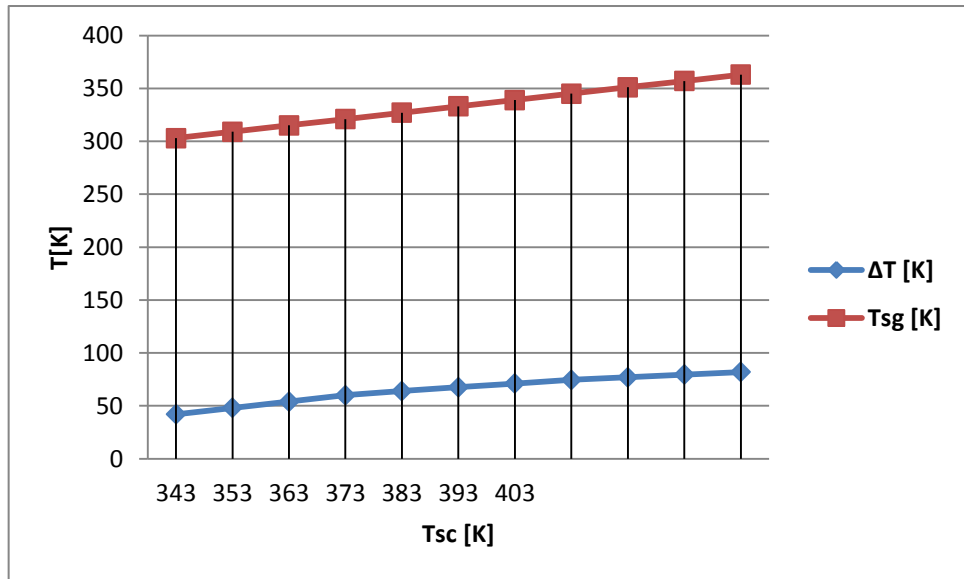
Şekil 4.14. T_{sc} sıcaklığına bağlı iç direnç değişimi (3000 d/d).

Şekil 4,14'de T_{sc} sıcaklığına bağlı modül iç direnç değişimi görülmektedir. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte modül iç direnci de artmıştır. İç direnç ($R_I = \frac{(V_{adg} - V)}{I}$) yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akımın bir fonksiyonudur. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akım değerleri artmıştır. Ancak gerilimler arası farkın artış hızı akım artış hızından daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak iç direnç artmaktadır. 3000 d/d motor hızında en yüksek direnç 423 K egzoz sıcaklığında 17,35 Ω olarak gerçekleşmiştir.



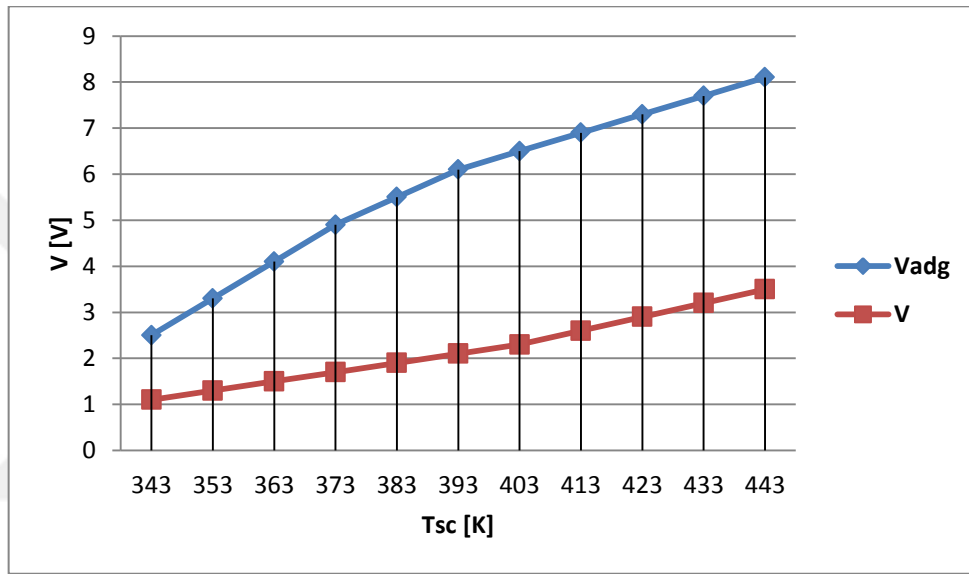
Şekil 4.15. Tsc sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi (2500 d/d).

Şekil 4.15'te T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi görülmektedir. Verim ($\eta = P/Q_{sc}$) elde edilen gücün sistemden geçen ısı güce oranıdır. T_{sc} sıcaklığının artmasıyla birlikte geri kazanım sisteminin verimi de artmaktadır. 3000 d/d motor hızında en yüksek verim 423 K sıcaklıkta %3,93 olarak elde edilmiştir.



