



**ATIK ISILARDAN ISI DEPOLAMA VE ELEKTRİK ÜRETİMİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Muhammed Kürşat COŞKUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
NÜKLEER BİLİMLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2026

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammed Kürşat COŞKUN

30/01/2026

ATIK ISILARDAN ISI DEPOLAMA VE ELEKTRİK ÜRETİMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammed Kürşat COŞKUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Bu çalışmada, nükleer santrallerin kondenser çıkışlarında açığa çıkan ve genellikle çevreye atılan düşük sıcaklıklı atık ısının geri kazanılarak elektrik enerjisine dönüştürülme potansiyeli deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, faz değiştirmeyen sıvı parafin, ısının geçici olarak depolanmasını sağlayan bir ortam olarak kullanılmıştır. Deneysel tasarımda L₁₈ Taguchi deney tasarımı yöntemi uygulanmıştır. Deneyler kapsamında parafine, farklı sıcaklık seviyelerinde (65 °C, 70 °C ve 75 °C) harici ısı verilmiş; parafin sıcaklığının 58 °C'ye ulaşmasına kadar geçen süre boyunca, termoelektrik jeneratörler (TEG) aracılığıyla elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenliğin sistem performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla parafine farklı oranlarda (10 g, 15 g ve 20 g) bakır talaşı ilave edilmiştir. Ayrıca iki farklı termoelektrik modül (TEC1-12706 ve TEC1-12708) kullanılarak elektrik üretim performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, en yüksek elektriksel verim değeri %0,00831 olarak ölçülmüş ve bu değer 65 °C sıcaklık, 10 g bakır talaşı ve TEC1-12708 termoelektrik modülü kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu sonuç, özellikle düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarının değerlendirilmesi açısından önemli olup, uygun çalışma koşullarında sistemin elektrik üretme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca deneysel ölçümler doğrultusunda sistemde depolanan toplam ısı enerjisi miktarı hesaplanmış ve termal enerjinin hem geçici olarak depolanabildiği hem de kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülebildiği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, kondenser çıkışlarında oluşan düşük kaliteli atık ısıların, uygun malzeme seçimi ve sistem tasarımı ile geri kazanılabileceği ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik alternatif bir çözüm sunduğu belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91704
Anahtar Kelimeler : Isı, ısı depolama, elektrik üretimi
Sayfa Adedi : 37
Danışman : Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT STORAGE AND ELECTRICITY GENERATION FROM WASTE HEAT

(M. Sc. Thesis)

Muhammed Kürşat COŞKUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

This study experimentally investigates the potential for recovering and converting low-temperature waste heat, typically released into the environment from the condenser outlets of nuclear power plants, into electrical energy. For this purpose, phase-change-non-liquid paraffin was used as a medium for the temporary storage of heat. The L18 Taguchi experimental design method was applied in the experimental design. In the experiments, external heat was applied to the paraffin at different temperature levels (65 °C, 70 °C, and 75 °C); electrical energy was generated via thermoelectric generators (TEGs) until the paraffin temperature reached 58 °C. To examine the effect of thermal conductivity on system performance, copper filings were added to the paraffin in different proportions (10 g, 15 g, and 20 g). Furthermore, the electrical energy production performances were compared using two different thermoelectric modules (TEC1-12706 and TEC1-12708). According to the experimental results, the highest electrical efficiency value was measured as 0.00831%, and this value was obtained with a combination of 65 °C temperature, 10 g of copper filings, and the TEC1-12708 thermoelectric module. This result is particularly important in terms of utilizing low-temperature waste heat sources and shows that the system has the potential to generate electricity under suitable operating conditions. Furthermore, the total amount of thermal energy stored in the system was calculated based on experimental measurements, and it was revealed that thermal energy can be both temporarily stored and converted into usable electrical energy. In conclusion, it was determined that low-quality waste heat generated at the condenser outlets can be recovered through appropriate material selection and system design, offering an alternative solution for increasing energy efficiency.

Science Code : 91704

Key Words : Heat, heat storage, electricity generation

Page Number : 37

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU

TEŞEKKÜR

Tez dönemim boyunca değerli yardım ve bilimsel katkılarıyla beni yönlendiren, tez çalışmam süresince tecrübelerini esirgemeyen ve çalışma odasını kullanıma sunarak verimli bir araştırma süreci geçirmeme olanak sağlayan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan, değerli fikirleri ve yönlendirmeleriyle tez çalışmamda önemli katkıları bulunan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Adem ACIR'a teşekkürü borç bilirim.

Yoğun iş ve eğitim temposu içinde benimle sınırlı vakit geçirebilen, ancak sevgileriyle her zaman yanımda olduklarını hissettiren aileme. Sevgisiyle beni her zaman ayakta tutan babam ve anneme teşekkür ederim.

Son olarak FYL-2024-9636 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı'na da teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. MATERYAL VE METOT.....	9
3.1. Nükleer Santrallerde Atık Isının Oluşumu	9
3.2. Termal Enerji Depolama Yöntemleri.....	11
3.2.1. Duyulur ısı depolama.....	11
3.2.2. Gizli ısı depolama	12
3.2.3. Termokimyasal enerji depolama.....	13
3.3. Deneysel Sistem ve Deney Düzeneği	13
3.4. Kullanılan Isı Depolama Malzemesi	14
3.5. Termoelektrik Jeneratör Modülleri	15
3.6. Ölçüm Sistemleri	15
3.7. Deneysel Yöntem ve Deney Tasarımı.....	15
4. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	19
4.1. Süre (s) Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Tartışılması	19
4.2. Güç (W) Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Tartışılması	22

	Sayfa
4.3. Üretilen Enerji (J) Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Tartışılması.....	24
4.4. Verim (%) Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Tartışılması.....	27
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	31
5.1. Öneriler	31
KAYNAKLAR	33
ÖZGEÇMİŞ	37



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Faktörler ve seviyeleri.....	16
Çizelge 3.2. Deney tasarımı	16



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Nükleer bir enerji santralinde elektrik üretimi ve kondenser kaynaklı atık ısı oluşumunun şematik gösterimi	10
Şekil 3.2. Bakır hazne.....	14
Şekil 3.3. Deneysel sistemin şematik görünümü	17
Şekil 4.1. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının süre (s) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği	20
Şekil 4.2. TEC1-12708 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının süre (s) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği	20
Şekil 4.3. Bakır talaşı miktarının güç üzerindeki etkisi.....	23
Şekil 4.4. TEJ Modül tipinin güç üzerindeki ana etkisi.....	23
Şekil 4.5. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının enerjisi (J) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği.....	24
Şekil 4.6. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının enerjisi (J) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği.....	25
Şekil 4.7. TEJ Modül tipinin enerji üzerindeki etkisi.....	26
Şekil 4.8. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının verim (%) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği.....	28
Şekil 4.9. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının verim (%) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği.....	28
Şekil 4.10. TEJ Modül tipinin verim üzerindeki etkisi	29

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Q	Depolanan enerji
P	Güç
V	Gerilim
I	Akım
P_{IS1}	Isı Gücü
V_{TEJ}	TEJ gerilimi
M	Kütle
C	Özgül Isı
ΔT	Sıcaklık Farkı
Q_h	Sıcak Yüzey Isısı
Q_c	Soğuk Yüzey Isısı
mW	Miliwatt
W	Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

FDM	Faz Değiştiren Malzeme
TEJ	Termoelektrik Jeneratör
TED	Termal Enerji Depolama
TEDÜ	Termal Enerji Depolama Ünitesi

1. GİRİŞ

Enerji, modern toplumların ekonomik büyümesi, sanayi üretimi ve yaşam kalitesinin sürdürülebilir biçimde devamı açısından stratejik bir girdidir. Nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme ve dijitalleşme ile birlikte enerji talebi sürekli yükselirken, bu talebin çevresel etkileri azaltacak şekilde karşılanması küresel ölçekte temel bir hedef hâline gelmiştir. Bu çerçevede yalnızca yeni enerji üretim teknolojilerinin geliştirilmesi değil; mevcut sistemlerde kayıpların azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve atık enerjinin geri kazanımı da öncelikli araştırma alanları arasında yer almaktadır [1-2].

Enerji dönüşüm zincirinde en büyük kayıp kalemlerinden biri atık ısıdır. Özellikle enerji santralleri ve endüstriyel tesislerde, üretilen ısıl enerjinin önemli bir bölümü farklı akışkanlar üzerinden çevreye taşınarak sistem dışına atılmaktadır. Literatürde atık ısı geri kazanımı; sistem verimliliğini artırması ve dolaylı karbon azaltım potansiyeli nedeniyle önemli bir çözüm alanı olarak ele alınmaktadır [3]. Düşük sıcaklıklı atık ısıların (low-grade waste heat) değerlendirilmesinde en yaygın yaklaşımlardan biri Organik Rankine Çevrimi (ORC) olup, ORC'nin düşük/orta sıcaklık kaynaklarıyla uyumlu çalışabilmesi, saha uygulamalarındaki esnekliği ve yaygın endüstriyel entegrasyon potansiyeli kapsamlı biçimde raporlanmıştır [3]. Bununla birlikte ORC sistemleri; çalışma akışkanı, türbin/expander, yardımcı ekipmanlar ve işletme-bakım gereksinimleri nedeniyle özellikle küçük ölçekli, düşük sıcaklık farkına sahip uygulamalarda her zaman pratik/ekonomik olmayabilmektedir [1, 3].

Bu noktada termoelektrik jeneratörler (TEG) düşük sıcaklıklı atık ısı geri kazanımı için dikkat çeken bir alternatiftir. TEG'ler Seebeck etkisiyle ısıyı doğrudan elektriğe dönüştürür; hareketli parça içermemeleri, sessiz çalışmaları ve modüler yapıları nedeniyle bakım ihtiyacının görece düşük olması gibi avantajlar sunar [1]. Buna karşın, TEG tabanlı sistemlerin verimi; sıcaklık farkı (ΔT), ısı yayma (cold-side soğutma), ısıl temas direnci ve modül/ısı değiştirici tasarımı gibi birçok parametreye hassastır. Güncel derleme çalışmalar, özellikle soğuk yüzeyden ısı atımının iyileştirilmesi ve sıcaklık farkının korunması gibi tasarım unsurlarının performans üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamaktadır [1]. TEG'lerin atık ısı geri kazanımındaki uygulamalarını ve performansı etkileyen parametreleri inceleyen güncel çalışmalar, TEG sistemlerinin tasarım/işletme optimizasyonuna ihtiyaç duyduğunu net biçimde ortaya koymaktadır [1-2]. Ayrıca bazı çalışmalar ORC ve TEG'i

aynı atık ısı senaryolarında enerji–ekserji açısından karşılaştırarak, kaynak sıcaklığı ve ölçeğe bağlı olarak her iki yaklaşımın farklı üstünlükler gösterebileceğini raporlamaktadır [4].