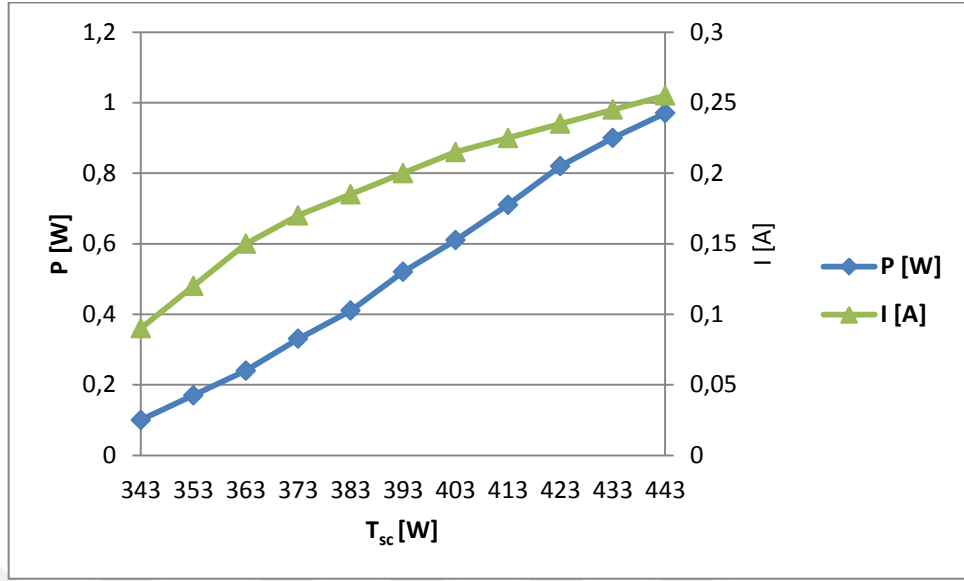
Şekil 4.16. T_{sc} sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve sıcaklık farkı değişimi (3500 d/d).

Şekil 4.16'de egzoz sıcaklığına bağlı soğuk yüzey ve iki yüzey arası sıcaklık farkı değişimi görülmektedir. Sabit devir sayısında motor dönerken T_{sc} artış hızına göre T_{sg} sıcaklık artış hızı daha düşük gerçekleşmiştir. İki yüzey arasındaki sıcaklık artış hızlarının farklı olması sıcaklık farkını arttırmıştır. Deney sonuçlarına göre $T_{sc}=443$ K sıcaklıkta $T_{sg}=356$ K ve $\Delta T=86,7$ K sıcaklık farkı ölçülmüştür.



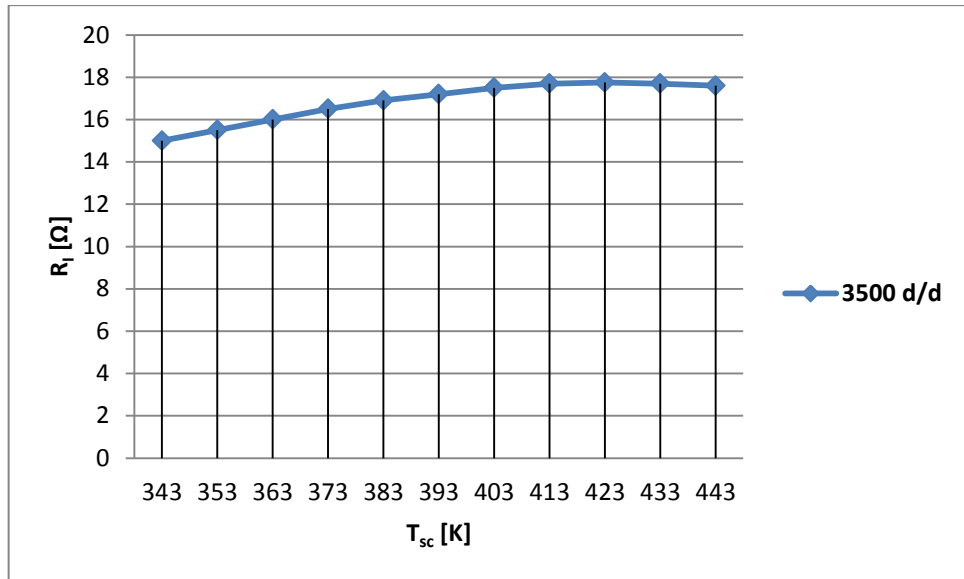
Şekil 4.17. T_{sc} sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi (3500 d/d).

Şekil 4.17'de egzoz iç sıcaklığına bağlı açık devre voltajı ve yüklü voltaj değişimi görülmektedir. T_s sıcaklığının artmasıyla birlikte iki yüzey arasında sıcaklık farkı artmış, bunun sonucunda da V_{adg} ve V değerleri yükselmiştir. V yüklü voltaj değeri dış yük sabit tutularak elde edilmiştir. 3500 d/d motor hızında $T_{sc}=443$ K sıcaklıkta maksimum $V_{adg}=8,28$ V ve $V=3,25$ V voltaj elde edilmiştir.



Şekil 4.18. T_{sc} sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi (3500 d/d).

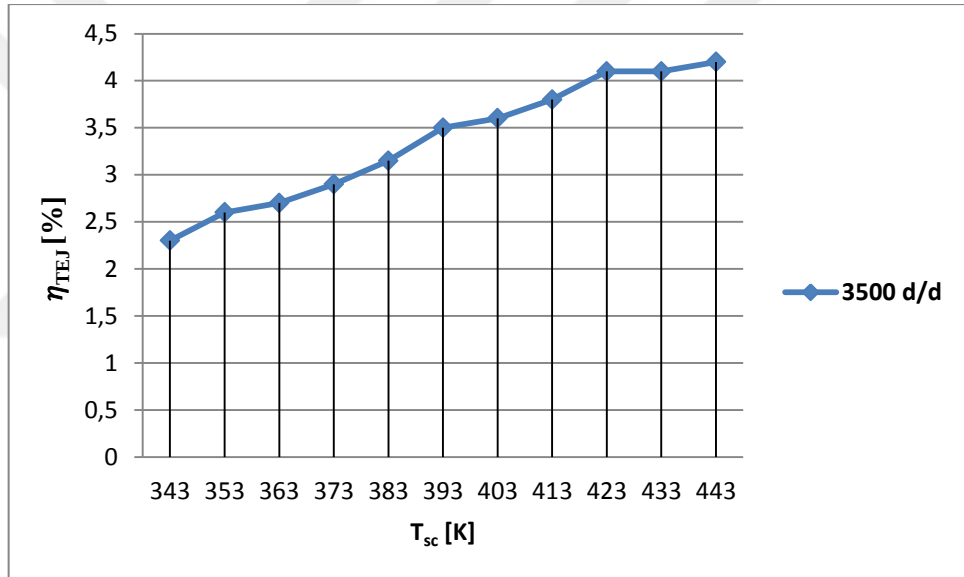
Şekil 4.18'de egzoz iç sıcaklığına bağlı güç ve akım değişimi görülmektedir. Egzoz sıcaklığının artması ile termoelektrik elemanların üzerinden geçen elektron miktarı artmıştır. Bu durum akım değerini ve akımın bir fonksiyonu olan gücü de arttırmıştır. En yüksek akım ve güç değerleri 443 K egzoz sıcaklığında I=0,289 A, P=0,940 W güç elde edilmiştir.



Şekil 4.19. T_{sc} sıcaklığına bağlı iç direnç değişimi (3500 d/d).

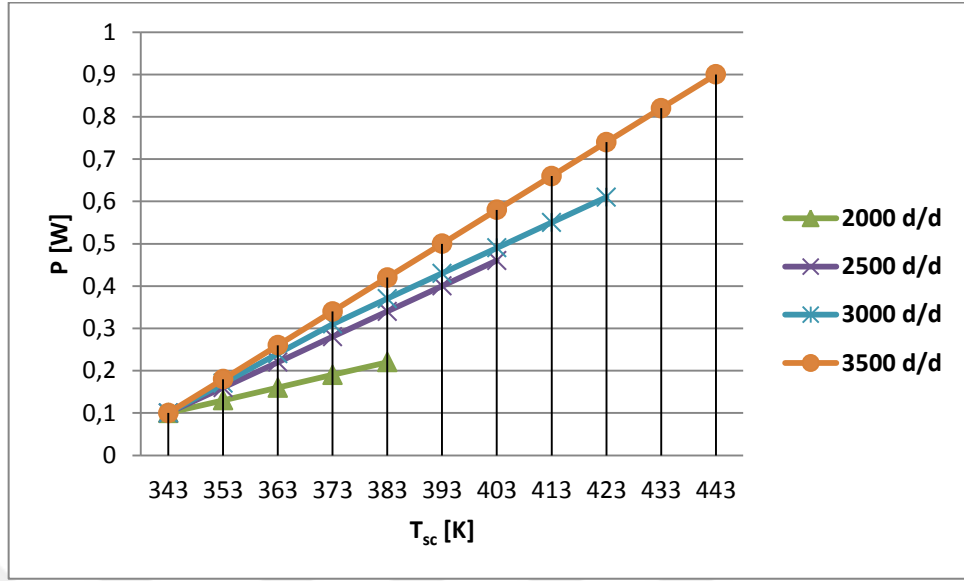
Şekil 4.19'da T_{sc} sıcaklığına bağlı modül iç direnç değişimi görülmektedir. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte modül iç direnci de artmıştır. İç direnç ($R_I = (V_{adg} - V)/I$)

yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akımın bir fonksiyonudur. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akım değerleri artmıştır. Ancak gerilimler arası farkın artış hızı akım artış hızından daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak iç direnç artmaktadır. 3500 d/d motor hızında en yüksek direnç 443 K egzoz sıcaklığında 17,4 Ω olarak gerçekleşmiştir.



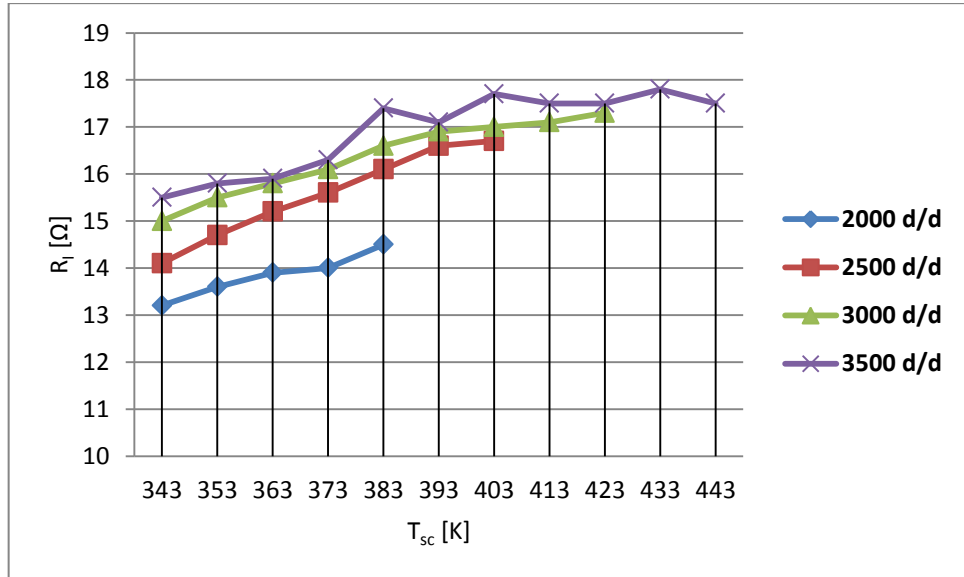
Şekil 4.20. T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi (3500 d/d).