Düşük sıcaklıklı atık ısıların değerlendirilmesinde yalnızca dönüşüm teknolojisi değil, ısının zamana bağlı yönetimi de kritik önemdedir. Üretim–tüketim zaman uyumsuzlukları nedeniyle, anlık olarak kullanılamayan ısının depolanıp daha sonra değerlendirilmesi enerji verimliliğini artıran temel yaklaşımlardan biridir. Bu amaçla kullanılan termal enerji depolama (TED) sistemleri genel olarak duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal depolama olarak sınıflandırılmaktadır. Düşük sıcaklık aralıklarında uygulama kolaylığı nedeniyle duyulur ısı depolama yaklaşımları pratik çözümler sunarken, sistem performansını sınırlandıran önemli sorunlardan biri birçok depolama malzemesinin düşük ısıl iletkenliğe sahip olmasıdır [5]. Bu nedenle literatürde, depolama ortamının ısıl iletkenliğini artırmak amacıyla metal köpükler, metal parçacıklar veya hibrit katkılarla ısı transferinin iyileştirilmesi yaygın bir araştırma eğilimi hâline gelmiştir [5]. Bu tür iyileştirme yaklaşımları, depolama ortamında ısı yayılımını hızlandırarak hem enerji depolama dinamiklerini hem de termoelektrik modül üzerindeki sıcaklık gradyanının sürekliliğini etkileyebilmektedir [1, 5].

Bu tez çalışması, nükleer santrallerin kondenser çıkışlarında görülen düşük sıcaklıklı ısı akıları gibi “düşük kaliteli atık ısı” kaynaklarının değerlendirilmesine odaklanmakta; ısıl enerjinin bir depolama ortamında (faz değiştirmeyen sıvı parafin) geçici olarak tutulması ve aynı süreçte termoelektrik jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi yaklaşımını deneysel olarak incelemektedir. Deney tasarımı Taguchi yaklaşımı benimsenerek parametrelerin sistem çıktıları üzerindeki etkisinin daha az deneyle incelenmesi hedeflenmiştir. Düşük sıcaklık seviyelerinde atık ısının geri kazanımı problemine; ısı depolama+termoelektrik dönüşümün birlikte değerlendirilmesi perspektifinden katkı sunmayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Atık ısıının geri kazanımı ve enerji verimliliğinin artırılması, özellikle fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve karbon salımlarının sınırlandırılması hedefleri doğrultusunda son yıllarda yoğun biçimde araştırılmaktadır. Düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarında klasik çevrim tabanlı sistemlerin verim ve ölçek sınırlamaları nedeniyle, termoelektrik jeneratörler (TEG) ve termal enerji depolama sistemleri alternatif ve tamamlayıcı çözümler olarak ön plana çıkmaktadır.

Ochieng ve arkadaşları [6], farklı endüstriyel süreçlerde ortaya çıkan atık ısı kaynaklarının termoelektrik jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesini kapsamlı biçimde incelemişlerdir. Çalışmada, çimento, metalurji, kimya ve enerji üretim tesislerinden kaynaklanan düşük ve orta sıcaklıklı atık ısı akıları sınıflandırılmış; TEG sistemlerinin bu kaynaklarla entegrasyonunda karşılaşılan temel teknik zorluklar detaylı biçimde ele alınmıştır. Yazarlar, TEG performansının yalnızca sıcaklık seviyesine değil, sıcaklık farkının sürekliliğine ve ısıl temas direncine güçlü biçimde bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca soğuk yüzeyden ısıının etkin biçimde uzaklaştırılamadığı durumlarda, teorik verimlerin pratikte elde edilemediği belirtilmiştir. Bu çalışma, düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında TEG sistemlerinin tasarımında bütüncül bir ısıl yönetim yaklaşımının gerekliliğini ortaya koyması açısından önemlidir.

Champier [7], termoelektrik jeneratörlerin atık ısı geri kazanımındaki mevcut uygulamalarını ve gelecekteki potansiyelini irdeleyen kapsamlı bir derleme çalışması sunmuştur. Çalışmada, otomotiv egzoz sistemlerinden endüstriyel fırınlara kadar geniş bir uygulama yelpazesi değerlendirilmiş; TEG sistemlerinin avantajları ve sınırlamaları karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Yazar, özellikle düşük sıcaklıklı uygulamalarda TEG verimlerinin sınırlı kaldığını; ancak hareketli parça içermemeleri ve bakım gereksinimlerinin düşük olması nedeniyle bu sistemlerin mikro ve orta ölçekli uygulamalarda önemli bir potansiyele sahip olduğunu belirtmiştir. Ayrıca sıcaklık farkının zamanla azalmasının, güç üretiminde süreksizliğe yol açtığı ve bu sorunun termal enerji depolama ile giderilebileceği vurgulanmıştır.

Mettawee ve arkadaşları [8], parafin mumunun faz değiştiren malzeme olarak kullanıldığı gizli ısı depolama temelli bir güneş kolektörünün performansını deneysel olarak

incelemişlerdir. Çalışmada, kolektör yüzeyinden elde edilen ısıнын parafin içerisinde depolanması ve daha sonra suyun ısıtılmasında kullanılması amaçlanmıştır. Deneysel süreçte farklı su debileri uygulanarak sistemin şarj ve deşarj davranışları analiz edilmiştir. Parafinin sıcaklık dağılımı, kolektör boyunca yerleştirilen termokupllar yardımıyla zamana bağlı olarak izlenmiştir. Sonuçlar, şarj aşamasında eriyen parafin tabakasının kalınlığının artmasıyla ortalama ısı transfer katsayısının yükseldiğini göstermiştir. Deşarj aşamasında ise, kolektörden geçen suyun debisi arttıkça sisteme aktarılan ısı miktarının arttığı belirlenmiştir. Bu çalışma, parafinin gizli ısı depolama uygulamalarında etkin bir FDM olduğunu ve güneş enerjisi sistemlerinde ısı kararlılığı artırabildiğini ortaya koymuştur.

Çinici ve arkadaşları [9], yapay güneş ışıını altında çalışan bir termal enerji depolama ünitesinde parafinin erime süresini iyileştirmeye yönelik deneysel bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, parafin içerisine yerleştirilen yay biçimli kanatçıkların tel çapı, yay çapı ve adım sayısı gibi geometrik parametreler dikkate alınmıştır. Deneysel veriler, Taguchi yöntemi ile entegre edilmiş gri ilişkisel analiz yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kalın tel çapı ve geniş adım aralığına sahip yay kanatçıklarının erime süresini önemli ölçüde kısalttığını göstermiştir. Ayrıca varyans analizi ile hangi parametrelerin erime süresi üzerinde daha etkili olduğu ortaya konmuş ve regresyon analizi ile matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu çalışma, FDM tabanlı depolama sistemlerinde ısı transferinin iyileştirilmesinde geometrik tasarımın kritik rolünü vurgulamaktadır.

Dinesh ve arkadaşları [10], organik faz değıştiren malzeme (OFDM) entegrasyonunun hava ısıtıcı tip güneş kolektörlerinin performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, biri OFDM entegre edilmiş diğeri geleneksel olmak üzere iki özdeş kolektör aynı çevresel koşullarda test edilmiştir. Gün boyunca değışen güneş ışıını ve ortam sıcaklığı koşullarında yapılan ölçümler, OFDM'in kolektör içerisinde bir ısıl tampon görevi gördüğünü ortaya koymuştur. Özellikle güneş ışıınının azaldığı saatlerde OFDM'in depoladığı ısıyı ortama aktarmaya devam ettiğı ve bu sayede kolektörün daha kararlı bir performans sergilediğı belirlenmiştir. Araştırma sonucunda, OFDM entegrasyonu ile günlük enerji verimliliğinin %11,25 oranında arttığı rapor edilmiştir. Bu bulgu, faz değıştiren malzemelerin yalnızca anlık değil, zamana yayılmış enerji kullanımı açısından da önemli katkılar sunduğunu göstermektedir.

Afshan ve arkadaşları [11], gizli ısı temelli termal enerji depolama tanklarının geometrik özelliklerinin sistem performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, faz değiştiren malzeme içeren depolama tanklarının farklı en-boy oranlarında tasarlanmasıyla, ısıнын tank içerisinde yayılım davranışı ve erime süreci analiz edilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında, güneş enerjisinin doğasında bulunan zamansal dalgalanmaların etkisini ortadan kaldırmak amacıyla sabit bir ısı akısı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, uygun en-boy oranına sahip tanklarda sıcaklık gradyanlarının daha homojen dağıldığını ve FDM'in erime süresinin kısaldığını göstermiştir. Ayrıca, uygun geometrik tasarımın yalnızca şarj aşamasını değil, deşarj sürecini de olumlu yönde etkilediği vurgulanmıştır. Bu çalışma, FDM tabanlı termal enerji depolama sistemlerinde malzeme seçiminin yanı sıra geometrik tasarımın da kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Cabeza ve arkadaşları [12], faz değiştiren malzemelerin gerçek sistemlerde uygulanabilirliğini incelemek amacıyla, güneş kolektörleri ve sıcak su depolarından oluşan deneysel bir düzenek kurmuşlardır. Sistem, güneş ışınımının olmadığı zaman dilimlerinde de çalışabilmesi için elektrikli bir yardımcı ısıtıcı ile desteklenmiştir. Deneysel çalışmalarda, biri klasik diğeri ise FDM içeren termal enerji depolama üniteleriyle donatılmış iki kolektör karşılaştırılmıştır. Farklı sayıda (iki, dört ve altı adet) FDM ünitesi kullanılarak yapılan testler sonucunda, yalnızca bir adet FDM ünitesi eklenmesinin bile suyun daha uzun süre sıcak kalmasını sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, FDM tabanlı sistemlerin enerji sürekliliği açısından pratik ve uygulanabilir çözümler sunduğunu göstermektedir.

Hamed ve arkadaşları [13], FDM entegre edilmiş güneş enerjili bir su ısıtıcısının performansını değerlendirmek amacıyla ayrıntılı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Çalışmada, sistem davranışları termodinamiğin birinci yasası temel alınarak analiz edilmiş ve farklı giriş suyu sıcaklıkları, su debileri, FDM kalınlıkları ve malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Model sonuçları, FDM entegrasyonunun özellikle gece saatlerinde sistemin çalışmasını mümkün kıldığını ve geleneksel sistemlere kıyasla daha istikrarlı bir performans sunduğunu göstermiştir. Ayrıca en iyi sonuçların, yüksek giriş suyu sıcaklığı, kalın FDM tabakası ve düşük su debisi kombinasyonunda elde edildiği rapor edilmiştir. Bu çalışma, FDM tabanlı gizli ısı depolamanın güneş enerjisi uygulamalarında sistem sürekliliği açısından önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Koşan ve Aktaş [14], iç içe borulu bir ısı değiştiricisinde faz değiştiren malzeme kullanılarak gerçekleştirilen ısı enerji depolama sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak yapılan iki boyutlu ve zamana bağlı analizlerde, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı ve kanatçık sayısının FDM'in erime süresi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, giriş sıcaklığının artmasıyla erime süresinin belirgin şekilde kısaldığını göstermiştir. Ayrıca kanatçık sayısının artırılmasıyla ısı transfer yüzeyinin genişlediği ve erime süresinin %80'e varan oranlarda azaldığı rapor edilmiştir. Bu çalışma, FDM tabanlı depolama sistemlerinde ısı transfer yüzey alanının artırılmasının performans üzerindeki kritik etkisini ortaya koymaktadır.