Şekil 4.20'de T_{sc} sıcaklığına bağlı sistem veriminin değişimi görülmektedir. Verim ($\eta = P/Q_{sc}$) elde edilen gücün sistemden geçen ısı güce oranıdır. T_{sc} sıcaklığının artmasıyla birlikte geri kazanım sisteminin verimi de artmaktadır. 3500 d/d motor hızında en yüksek verim 443 K sıcaklıkta %4,21 olarak elde edilmiştir.



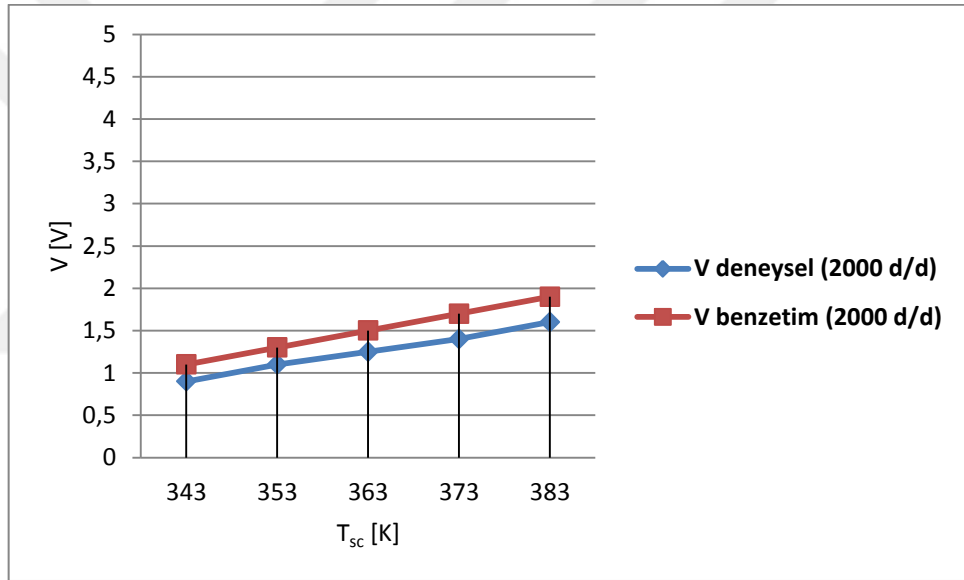
Şekil 4.21. T_{sc} sıcaklığına bağlı farklı motor hızlarına göre güç değişimi.

Şekil 4.21’de egzoz iç sıcaklığına bağlı g ve akım değişimi görülmektedir. Egzoz sıcaklığının artması ile termoelektrik elemanların üzerinden geçen elektron miktarı artmıştır. Bu durum akım değerini ve akımın bir fonksiyonu olan gücü de arttırmıştır. En yüksek akım ve güç değerleri 443 K egzoz sıcaklığında 3500d/d’ da $P=0,940$ W güç elde edilmiştir.



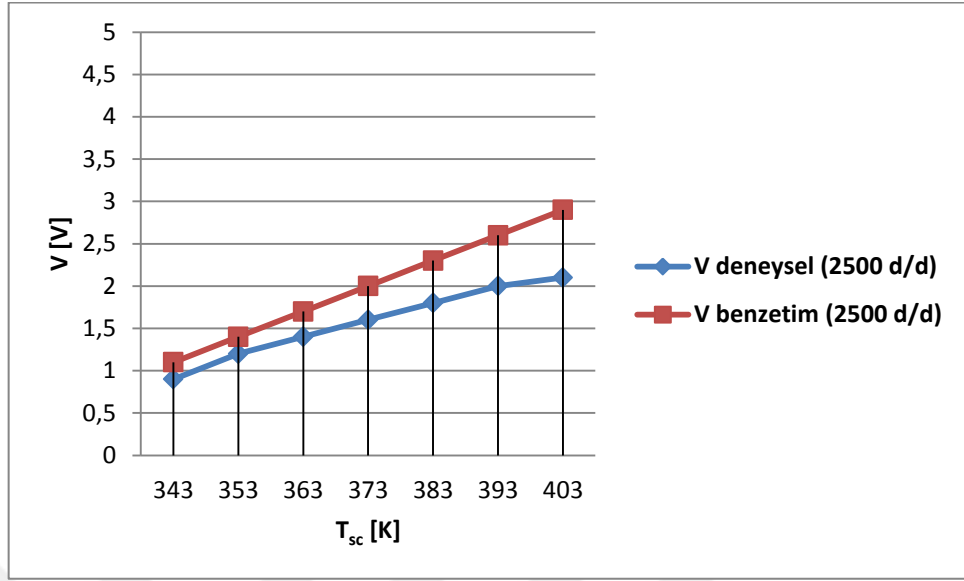
Şekil 4.22. T_{sc} sıcaklığına bağlı farklı motor hızlarına göre iç direnç değişimi.

Şekil 4.22’de T_{sc} sıcaklığına bağlı modül iç direnç değişimi görülmektedir. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte modül iç direnci de artmıştır. İç direnç ($R_I = (V_{adg} - V)/I$) yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akımın bir fonksiyonudur. Egzoz iç sıcaklığının artmasıyla birlikte yüksüz gerilim, yüklü gerilim ve akım değerleri artmıştır. Ancak gerilimler arası farkın artış hızı akım artış hızından daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak iç direnç artmaktadır. 3500 d/d motor hızında en yüksek direnç elde edilmiş olup değeri 443 K egzoz sıcaklığında $17,4 \Omega$ olarak gerçekleşmiştir.