Xinzhong ve arkadaşları [15], termoelektrik jeneratörlerin performansını artırmak amacıyla hem sıcak hem de soğuk yüzeylere faz değiştiren malzeme tabanlı termal enerji depolama üniteleri entegre etmişlerdir. Çalışmada, tek taraflı ve çift taraflı FDM entegrasyonları karşılaştırılmış ve değişken çevresel koşullar altında sistem davranışı analiz edilmiştir. Deneyler, 0–40 °C arasında değişen ortam sıcaklıklarını simüle eden bir düzeneğe üç gün boyunca gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çift taraflı FDM entegrasyonunun sıcaklık farkını daha uzun süre koruduğunu ve TEG çıkış gücünü %35,8 oranında artırdığını göstermiştir. Bu bulgu, termoelektrik sistemlerde ısı kütlesi etkisinin performans sürekliliği açısından önemli bir mekanizma olduğunu ortaya koymaktadır.

Mohajerzadeh ve arkadaşları [16], faz değiştiren malzemeler ile termoelektrik jeneratörlerin bina cephelerine entegrasyonunu ele alarak, sürdürülebilir elektrik üretimi açısından yenilikçi bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada, güneş ışıınımı ve ortam sıcaklığındaki günlük değişimlerin PCM aracılığıyla dengelendiği ve bu sayede TEG üzerinde daha kararlı bir sıcaklık farkı oluşturulduğu gösterilmiştir. Ayrıca PCM tabakalarının, bina içi ısı konforu artırdığı ve soğutma yükünü azalttığı belirtilmiştir. Bu çalışma, PCM–TEG entegrasyonunun yalnızca enerji üretimi değil, bina enerji performansı açısından da çok yönlü faydalar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Milad ve arkadaşları [17], fotovoltaik sistemlerle entegre edilen FDM–TEG hibrit yapının performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, sistemin temel hedeflerinden biri, gündüz depolanan ısınnın gece saatlerinde elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Geliştirilen simülasyon sonuçları, FDM entegrasyonu sayesinde güneş pili sıcaklığının önemli ölçüde düştüğünü ve bu durumun elektriksel verimi olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca

sistemin elektrik çıkış gücünün iki katına kadar arttığı rapor edilmiştir. Bu çalışma, FDM–TEG entegrasyonunun süreklilik ve verim artışı açısından potansiyelini ortaya koymaktadır.

Tuoi ve arkadaşları [18], faz değiştiren malzeme entegre edilmiş bir termoelektrik jeneratör sisteminin teorik modellemesini yaparak deneysel verilerle doğrulamışlardır. Çalışmada, günlük ortam sıcaklık değişimlerinin FDM aracılığıyla TEG üzerinde bir sıcaklık farkına dönüştürülebileceği gösterilmiştir. Ayrıca yalnızca faz değişimi gerçekleşen durumlar değil, faz değişiminin olmadığı koşullar da incelenmiş ve düşük güçlü uygulamalarda dahi FDM’in performansa katkı sağlayabileceği belirtilmiştir. Bu yönüyle çalışma, FDM’in sadece gizli ısı değil, duyulur ısı depolama etkisinin de TEG sistemlerinde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Wang ve arkadaşları [19], termoelektrik jeneratörün sıcak yüzeyine entegre edilen faz değiştiren malzemenin, sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak sistemin termal kararlılığını artırdığını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, FDM’in TEG’i ani sıcaklık değişimlerinden koruduğu ve sıcaklık farkının korunma süresini uzattığı gösterilmiştir. Bu sonuçlar, FDM–TEG entegrasyonunun sistem güvenilirliği açısından da önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Darkwa ve arkadaşları [20], fotovoltaiik panellerle entegre edilen termoelektrik jeneratör–faz değiştiren malzeme sistemlerinin performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Farklı FDM kalınlıkları, termal iletkenlik değerleri ve faz değişim sıcaklıkları dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda, yüksek termal iletkenliğe sahip ve uygun faz değişim sıcaklığına sahip FDM tabakalarının sistem performansını belirgin şekilde iyileştirdiği rapor edilmiştir.

Yukarıda özetlenen çalışmalar, faz değiştiren malzemelerin termal enerji depolama uygulamalarında ve termoelektrik jeneratörlerin performans iyileştirilmesinde önemli katkılar sunduğunu açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, literatürdeki çalışmaların büyük bir bölümü gizli ısı depolama temelli sistemlere odaklanmakta; faz değişimi göstermeyen tamamen sıvı parafin kullanılarak duyulur ısı depolama yaklaşımının, düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında TEG performansı üzerindeki etkisi sınırlı sayıda çalışmada ele alınmaktadır.

Bu tez çalışmasında, tamamen sıvı parafin kullanılarak duyulur ısı depolama temelli bir sistem kurulmuş ve iki farklı termoelektrik jeneratör modülünün performansı deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, bakır talaşı katkısı ile ısı iletkenliğinin artırılmasının sistem çıktıları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu yönüyle çalışma, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurarak düşük sıcaklıklı atık ısıların geri kazanımına yönelik özgün bir deneysel katkı sunmaktadır.



3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, düşük sıcaklıklı atık ısıların depolanması ve termoelektrik jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesini incelemek amacıyla kurulan deneysel sistem, kullanılan malzemeler ve uygulanan deneysel yöntem ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Deneysel sistem, nükleer santrallerin kondenser çıkışlarında oluşan düşük sıcaklıklı atık ısıyı temsil edecek şekilde tasarlanmıştır.

3.1. Nükleer Santrallerde Atık Isının Oluşumu

Nükleer enerji santrallerinde elektrik üretimi, temel olarak nükleer fisyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan ısı, termodinamik bir çevrim aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayanmaktadır. Reaktör çekirdeğinde gerçekleşen fisyon reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan yüksek miktardaki ısı, birincil çevrimde soğutucu akışkan yardımıyla taşınarak buhar üreticilerine iletilmektedir. Bu aşamada elde edilen buhar, türbin-jeneratör grubunda mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Ancak nükleer santrallerde üretilen ısı enerjinin tamamı elektrik enerjisine dönüştürülemez. Termodinamiğin ikinci yasası gereği, çevrimin çalışabilmesi için belirli bir miktar ısı, düşük sıcaklık seviyesinde çevreye atılması zorunludur. Bu nedenle, türbinden çıkan düşük basınçlı buhar, kondansatör içerisinde yoğunlaştırılarak tekrar çevrime kazandırılmakta; yoğunlaşma sırasında açığa çıkan büyük miktardaki ısı ise soğutma suyu aracılığıyla sistem dışına taşınmaktadır.

Bu aşamada ortaya çıkan ısı, nükleer santrallerdeki en büyük atık ısı kaynağını oluşturmaktadır. Kondansatör çıkışındaki soğutma suyu sıcaklığı genellikle 30–80 °C aralığında olup, bu sıcaklık seviyesi literatürde düşük sıcaklıklı atık ısı (low-grade waste heat) olarak tanımlanmaktadır. Soğutma sistemine bağlı olarak bu atık ısı, doğrudan deniz veya nehir gibi su kaynaklarına deşarj edilmekte ya da soğutma kuleleri aracılığıyla atmosfere bırakılmaktadır. Şekil 3.1’de Nükleer bir enerji santralinde elektrik üretimi ve kondenser kaynaklı atık ısı oluşumunun şematik gösterimi verilmiştir.

bölgesel ısıtma, proses ısısı sağlama, ısı pompası uygulamaları ve doğrudan elektrik üretimi yaklaşımları yer almaktadır.

Bu bağlamda, termoelektrik jeneratörler, düşük sıcaklık farklarında çalışabilme kabiliyetleri sayesinde nükleer santrallerin kondenser çıkışlarında oluşan atık ısıнын değerlendirilmesi için uygun bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Ancak termoelektrik jeneratörlerin düşük dönüşüm verimleri, sistemin anlık sıcaklık dalgalanmalarına karşı hassas olmasına neden olmaktadır. Bu durum, termoelektrik sistemlerin termal enerji depolama sistemleriyle birlikte kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu bölümde, düşük sıcaklıklı atık ısıların depolanması ve termoelektrik jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesini incelemek amacıyla kurulan deneysel sistem, kullanılan malzemeler ve uygulanan deneysel yöntem ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Deneysel sistem, nükleer santrallerin kondenser çıkışlarında oluşan düşük sıcaklıklı atık ısıyı temsil edecek şekilde tasarlanmıştır.

3.2. Termal Enerji Depolama Yöntemleri

Enerji sistemlerinde üretim ile tüketim arasındaki zamansal uyumsuzluk, enerji verimliliğini sınırlayan temel sorunlardan biridir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ve atık ısı geri kazanım uygulamalarında, enerjinin üretildiği anda doğrudan kullanılamaması durumunda depolanması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, termal enerji depolama (TED) sistemleri, ısı enerjinin belirli bir süre boyunca saklanması ve ihtiyaç duyulduğunda tekrar kullanılmasını mümkün kılan etkili çözümler sunmaktadır.

Termal enerji depolama yöntemleri, depolama mekanizmasına bağlı olarak genel olarak duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal depolama olmak üzere üç ana grupta incelenmektedir.

3.2.1. Duyulur ısı depolama

Duyulur ısı depolama yönteminde, bir malzemenin sıcaklığının artırılması veya azaltılması yoluyla enerji depolanmaktadır. Depolanan enerji miktarı, kullanılan malzemenin özgül

ısı, kütlesi ve sıcaklık değişimi ile doğru orantılıdır. Bu yöntem, basit sistem yapısı, düşük maliyet ve uygulama kolaylığı gibi avantajlara sahiptir. Su, yağlar, tuz çözeltileri ve parafin gibi sıvılar duyulur ısı depolama ortamı olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Duyulur ısı depolama sistemlerinin en önemli sınırlaması, birim kütle başına depolanabilen enerji miktarının görece düşük olmasıdır. Ancak düşük ve orta sıcaklık aralığında çalışan sistemlerde, özellikle büyük hacimli ısı akılarının söz konusu olduğu durumlarda, bu yöntem pratik ve güvenilir bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca duyulur ısı depolama sistemleri, faz değişimi içermemeleri nedeniyle ısı kararlılık ve tekrar edilebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında kullanılan faz değiştirmeyen sıvı parafin, duyulur ısı depolama yaklaşımına dayanmaktadır. Parafinin faz değişimine ulaşmadan yalnızca sıcaklık artışı yoluyla ısı depolaması, sistemin termal davranışının daha öngörülebilir olmasını sağlamış ve termoelektrik jeneratörler üzerinde oluşan sıcaklık farkının kontrol edilebilirliğine katkı sunmuştur.

3.2.2. Gizli ısı depolama

Gizli ısı depolama yönteminde, enerji depolama işlemi bir malzemenin faz değişimi (katı–sıvı, sıvı–gaz gibi) sırasında gerçekleşmektedir. Bu süreçte, malzeme sıcaklığı büyük ölçüde sabit kalırken yüksek miktarda enerji depolanabilmektedir. Bu özelliği sayesinde gizli ısı depolama sistemleri, duyulur ısı depolamaya kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu sunmaktadır.

Gizli ısı depolamada en yaygın kullanılan malzemeler faz değiştiren malzemeler (FDM) olarak adlandırılmaktadır. Parafinler, tuz hidratları ve organik–inorganik karışımlar bu gruba örnek olarak verilebilir. FDM’ler, belirli bir sıcaklık aralığında çalışması gereken sistemlerde sıcaklık stabilitesi sağlamaları nedeniyle özellikle güneş enerjisi ve bina uygulamalarında yaygın biçimde tercih edilmektedir.

Bununla birlikte, FDM’lerin düşük ısı iletkenliğe sahip olması, şarj ve deşarj sürelerinin uzamasına yol açabilmekte ve sistem performansını sınırlayabilmektedir. Bu nedenle

literatürde, FDM'lerin metal köpükler, kanatçıklar veya yüksek iletkenlikli katkı malzemeleriyle birlikte kullanılması yaygın bir araştırma konusu hâline gelmiştir.

3.2.3. Termokimyasal enerji depolama

Termokimyasal enerji depolama yöntemlerinde, enerji kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla depolanmaktadır. Bu yöntemde, geri dönüşümlü kimyasal reaksiyonlar sayesinde enerji uzun süre boyunca çok düşük kayıplarla saklanabilmektedir. Termokimyasal depolama sistemleri, teorik olarak en yüksek enerji yoğunluğunu sunan depolama yöntemleri arasında yer almaktadır.

Ancak bu sistemlerin karmaşık yapıları, yüksek yatırım maliyetleri ve reaksiyon kontrolü gereksinimleri nedeniyle uygulamaları sınırlıdır. Bu nedenle termokimyasal depolama yöntemleri, genellikle yüksek sıcaklık uygulamaları ve özel endüstriyel proseslerle sınırlı kalmaktadır.

3.3. Deneysel Sistem ve Deney Düzenegi

Deneysel çalışmada, kondenser çıkışını temsil eden bir Termal Enerji Depolama Ünitesi (TEDÜ) kullanılmıştır. TEDÜ olarak, 100 mm × 150 mm boyutlarında bakır bir kap tercih edilmiştir. Şekil 3.2'de görseli verilen Bakır kap içerisine, dış çapı 10 mm ve et kalınlığı 1 mm olan bakır boru yerleştirilmiştir. Bu boru içerisinden sıcak su geçirilerek, kap içerisinde bulunan ısı depolama malzemesinin kontrollü biçimde ısıtılması sağlanmıştır.



Şekil 3.2. Bakır hazne

Isı kaynağı olarak, sıcaklığı ayarlanabilir bir su ısıtıcısı kullanılmış ve sıcak su, 6 V DC dalgıç tip su pompası yardımıyla bakır boru içerisine pompalanmıştır. Deneyler sırasında sıcak su sıcaklığı 65 °C, 70 °C ve 75 °C olmak üzere üç farklı seviyede tutulmuştur. Bu sıcaklık aralığı, nükleer santrallerin kondenser çıkışlarında karşılaşılan düşük sıcaklıklı atık ısı seviyelerini temsil etmektedir.

Bakır kabın içerisine faz değiştirmeyen sıvı parafin yerleştirilmiş ve parafinin ısıtılması sırasında oluşan sıcaklık farkı, termoelektrik jeneratörler üzerinde değerlendirilmiştir. Termoelektrik modüller, bakır kap ile temas edecek şekilde konumlandırılmış ve temas yüzeylerinde ısı iletimini iyileştirmek amacıyla termal macun kullanılmıştır.

3.4. Kullanılan Isı Depolama Malzemesi

Deneysel sistemde ısı depolama amacıyla likit parafin (CosOil LP-15) kullanılmıştır. Kullanılan parafin, deney süresince faz değişimine ulaşmadan yalnızca duyulur ısı depolama davranışı sergilemiştir. Parafinin seçilme nedenleri; yüksek özgül ısı kapasitesine sahip olması, kimyasal kararlılığı, tekrar kullanılabilirliği ve düşük sıcaklık aralıklarında kararlı davranış göstermesidir.

Deneylerde kullanılan parafin miktarı yaklaşık 400 ml (320 g) olup, parafin sıcaklığı 58 °C seviyesine ulaşana kadar sistem çalıştırılmıştır. Isı iletimine olan etkisini incelemek

amacıyla, parafin içerisine 10 g, 15 g ve 20 g olmak üzere üç farklı miktarda bakır talaşı eklenmiştir. Böylece, katkı malzemesinin sistem performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak değerlendirilmiştir.

3.5. Termoelektrik Jeneratör Modülleri

Elektrik enerjisi üretimi amacıyla iki farklı termoelektrik jeneratör (TEJ) modülü kullanılmıştır:

- TEC1-12706
- TEC1-12708

Bu modüller, düşük sıcaklık farklarında çalışmaya uygun olmaları ve literatürde yaygın şekilde kullanılmaları nedeniyle tercih edilmiştir. Modüller, parafin ile temas eden sıcak yüzey ve ortam sıcaklığına yakın tutulan soğuk yüzey arasında oluşan sıcaklık farkı sayesinde elektrik üretmiştir.

3.6. Ölçüm Sistemleri

Sıcaklık ölçümleri için, parafin içerisine yerleştirilen 4 adet T-tipi termokupl (TC15-B-1KP04-12-K20-TT-T) kullanılmıştır. Ayrıca sıcak su sıcaklığını izlemek amacıyla ısıtıcı içerisine 1 adet LYK-3409 tipi termokupl yerleştirilmiştir. Termokupllardan alınan veriler Elimko-680 datalogger yardımıyla kaydedilmiştir.

Termoelektrik modüllerden elde edilen gerilim ve akım değerleri, Extech marka dijital multimetre kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümlerin hassasiyeti ± 0.01 V ve ± 0.5 °C'dir. Deneyler sırasında ortam sıcaklığı yaklaşık 29.5 °C olarak ölçülmüştür.

3.7. Deneysel Yöntem ve Deney Tasarımı

Deneyler, Taguchi L_{18} ortogonal deney tasarımı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımında dikkate alınan kontrol faktörleri ve seviyeleri Çizelge 3.1'de ve buna bağlı olarak oluşturulan deney tasarımıda Çizelge 3.2'de verilmiştir.

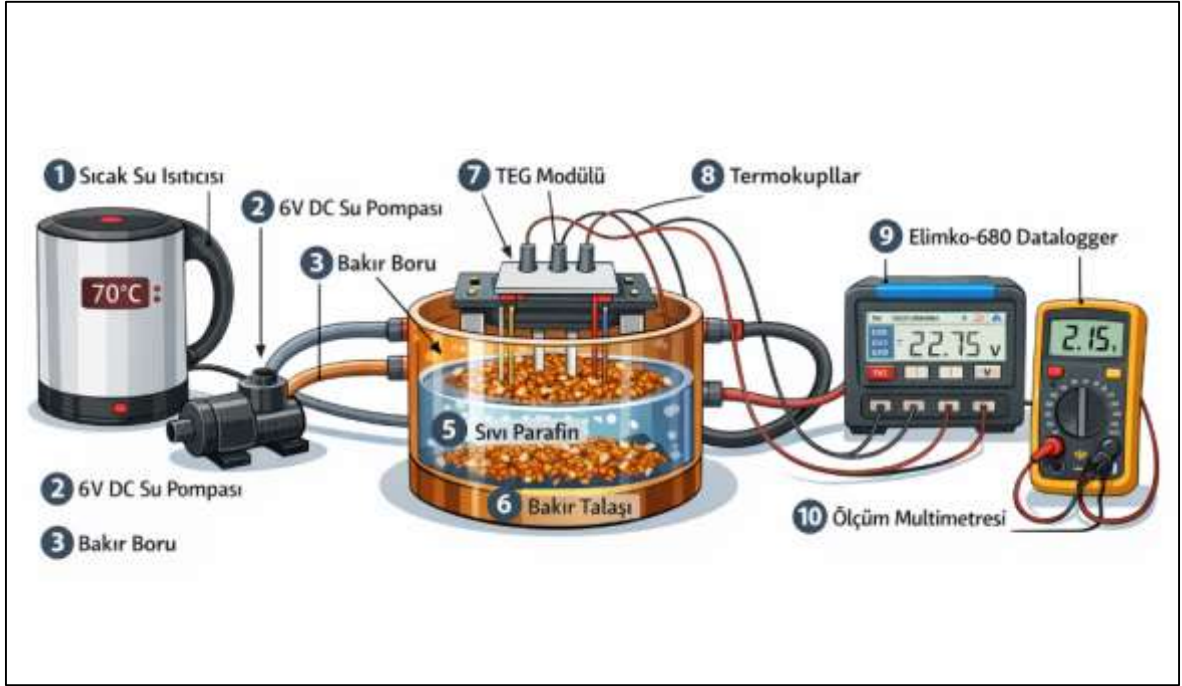
Çizelge 3.1. Faktörler ve seviyeleri

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
TEJ modül tipi	TEC1-12706	TEC1-12708	----
Isı kaynağı sıcaklığı	65 °C	70 °C	75 °C
Bakır talaşı miktarı	10 g	15 g	20 g

Çizelge 3.2. Deney tasarımı

Deney no	TEJ modül tipi	Isı kaynağı sıcaklığı	Bakır talaşı miktarı
1	TEC1-12706	65	10
2	TEC1-12706	65	15
3	TEC1-12706	65	20
4	TEC1-12706	70	10
5	TEC1-12706	70	15
6	TEC1-12706	70	20
7	TEC1-12706	75	10
8	TEC1-12706	75	15
9	TEC1-12706	75	20
10	TEC1-12708	65	10
11	TEC1-12708	65	15
12	TEC1-12708	65	20
13	TEC1-12708	70	10
14	TEC1-12708	70	15
15	TEC1-12708	70	20
16	TEC1-12708	75	10
17	TEC1-12708	75	15
18	TEC1-12708	75	20

Her bir deneyde, sistem başlangıçta ortam sıcaklığında hazırlanmış; ardından belirlenen sıcaklık seviyesinde sıcak su TEDÜ içerisine gönderilmiştir. Parafin sıcaklığı 58 °C seviyesine ulaşana kadar geçen süre boyunca termoelektrik modüllerden elde edilen gerilim ve akım değerleri kaydedilmiştir. Ölçülen veriler kullanılarak elektriksel güç, üretilen elektrik enerjisi ve sistem verimi hesaplanmıştır. Deneysel sistemin şematik görünümü Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Deneysel sistemin şematik görünümü



4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Taguchi L_{18} deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneylerden elde edilen süre (s), güç (W), üretilen enerji (J) ve verim (%) sonuçları değerlendirilmiş ve ilgili literatür çalışmalarıyla karşılaştırılarak tartışılmıştır. Deneysel çıktılar üzerinde; ısı kaynağı sıcaklığı, bakır talaşı miktarı ve termoelektrik jeneratör (TEJ) modül tipinin etkileri incelenmiştir.