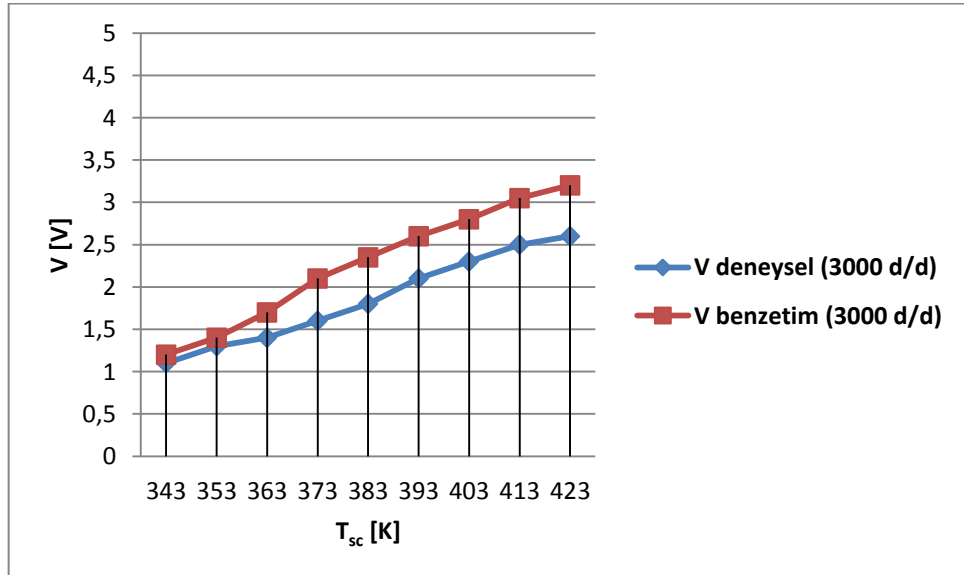
Şekil 4.23. T_{sc} sıcaklığına bağlı yüklü voltaj değişiminin karşılaştırması (2000 d/d).

Şekil 4.23’ten de görüldüğü gibi deneylerle ve hesaplamalarla bulunan sonuçlar birbirine paralel ilerlemektedir. 383 K sıcaklıkta deneysel sonuç $V=1,55$ benzetim ile bulunan sonuç $V=1,93$ aralarında %24’lük bir fark bulunmaktadır.



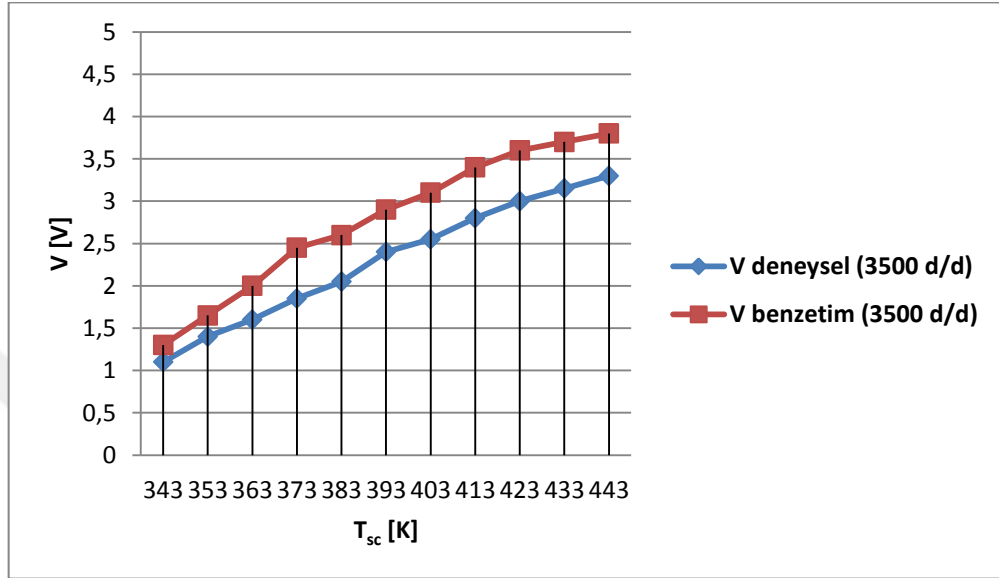
Şekil 4.24. T_{sc} sıcaklığına bağlı yüklü voltaj değişiminin karşılaştırması (2500 d/d).

Şekil 4.24' dan da görüldüğü gibi deneylerle ve hesaplamalarla bulunan sonuçlar birbirine yakın ilerlemektedir. 403 K sıcaklıkta deneysel sonuç V=2,15 benzetim ile bulunan sonuç V=2,72 aralarında %26'lık bir fark bulunmaktadır.



Şekil 4.25. T_{sc} sıcaklığına bağlı yüklü voltaj değişiminin karşılaştırması (3000 d/d).

Şekil 4.25'te görüldüğü gibi deneylerle ve hesaplamalarla bulunan sonuçlar birbirine yakın ilerlemektedir. 423 K sıcaklıkta deneysel sonuç $V=2,55$ benzetim ile bulunan sonuç $V=3,16$ aralarında %24'lük bir fark bulunmaktadır.



Şekil 4.26. T_{sc} sıcaklığına bağlı yüklü voltaj değişiminin karşılaştırması (3500 d/d).