4.1. Süre (s) Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Tartışılması

Bu çalışmada süre, deneysel sistemde sıvı parafinin başlangıç sıcaklığından 58 °C hedef sıcaklığına ulaşması için geçen zaman olarak tanımlanmıştır. Bu tanım, sistemin termal tepki süresini ve ısı depolama–elektrik üretim sürecinin etkinliğini değerlendirmek açısından kritik bir parametredir.

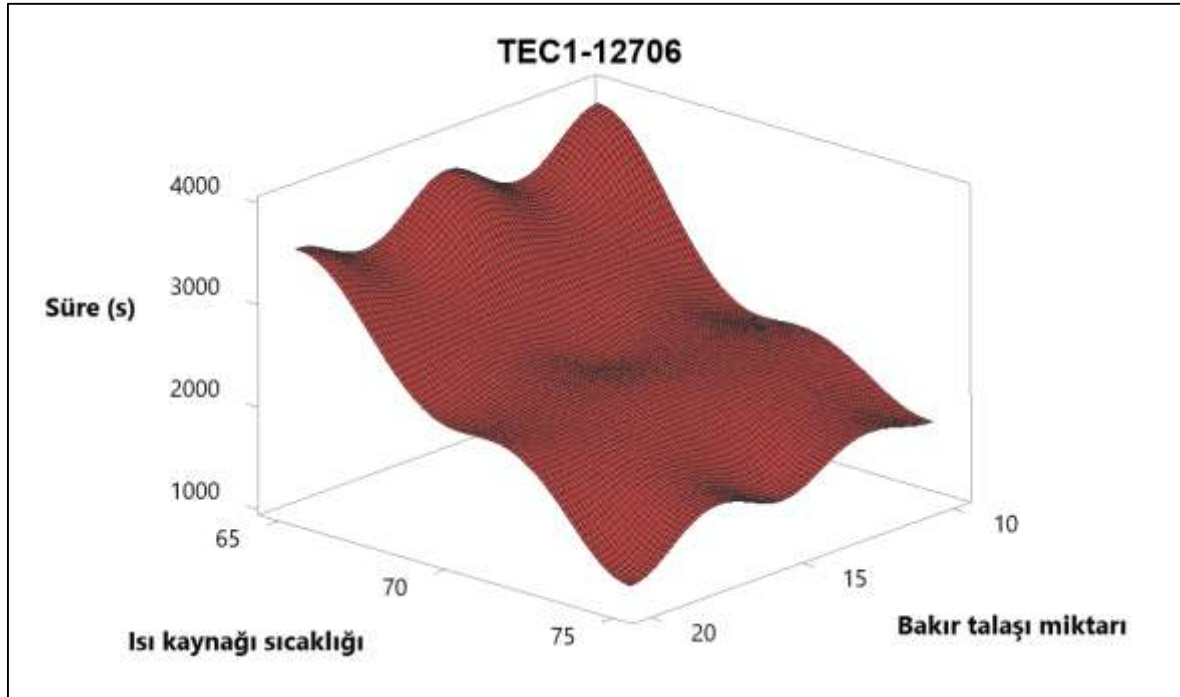
Deneysel sonuçlar incelendiğinde, sürenin büyük ölçüde ısı kaynağı sıcaklığına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de, termoelektrik jeneratörleri için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının süre (s) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği gösterilmektedir. Buna göre, sıcaklık arttıkça hedef sıcaklığa ulaşma süresinin belirgin biçimde azaldığı tespit edilmiştir.

65 °C sıcaklık seviyesinde ortalama süre yaklaşık 3740 s,

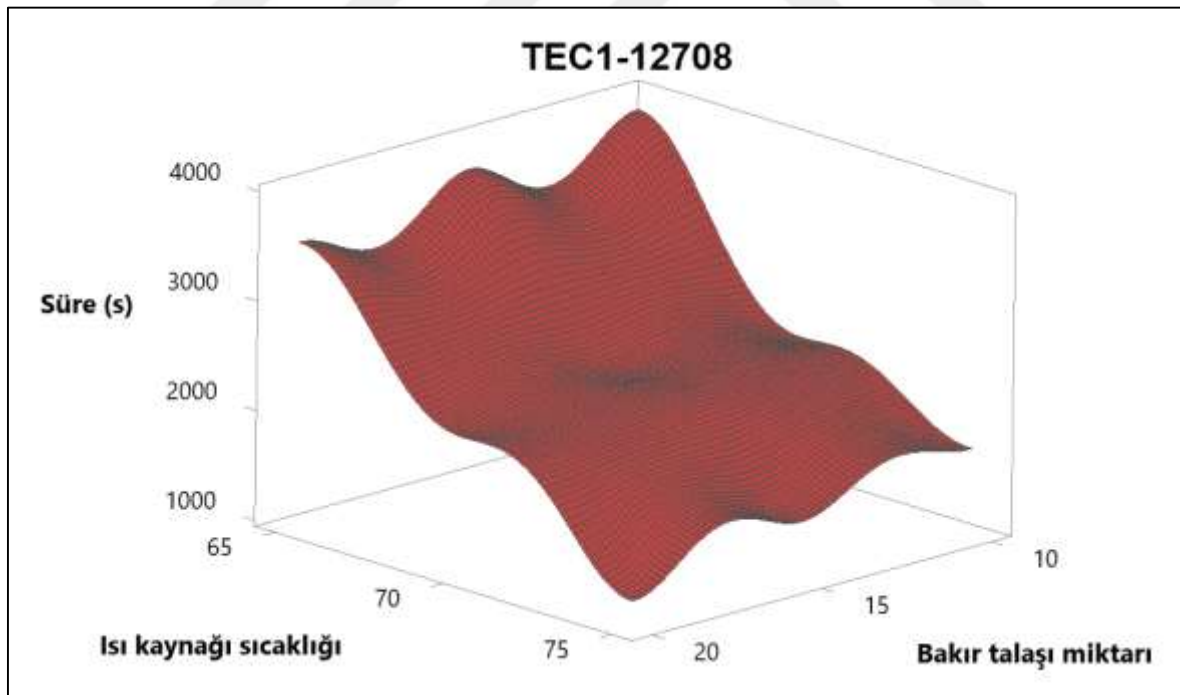
70 °C sıcaklık seviyesinde ortalama süre yaklaşık 2280 s,

75 °C sıcaklık seviyesinde ise ortalama süre yaklaşık 1480 s olarak ölçülmüştür.

Bu eğilim, ısı transferinin temel prensipleriyle uyumludur. Isı kaynağı sıcaklığının artmasıyla birlikte, parafin ile ısı kaynağı arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) artmakta ve buna bağlı olarak sisteme aktarılan ısı miktarı hızlanmaktadır. Böylece, ısı depolama ortamı hedef sıcaklığa daha kısa sürede ulaşmaktadır.



Şekil 4.1. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının süre (s) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği



Şekil 4.2. TEC1-12708 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının süre (s) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 bakır talaşı miktarının süre üzerindeki etkisi bakımından incelendiğinde; bakır talaşı miktarındaki artışın, süre üzerinde sınırlı ancak gözlemlenebilir

bir etkisi olduğu görülmektedir. Özellikle düşük sıcaklık seviyelerinde, bakır talaşı ilavesinin parafin içerisindeki ısı iletkenliği artırarak ısının hacim içerisinde daha homojen dağılmasına katkı sağladığı değerlendirilmektedir. Ancak deney sonuçları, süreyi belirleyen baskın faktörün bakır talaşı miktarından ziyade ısı kaynağı sıcaklığı olduğunu açıkça göstermektedir.

Literatürde, parafin ve benzeri ısı depolama malzemelerine bakır, alüminyum veya metal köpük gibi yüksek ısı iletkenliğe sahip katkıların eklenmesinin, ısı transfer hızını artırarak erime veya ısınma süresini kısalttığı rapor edilmiştir. Ancak bu etkinin, genellikle sıcaklık seviyesi kadar belirleyici olmadığı da vurgulanmaktadır. Xiao ve arkadaşları [21], metal katkılı parafin sistemlerinde sıcaklık farkının ana itici mekanizma olduğunu ve iletken katkıların ikincil bir rol üstlendiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Borhani ve arkadaşları [22], bakır katkılı parafin sistemlerinde süreyi esas belirleyen parametrenin ısı kaynağı sıcaklığı olduğunu göstermiştir.

Deneysel sonuçlara göre, TEC1-12706 ve TEC1-12708 modülleri arasında süre açısından belirgin bir fark oluşmamıştır. Bu durum, sürenin esas olarak ısı depolama ortamının termal özellikleri ve uygulanan ısı girdisi ile ilişkili olduğunu; termoelektrik modül tipinin ise süreci doğrudan etkilemediğini göstermektedir.

Bu bulgu, literatürde yer alan birçok çalışmayla uyumludur. Atouei ve arkadaşları [23], TEG–ısı depolama entegre sistemlerinde ısınma süresinin büyük ölçüde depolama malzemesinin termofiziksel özellikleri ve uygulanan sıcaklık seviyesine bağlı olduğunu, TEG modül tipinin ise daha çok elektriksel çıktı üzerinde etkili olduğunu ifade etmiştir.