Şekil 4.26'da görüldüğü gibi deneylerle ve hesaplamalarla bulunan sonuçlar birbirine yakın ilerlemektedir. 443 K sıcaklıkta deneysel sonuç $V=3,25$ benzetim ile bulunan sonuç $V=3,75$ aralarında %15'lik bir fark bulunmaktadır.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Motor hızının artmasıyla birlikte birim zamanda egzozdan geçen egzoz akışkan kütlesinin de artmasıyla T_{sc} modül yüzey sıcaklığı artmıştır. Modül yüzeylerinin soğuk ve sıcak yüzeyleri arasında sıcaklıkların artış hızı farklı olduğundan bu durum modül yüzeyleri arasındaki ΔT sıcaklık farkını arttırmıştır. Sıcaklık farkının artmasıyla V_{adg} gerilimi de artmıştır. Yapılan deneylerde TEG1-199 marka modülden 3500 d/d' da 4 adet modül kullanılarak maksimum 3,56 V gerilim ve 0,39 A akım elde edilmiştir. Buna göre 12V 40Ah' lik bir bataryayı şarj etmek için TEG1-199 marka modülden ise 72 adet gerekmektedir. Ayrıca 72 adet modülden 3500 d/d' da elde edilen güçten araç üzerinde bazı elektrik alıcıları da beslenebilecektir. Çıkış gerilimi-yük direnci grafiklerinde %5 akım-yük direnci grafiklerinde %7,69 bağıl hata elde edilmiştir. Termoelektrik jeneratörlerin geri kazanım performansının artmasındaki en önemli etkenlerden birisi de motor yüküdür. Kullanılan motorun dizel motor olması ve yüksüz durumda deneylerin yapılması sebebiyle elde edilen geri kazanım değerleri düşük çıkmıştır. Benzinli bir motorda farklı yük koşullarında daha fazla geri kazanım performansı elde edilecektir.

Ayrıca kullanılan alüminyum soğutucu plakanın yerine bakır plaka kullanılması değerleri daha da arttıracaktır. Bununla birlikte alüminyum soğutucu plakanın geometrisinin değiştirilmesi veya kanat yapısının değiştirilmesi de verimde olumlu sonuçlar doğurabilir. Bunlar sonraki aşamada yapılabilecekler olup burada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri egzozun ortamdaki iyice yalıtılması gerekesidir. Bu yapıldığında egzozdaki ısı kayıpları azalacak ve daha yüksek verim elde edilebilecektir.

Araçta bulunan aydınlatma parçalarının tüketim değerleri daha düşük olduğundan daha az miktarda modül ile aydınlatma ihtiyacı karşılanabilmektedir. Çizelge 5.1 Araçta bulunan aydınlatma elemanları güç değerleri verilmiştir. Buna göre tepe, plaka, gösterge lambaları ve iç lambaların birkaç modül ile ihtiyacı karşılanabilmektedir.

Ayrıca alternatörlerin araç aküsünü şarj edecek gerekli gücü elde etmesi için araç motorunun belirli bir devir üzerinde çalışması gerekirken, bu çalışmada incelenen sistemde aracın devrinden bağımsız güç elde edilmektedir. Kış aylarında hava sıcaklığı düşük olduğunda sistemin ihtiyaç duyduğu sıcaklık farkı da artacak ve sistem daha verimli çalışacaktır. Alternatörler gücünü bir kayış yardımıyla motordan almaktadır ancak çalışmada incelenen

sistem gücünü motordan sağlamadığından motor için bir yük teşkil etmemektedir. Bu nedenle termoelektrik jeneratör modülü egzoz gazlarının ısısından ürettiği elektrik ile alternatör tarafından üretilen elektrik gücünün önemli bir bölümünü karşıladığından dolayı taşıtların yakıt tüketimini azaltacaktır. Otomobil üzerinde elektrik üretimi için harcanan enerji miktarı ortadan kaldırılabiliirse toplam yakıt tüketimi %10 azalacaktır.

Çizelge 5.1. Araçta bulunan aydınlatma elemanları güç değerleri (Megep, 2010).

Yük	Güç
Gösterge lambaları	0,5-1,5 W
Plaka, park, iç, tepe lambaları	3-5 W
Sinyal, geri vites, fren lambaları	21-32 W

Çizelge 5.2. Araç batarya şarjı için TEJ ve alternatör karşılaştırması.

Modül	Modül Sayısı	Birim Maliyet (TL)	Yakıt tüketimi (%)	Ağırlık (kg)	Elde Edilen Sarj Kapasitesi
TEG1-199	72	38	0	0,08	14,24V
Fiesta Alternatör	1	2450	10	8	12,9~14,9V

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ahıska R., Ceylan B., Savaş Y., Güler İ., (2004). Standart termoelektrik modülün Z parametresinin ölçülmesi için yeni yöntem ve sistem, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 19(4), 467-473.

Akçay H., (2015). LPG ile Çalışan Buji Ateşlemeli Bir Motorda, Egzoz ve Soğutma Sisteminde Kaybedilen Isının TEJ Modülü ile Kullanılabilir Enerjiye Dönüştürülmesi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD.

Alexander B., Boscoe A., Cabot M., Dawsey P., Barreau L.E., Griffith R., (2012). Alphabet Energy: thermoelectrics and market entry, Calif Manage Rev, 55(1).

Atalay T., (2010). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Elektrik-2 Ders Notları.

Balcı, C., (2011). Egzoz gaz enerjisiyle çalışan NH₃-H₂O absorpsiyonlu soğutma sistemiyle taşıt kabininin iklimlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Bass J.C., Elsner N.B., Leavitt F.A., (1994). Performance of the 1 kW thermoelectric generator for diesel engines. In AIP Conference Proceedings, 316(1), 295-298, AIP.

Bass J.C., Elsner N.B., Leavitt F.A., (1995). Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator. In Proc. 13th Intl. Conf. on Thermoelectrics (ICT'94), AIP Conf. Proc. 316(295).

Bass J.C., Elsner N.B., Slone R., (1991). Design study and experience with thermoelectric generators for diesel engines. In Proceedings of The Annual Automotive Technology Development Contractors Meeting. SAE, 243.