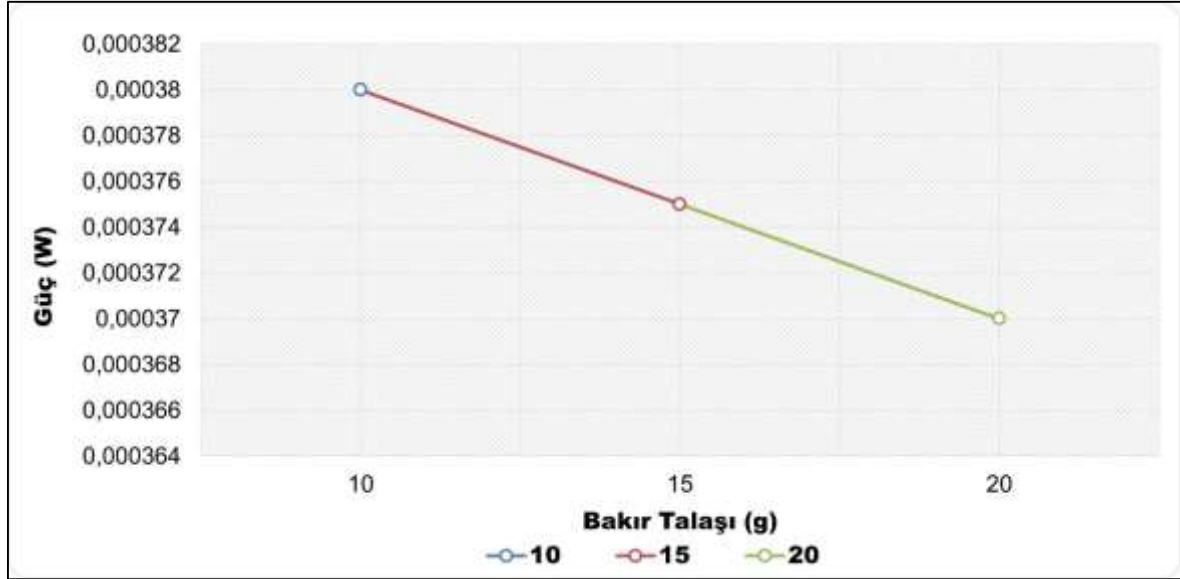
Sonuç olarak, süre analizleri göstermektedir ki; bu çalışmada kullanılan deneysel sistemde hedef sıcaklığa ulaşma süresi üzerinde en baskın parametre ısı kaynağı sıcaklığıdır. Bakır talaşı katkısı, ısı transferini destekleyici bir rol oynamakla birlikte ikincil düzeyde etki göstermiştir. TEJ modül tipinin süre üzerindeki etkisi ise ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durum, ilerleyen bölümlerde ele alınacak olan enerji ve verim sonuçlarının yorumlanmasında önemli bir temel oluşturmaktadır; zira sistemin daha uzun süre çalışması, toplam üretilen elektrik enerjisi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

4.2. Güç (W) Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Tartışılması

Bu çalışmada güç (W), termoelektrik jeneratör (TEJ) modüllerinden deney süresince elde edilen ortalama elektriksel güç olarak değerlendirilmiştir. Güç çıktıları, sabit yük koşulları altında ölçülen gerilim ve akım değerlerinden hesaplanmış ve deney parametrelerinin elektriksel çıktı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

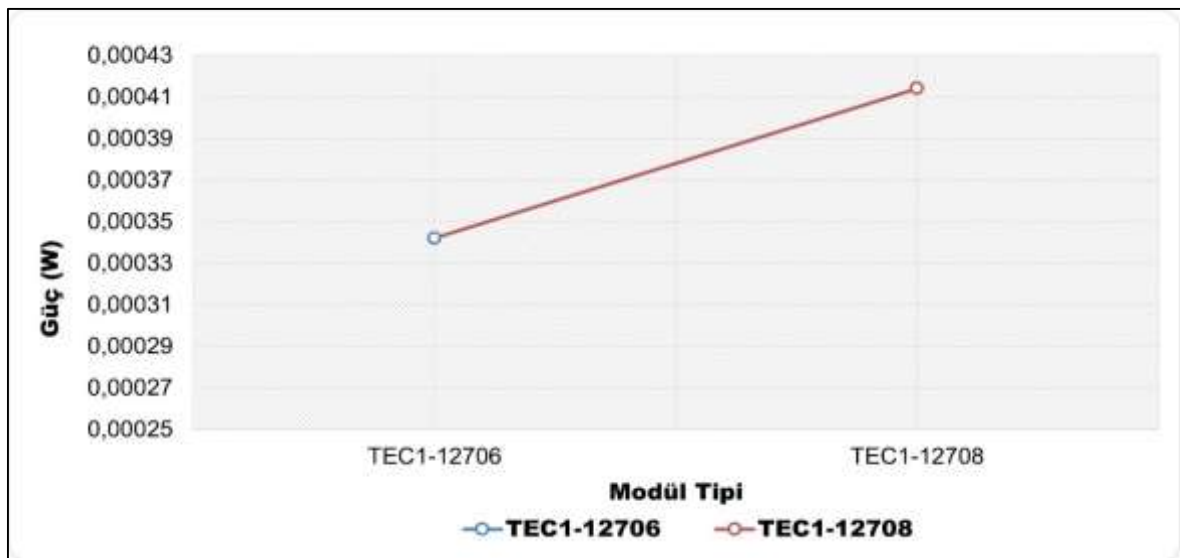
Deneysel sonuçlara göre, 65 °C, 70 °C ve 75 °C sıcaklık seviyelerinde elde edilen ortalama güç değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bu durum, deneylerde ölçülen güç değerlerinin belirlenen sıcaklık aralığında sıcaklığa duyarlılığının sınırlı olduğunu göstermektedir. Düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında, termoelektrik jeneratörlerin anlık veya ortalama güç çıktılarının, sıcaklık artışına rağmen aynı oranda yükselmemesi literatürde yaygın olarak raporlanan bir durumdur. Bunun temel nedenleri arasında, ısıl temas dirençleri, konvektif ve radyatif kayıplar ile termoelektrik modülün iç direnci yer almaktadır. Chen ve arkadaşları [24], düşük sıcaklık farklarında çalışan TEJ sistemlerinde güç artışının sınırlı kaldığını ve sıcaklık artışının çoğunlukla sistem kayıpları tarafından dengelendiğini belirtmiştir.

Şekil 4.3’de, bakır talaşı miktarının güç üzerindeki etkisi sunulmuştur. Bakır talaşı miktarının 10 g’dan 20 g’a çıkarılmasıyla güç değerlerinde belirgin bir artış gözlenmemiş, aksine çok sınırlı bir düşüş eğilimi ortaya çıkmıştır. Bu durum, ısıl iletkenliği artırmak amacıyla eklenen metal katkının, her koşulda elektriksel güç artışı sağlamadığını göstermektedir. Literatürde, iletken katkılarının ısı transferini hızlandırmasına rağmen, termoelektrik modül üzerinde istenen sıcaklık farkını azaltarak güç çıktısını baskılayabileceği belirtilmektedir. Borhani ve arkadaşları [22], metal katkılı PCM ve duyulur ısı depolama sistemlerinde optimum katkı miktarının aşılması durumunda elektriksel çıktıların olumsuz etkilenebileceğini rapor etmiştir.



Şekil 4.3. Bakır talaşı miktarının güç üzerindeki etkisi

Şekil 4.4’de, kullanılan TEJ modül tipinin güç üzerindeki ana etkisi verilmiştir. Sonuçlar, TEC1-12708 modülünün, TEC1-12706 modülüne kıyasla daha yüksek ortalama güç ürettiğini açıkça göstermektedir. Bu fark, modüllerin iç dirençleri, termoelektrik malzeme özellikleri ve tasarımlarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Benzer sonuçlar, farklı TEG modüllerinin karşılaştırıldığı deneysel çalışmalarda da rapor edilmiştir. Atouei ve arkadaşları [23], modül seçiminin, düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında güç çıkışı üzerinde en belirleyici faktörlerden biri olduğunu vurgulamıştır.

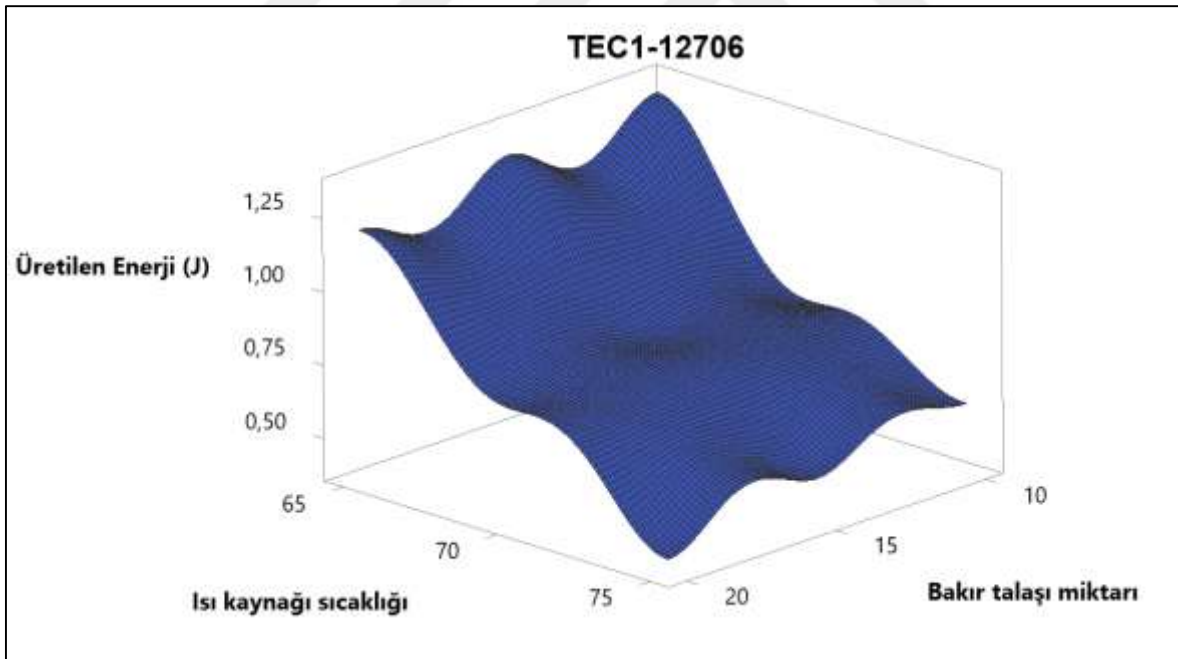


Şekil 4.4. TEJ modül tipinin güç üzerindeki ana etkisi

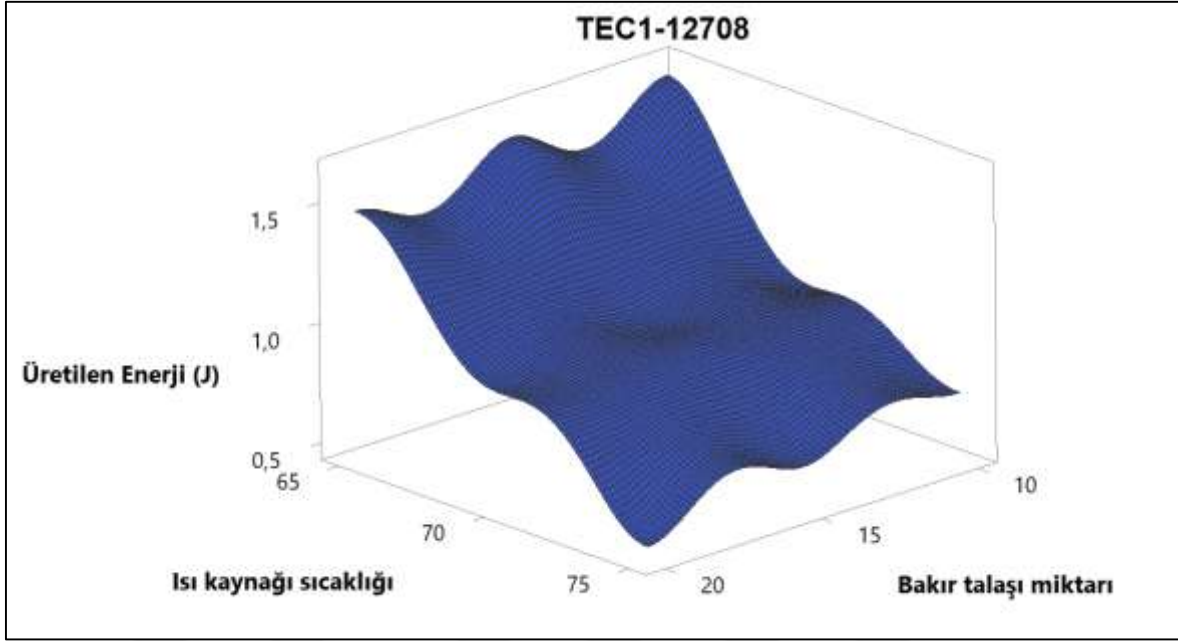
Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmada güç çıktısı üzerinde modül tipinin belirleyici olduğu; ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının ise güç üzerinde ikincil ve sınırlı etki gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu bulgu, ilerleyen alt bölümlerde ele alınacak olan üretilen toplam enerji ve verim analizleri açısından önemlidir; zira sabit veya sınırlı güç seviyelerinde, sistemin çalışma süresi ve termal kararlılığı, toplam enerji üretimini doğrudan etkilemektedir.

4.3. Üretilen Enerji (J) Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Tartışılması

Bu çalışmada üretilen elektrik enerjisi (J), termoelektrik jeneratör (TEJ) modüllerinden elde edilen ortalama güç değerlerinin, deney süresi boyunca zamana bağlı olarak değerlendirilmesiyle belirlenmiştir. Deneylerde ölçülen güç değerleri ve hedef sıcaklığa ulaşma süreleri kullanılarak toplam üretilen enerji hesaplanmış ve deney parametrelerinin bu çıktı üzerindeki etkileri incelenmiştir.



Şekil 4.5. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının enerjisi (J) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği

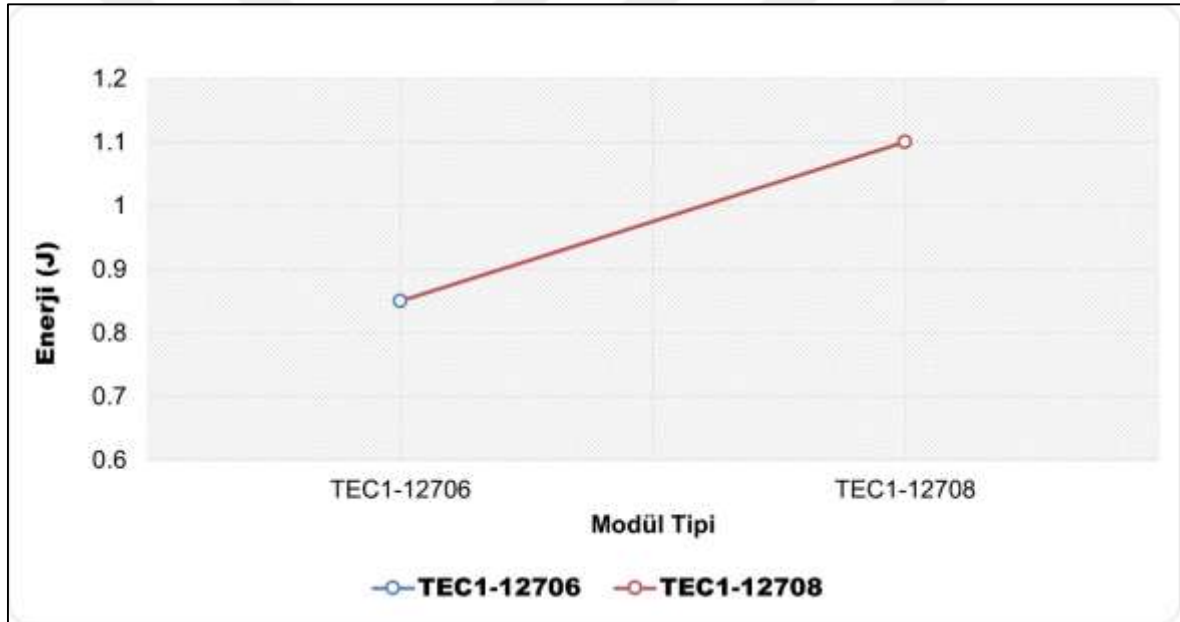


Şekil 4.6. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının enerjisi (J) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği

Şekil 4.5. ve Şekil 4.6'da, ısı kaynağı sıcaklığının üretilen enerji üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Sonuçlar, 65 °C sıcaklık seviyesinde üretilen toplam enerjinin, 70 °C ve 75 °C seviyelerine kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, ilk bakışta sıcaklık arttıkça enerji üretiminin artması beklentisiyle çelişkili gibi görünse de, deneysel yöntemin doğası dikkate alındığında tutarlı bir sonuçtur. Bu çalışmada deneyler, parafin sıcaklığı 58 °C seviyesine ulaştığında sonlandırılmıştır. Dolayısıyla, daha yüksek sıcaklık seviyelerinde sistem bu hedefe daha kısa sürede ulaşmış ve elektrik üretimi daha kısa süre devam etmiştir.

Bu nedenle, yüksek sıcaklık seviyelerinde elde edilen ortalama güç değerleri benzer olmasına rağmen, kısa çalışma süresi toplam üretilen enerjiyi sınırlandırmıştır. Benzer bulgular, termoelektrik jeneratörlerin ısı depolama sistemleriyle birlikte kullanıldığı çalışmalarda da rapor edilmiştir. Wang ve arkadaşları [25], PCM ve duyulur ısı depolama destekli TEJ sistemlerinde, toplam enerji üretiminin çoğunlukla sistemin çalışma süresine bağlı olduğunu ve tepe sıcaklıktan ziyade termal sürekliliğin belirleyici olduğunu ifade etmiştir.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da, bakır talaşı miktarının üretilen enerji üzerindeki sonuçlarını değerlendirildiğinde, 10 g bakır talaşı kullanılan deneylerde üretilen toplam enerjinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bakır talaşı miktarı arttıkça, enerji üretiminde azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu durum, yüksek ısı iletkenliğe sahip katkı malzemelerinin, parafin içerisindeki ısı dağılımını hızlandırmakla birlikte, termoelektrik modül üzerinde sürdürülebilir bir sıcaklık farkının oluşmasını sınırlayabileceğini göstermektedir. Literatürde, metal katkı oranının belirli bir seviyenin üzerine çıkması durumunda, termal dengelemenin hızlanarak TEJ performansını olumsuz etkileyebileceği belirtilmektedir. Borhani ve arkadaşları [22], bakır katkılı parafin sistemlerinde enerji üretimi açısından optimum katkı oranının kritik olduğunu vurgulamıştır.



Şekil 4.7. TEJ modül tipinin enerji üzerindeki etkisi

Şekil 4.7’de, TEJ modül tipinin üretilen enerji üzerindeki ana etkisi verilmiştir. Deney sonuçlarına göre, TEC1-12708 modülü, TEC1-12706 modülüne kıyasla daha yüksek toplam enerji üretmiştir. Bu fark, TEC1-12708 modülünün daha yüksek güç üretme kapasitesi ve düşük sıcaklık farklarında daha etkin çalışabilmesiyle ilişkilendirilmektedir. Atouei ve arkadaşları [23], farklı TEJ modüllerinin düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında karşılaştırıldığı çalışmalarında, modül seçiminin toplam enerji çıktısı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını rapor etmiştir.

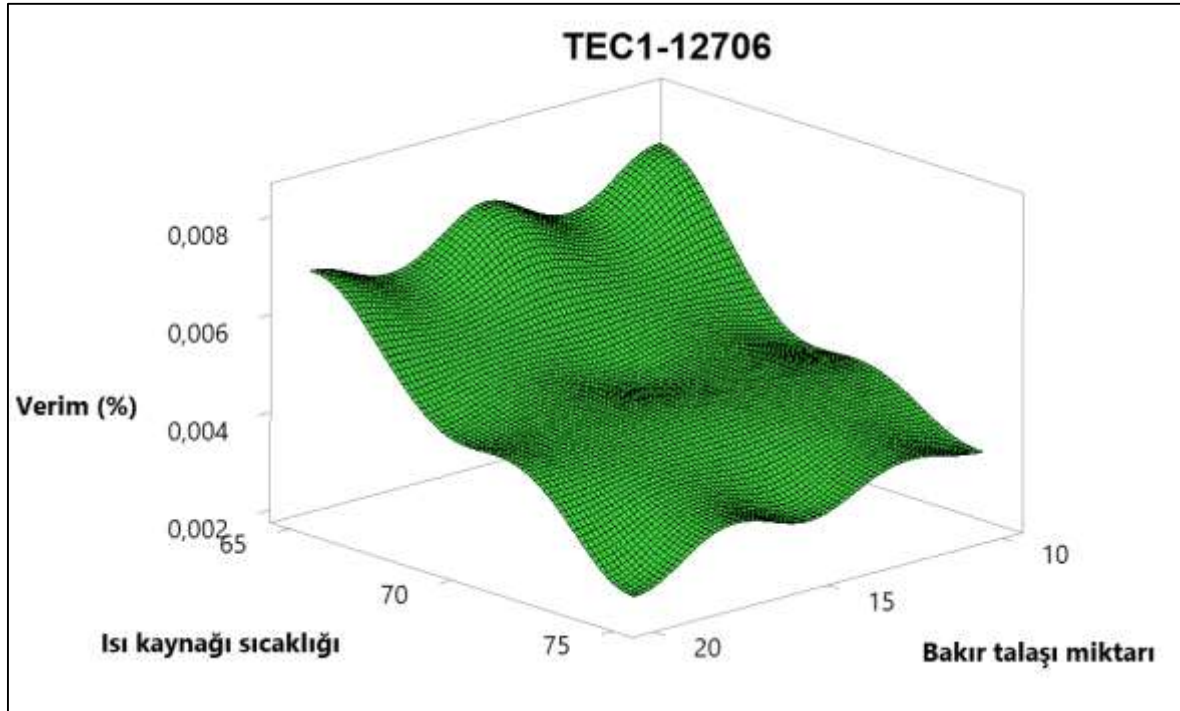
Genel olarak değerlendirildiğinde, üretilen toplam enerji üzerinde ısı kaynağı sıcaklığı, bakır talaşı miktarı ve TEJ modül tipi birlikte etkili olmakla birlikte, en baskın parametrenin sistemin çalışma süresi olduğu görülmüştür. Bu bulgu, termoelektrik jeneratörlerin düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında, kısa süreli yüksek sıcaklıklar yerine, uzun süreli ve kararlı termal koşullar altında daha verimli çalıştığını göstermektedir. Bu sonuçlar, bir sonraki bölümde ele alınacak olan verim (%) analizleri için önemli bir temel oluşturmaktadır.