Biswas K., He J., Blum I.D., Wu C.I., Hogan T.P., Seidman D.N., David V.P., Kanatzidis M.G., (2012). Highperformance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures, Nature, 489(7416), 414–418.

Bubnova O., Crispin X., (2012), Towards polymer-based organic thermoelectric generators, Energy Environ Sci, 5(11), 9345.

Caponiti, A., (2008). Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator. Retrieved from 461 http://mars.jpl.nasa.gov/files/mep/MMRTG_Jan2008.pdf

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cleary M., (2014). Nanostructured High Temperature Bulk Thermoelectric Energy Conversion for Efficient Waste Heat Recovery. In (2014) Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082_cleary_2014_o.pdf
- Crane D.T., Bell L.E., (2006). Progress towards maximizing the performance of a thermoelectric power generator, (2006) 25th Int. Conf. Thermoelectric, 11–16.
- Crane D.T., Jackson G., Holloway D., (2001). Towards optimization of automotive waste heat recovery using thermoelectrics (No. 2001-01-1021). SAE Technical Paper.
- Crane D.T., LaGrandeur J.W., Harris F., Bell, L.E., (2009). Performance results of a high-power-density thermoelectric generator: beyond the couple. Journal of electronic materials, 38(7), 1375-1381.
- Crane D.T., LaGrveeur J.W., (2010). Progress Report on BSST-Led US Department of Energy Automotive Waste Heat Recovery Program. Journal of Electronic Materials, 39.
- Das R., (2013). The Rise of Thermoelectrics. Retrieved February 17, 2014, from Energy Harvesting Journal: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-00005925.as>
- Döşkaya H.E., (2010). Güneş enerjisi ve atık ısı kullanılarak termoelektrik modül ile deneysel elektrik üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Eakburanawat J., Boonyaroonate I., (2006). Development of a Thermoelectric Battery- Charger with Microcontroller-based Maximum Power Point Tracking Technique. Applied Energy, 83(7), 687-704.
- Eilertsen J., Subramanian M.A., Kruzic J.J., (2013). Fracture toughness of Co₄Sb₁₂ and In_{0.1}Co₄Sb₁₂ thermoelectric skutterudites evaluated by three methods, J Alloys Compd, 552, 492–498.
- El-Genk M.S., Saber H.H., Caillat T., (2003). Efficient segmented thermoelectric uncouples for space power applications, Energy Convers Manag, 44(11), 1755–1772.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Espinosa N., Lazard M., Aixala L., ve Scherrer H., (2010). "Modeling a Thermoelectric Generator Applied to Diesel Automotive Heat Recovery," J. Electron. Mater, vol. 39, p. 1446–1455.

Fagehi H., (2016). Optimal Design of Automotive Exhaust Thermoelectric Generator (AETEG).

Freedman A.P., (2011), A thermoelectric generation subsystem model for heat recovery simulations. Rochester Institute of Technology.

Gao Y., Marconnet A.M., Panzer M.A., LeBlanc S., Dogbe S., Ezzahri Y., Shaokuri A., Goodson K.E., (2010). Nanostructured interfaces for thermoelectrics, J Electron Mater, 39(9), 1456– 1462.

GMZ Energy Corporation, (2014). GMZ Energy Announces Successful Testing of a 200 Watt High Temperature Thermoelectric Generator. Press Releases. Retrieved (2014), from <http://gmzenergy.com/gmz-energy-announces-successful-testing-200-watt-high-temperature-thermoelectric-generator/>

GMZ Energy Corporation, (2014). TG16-1.0 Thermoelectric Generator Module. Retrieved (2014), from <http://gmzenergy.com/wp-content/uploads/2014/09/Datasheet-TG16-1.0-R1.3.pdf>

Godfrey S., (1996). An introduction to thermoelectric coolers, Electronics Cooling, Trenton, 2-3.

Heremans J.P., Dresselhaus M.S., Bell L.E., Morelli, D.T., (2013). When thermoelectrics reached the nanoscale. Nature Nanotechnology, 8(7), 471–3. doi:10.1038/nnano.2013.129

Hicks L., Dresselhaus M., (1993). Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit. Physical Review B, 47(19), 727–731. Retrieved from

http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf

http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ace081_meisner_2013_o.pdf

<http://www.gmzenergy.com>

<http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.47.12727>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

<http://www.power.gen.tr/makaleler/icerik.asp?id=96>, (20 Eylül 2013).

Hun, S.H. , Yun, H.K.; Seo, Y.K., Sukkee, U.; Jae, M.H., (2010). “Performance measurement and analysis of a thermoelectric power generator”, Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), IEEE Intersociety Conference on, Las Vegas, 1 – 7, (2010).

Jaegle,M., (2007). Multiphysics simulation of thermoelectric systems, Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques Heidenhofstr, Freiburg.

Jovovic V., (2014). Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. In (2014) Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from

Kapıdere M., (2005). Mikro denetleyici kontrollü termohipoterm tıp cihazı tasarımı ve gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14–26.

Kunt M.A., Güneş H., (2015) “Termoelektrik jeneratörlerin içten yanmalı motorların egzoz sistemlerinde farklı yük dirençlerinde uygulaması”, 13. Uluslararası Yanma Sempozyumu.

Kunt M.A., Köse R., Güneş H., Dalar U., (2018). “İçten Yanmalı Dizel Bir Motorun Egzoz Sisteminde Termoelektrik Jeneratör Modüllerin Farklı Motor Devirlerinde Geri Kazanım Performansının Analizi”, 14. Uluslararası Yanma Sempozyumu

LeBlanc, S., Yee, S.K., Scullin, M.L., Dames, C., Goodson, K.E., (2014). Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, 313–327.

Liu X., Deng Y.D., Li Z., Su C.Q., (2014). "Performance analysis of a waste heat recovery thermoelectric generation system for automotive application" Energy Conversion ve Management, cilt 90.

Lu X., Morelli D.T., (2013). Natural mineral tetrahedrite as a direct source of thermoelectric materials. Physical Chemistry Chemical Physics : PCCP, 15(16), 5762–5766. doi:10.1039/c3cp50920f

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Lu X., Morelli D.T., Xia Y., Zhou F., Ozolins V., Chi H., Zhou X., Uher C., (2013). High performance thermoelectricity in earth-abundant compounds based on natural mineral tetrahedrites, *Adv Energy Mater*, 3(3), 342–348.

Morelli D.T., (1996). Potential applications of advanced thermoelectrics in the automobile industry. In *Thermoelectrics, Fifteenth International Conference*, 383-386.

Özgün, H., (2009). Termoelektrik jeneratörlerin çok düşük sıcaklıklarda teorik ve deneysel karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Paik J., Brandon E., Caillat T., Ewell R., (2011). Life Testing of Yb₁₄MnSb₁₁ for High Performance Thermoelectric Couples, Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, Pasadena, CA.

Ravi V., Firdosy S., Caillat T., Lerch B., Calamino A., Pawlik R., Nathal M., Sechrist A., Buchhalter J., Nutt S., (2008). Mechanical properties of thermoelectric skutterudites, 969(1), 656–662.

Rowe D.M., (2006). Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source, *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, 1(1), 13– 23.

Rowe D.M., Bhandari C.M., (1983). *Modern Thermoelectrics*. Holt-Technology, 168s, London.

Rowe, D.M. ve Min G., (1998). “Evaluation of thermoelectric modules for power generation”, *J. Power Sources*, 73, 193-198 .

Salvador J.R., Cho J.Y., Ye Z., Moczygemba J.E., Thompson A.J., Sharp J.W., Wang H., (2013). Thermal to electrical energy conversion of skutterudite-based thermoelectric modules. *Journal of electronic materials*, 42(7), 1389-1399.

Salvador J.R., Meisner G.P., (2014). Cost-Competitive Advanced Thermoelectric Generators for Direct Conversion of Vehicle Waste Heat into Useful Electrical Power. In *2014 Annual*

Seshadri Group, (2013). *Energy Materials Datamining*. UC Santa Barbara Materials Research Laboratory. Retrieved October 21, 2014, from www.mrl.ucsb.edu:8080/datamine/thermoelectric.jsp

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

SIGMA-ALDRICH, (2015). Materials for Advanced Thermoelectrics. Retrieved from <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/metal-and-ceramicscience/thermoelectrics.html>

Suter,C., (2012). A 1 kWe thermoelectric stack for geothermal power generation – Modeling and geometrical optimization, Applied Energy ,379–385.

Snyder G., Ursell T., (2003). Thermoelectric efficiency and compatibility, Phys Rev Lett, 91(14), 148301.

Snyder G.J., (2008). Small thermoelectric generators. The Electrochemical Society Interface, 17(3), 54.

Snyder G.J., Fleurial J.P., Caillat T., Yang R., Chen G., (2002). Supercooling of Peltier cooler using a current pulse.

Temizer, İ., (2010). Bir dizel motorunun performans ve emisyonları üzerine katkı maddelerinin etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Temizer,İ., (2012). Effects on vehicle systems of technology thermoelectric, Batman University International Participated Science And Culture Symposium, Batman University , Journal of Life Sciences.

Temizer, İ., (2014). Termoelektrik jeneratörü kullanılan taşıtlarda egzoz gazlarından elektrik üretilmesi Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Thacher E.F., Helenbrook B.T., Karri M.A., Richter C.J., (2006). Testing of an automotive exhaust thermoelectric generator in a light truck. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.

Tian Z., Lee S., Chen G., (2013). Heat Transfer in Thermoelectric Materials and Devices. Journal of Heat Transfer, 135(6), 061605. doi:10.1115/1.4023585

Tritt T.M., (2011). Thermoelectric phenomena, materials, and applications, Annu Rev Mater Res, August, 41(1), 433–448.

Toksöz,S., (2010). Bir dizel motorunda yanma olayının analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Vázquez J., Sanz-Bobi M.A., Palacios R., Arenas A., (2002). State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles. In Proc. 7th European Workshop on Thermoelectrics (No. 17).

Yang J., Aizawa T., Yamamoto A., Ohta T., (2000). Thermoelectric properties of p-type $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_x (\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}$ prepared via bulk mechanical alloying and hot pressing, Journal of Alloys and Compounds, 309(1–2), 225–228.

Yavuz A.H., Ahiska R., Hakim M., (2006). Bulanık Mantık Kontrollü Termoelektrik Beyin Soğutucusu. ELECO'(2006) Elektrik–Elektronik–Bilgisayar Mühendisliği sempozyumu, B8-07, Bursa.

Zervos H., (2014). Thermoelectric Energy Harvesting 2014-2024: Devices, Applications, Opportunities. <http://www.idtechex.com/research/reports/thermoelectric-energy-harvesting-2014-2024-devices-applications-opportunities-000392.asp?viewopt=showall>

Zhao H., Sui J., Tang Z., Lan Y., Jie Q., Kraemer D., Mc Enaney K., Guloy A., Chen G., Ren Z., (2014), High thermoelectric performance of MgAgSb -based materials, Nano Energy, 7, 97–103.