4.4. Verim (%) Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Tartışılması

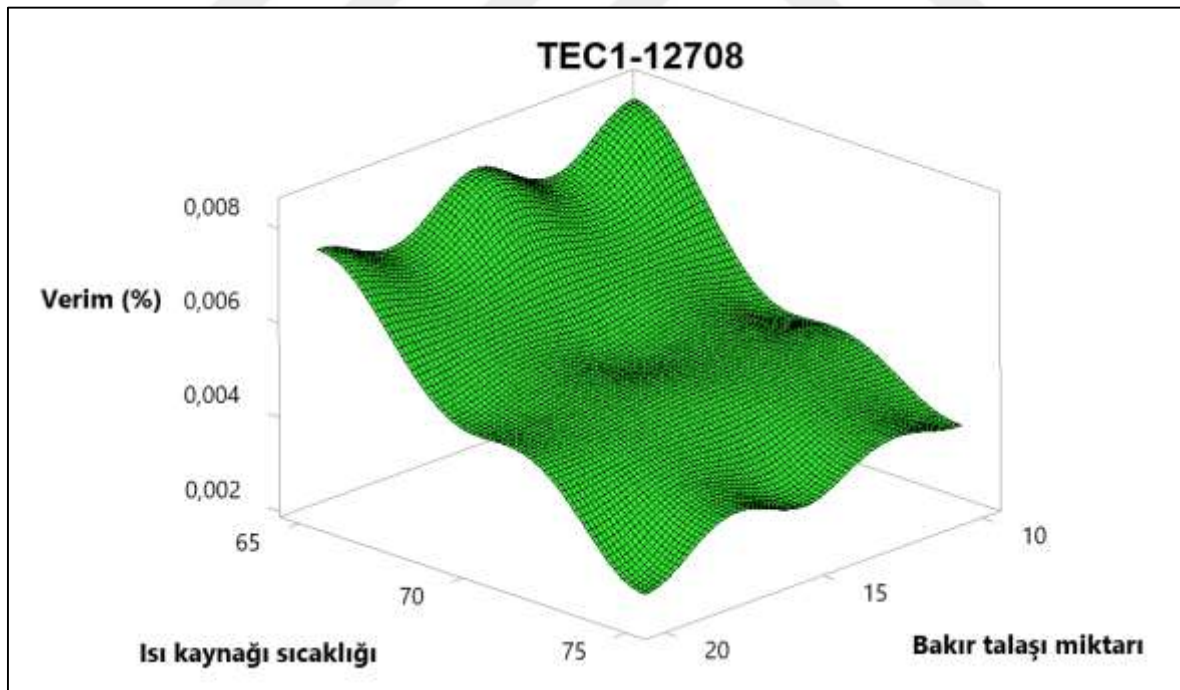
Bu çalışmada elektriksel verim (%), termoelektrik jeneratör (TEJ) modüllerinden elde edilen elektrik enerjisinin, sisteme aktarılan ısı enerjisiye oranı olarak tanımlanmıştır. Verim analizi, düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında termoelektrik sistemlerin etkinliğini değerlendirmek açısından kritik bir performans göstergesidir.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da, ısı kaynağı sıcaklığının elektriksel verim üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Deneysel sonuçlar, 65 °C sıcaklık seviyesinde elde edilen verimin, 70 °C ve 75 °C seviyelerine kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında, sıcaklık artışının her zaman verim artışı ile sonuçlanmadığını göstermektedir. Bu çalışmada, yüksek sıcaklık seviyelerinde sistemin hedef sıcaklığa daha kısa sürede ulaşması, termoelektrik jeneratörlerin daha kısa süre çalışmasına neden olmuş ve bu durum verimi olumsuz etkilemiştir.

Literatürde benzer şekilde, termoelektrik jeneratörlerin düşük sıcaklık farklarında çalıştığı uygulamalarda, verimin büyük ölçüde termal süreklilik ve sıcaklık farkının kararlılığı ile ilişkili olduğu belirtilmektedir. Wang ve arkadaşları [25], ısı depolama destekli TEJ sistemlerinde, kararlı ve uzun süreli sıcaklık farklarının, kısa süreli yüksek sıcaklıklara kıyasla daha yüksek verim sağladığını rapor etmiştir.



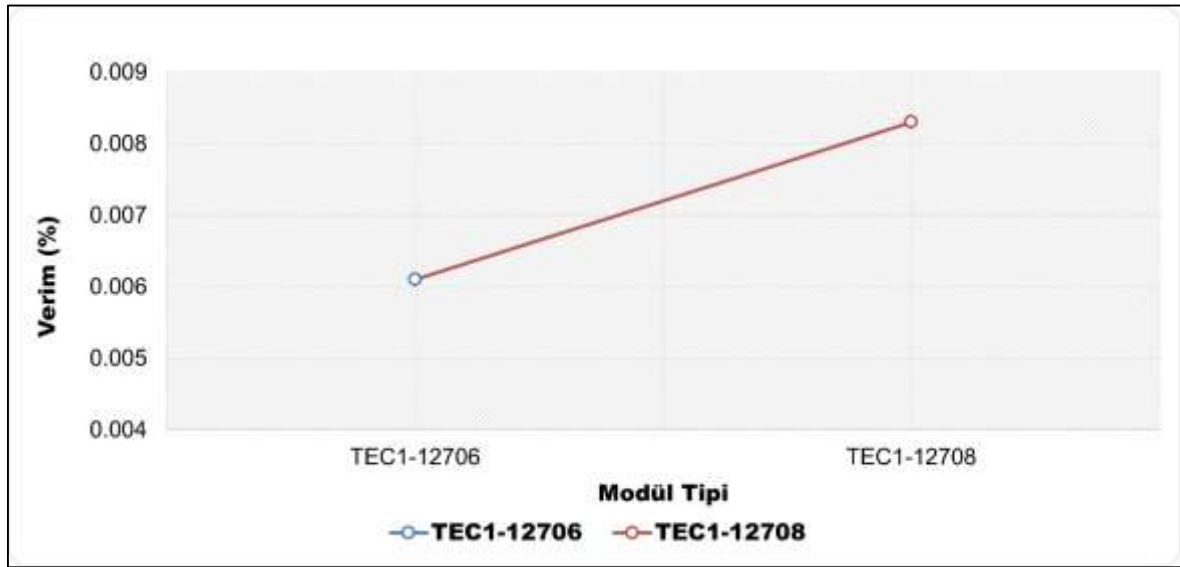
Şekil 4.8. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının verim (%) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği



Şekil 4.9. TEC1-12706 termoelektrik jeneratörü için ısı kaynağı sıcaklığı ve bakır talaşı miktarının verim (%) üzerindeki birleşik etkisinin üç boyutlu yüzey grafiği

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da, bakır talaşı miktarının verim üzerindeki etkisi incelendiğinde, 10 g bakır talaşı ilavesinin en yüksek verim değerini sağladığını göstermektedir. Bakır talaşı

miktarının artırılmasıyla birlikte verimde azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu durum, yüksek ısı iletkenliğe sahip katkıların, parafin içerisindeki ısı dağılımını hızlandırmasına rağmen, termoelektrik modül üzerinde istenen sıcaklık farkının korunmasını zorlaştırabileceğini göstermektedir. Literatürde, metal katkılı ısı depolama sistemlerinde optimum katkı oranının aşılması durumunda verim düşüşlerinin meydana gelebileceği rapor edilmiştir. Borhani ve arkadaşları [22], bakır katkılı sistemlerde belirli bir katkı oranından sonra elektriksel verimin azaldığını vurgulamıştır.



Şekil 4.10. TEJ modül tipinin verim üzerindeki etkisi

Şekil 4.10’da, TEJ modül tipinin verim üzerindeki ana etkisi verilmiştir. Deney sonuçlarına göre, TEC1-12708 modülü, TEC1-12706 modülüne kıyasla daha yüksek elektriksel verim sağlamıştır. Bu sonuç, modüllerin termoelektrik özellikleri, iç dirençleri ve düşük sıcaklık farklarındaki performans farklılıklarıyla ilişkilendirilmektedir. Atouei ve arkadaşları [23], düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında uygun TEJ modül seçiminin verim üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ifade etmiştir.

Bu çalışmada elde edilen en yüksek elektriksel verim (%0.00831), 65 °C ısı kaynağı sıcaklığı, 10 g bakır talaşı ve TEC1-12708 TEJ modülü kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu sonuç, düşük sıcaklıklı atık ısıların değerlendirilmesinde, yüksek sıcaklık yerine optimum sıcaklık–malzeme–modül kombinasyonunun daha kritik olduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, elektriksel verim üzerinde en baskın parametrelerin TEJ modül tipi ve bakır talaşı miktarı olduğu; ısı kaynağı sıcaklığının ise dolaylı ve sistemin çalışma süresiyle ilişkili bir etki gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında termoelektrik jeneratörlerin ısı depolama sistemleriyle birlikte kullanılmasının, verimi artırmak için etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, düşük sıcaklıklı atık ısıların değerlendirilmesine yönelik olarak duyulur ısı depolama ve termoelektrik jeneratör entegrasyonuna dayalı deneysel bir sistem geliştirilmiş ve sistem performansı kapsamlı biçimde incelenmiştir. Özellikle nükleer santrallerin kondenser çıkışlarında ve benzeri endüstriyel uygulamalarda ortaya çıkan düşük kaliteli atık ısıların elektrik enerjisine dönüştürülebilirliği deneysel olarak ortaya konmuştur.

Deneysel çalışmalar, faz değiştirmeyen sıvı parafinin duyulur ısı depolama ortamı olarak kullanılmasının, sistemin termal davranışının daha öngörülebilir ve kararlı bir şekilde incelenmesine olanak sağladığını göstermiştir. Parafine ilave edilen bakır talaşı ile ısı transferi desteklenmiş, ancak katkı miktarının sistem performansı üzerinde doğrusal olmayan bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, farklı termoelektrik jeneratör modüllerinin düşük sıcaklık farkları altındaki performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Isı kaynağı sıcaklığının artması, hedef sıcaklığa ulaşma süresini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu durum, sistemin çalışma süresini kısaltarak toplam üretilen elektrik enerjisi üzerinde belirleyici bir etki oluşturmuştur.
- Ortalama güç değerlerinin, incelenen sıcaklık aralığında sınırlı değişim gösterdiği; güç çıktısı üzerinde en baskın parametrenin termoelektrik jeneratör modül tipi olduğu belirlenmiştir.
- Toplam üretilen elektrik enerjisinin, yalnızca sıcaklık seviyesine değil, sistemin çalışma süresine güçlü biçimde bağlı olduğu ortaya konmuştur. Daha düşük sıcaklık seviyelerinde daha uzun süreli çalışma, toplam enerji üretimini artırmıştır.
- Elektriksel verim açısından en yüksek performans, %0,00831 değeri ile 65 °C ısı kaynağı sıcaklığı, 10 g bakır talaşı ve TEC1-12708 termoelektrik jeneratör modülü kombinasyonunda elde edilmiştir.

- Bakır talaşı miktarının belirli bir seviyenin üzerine çıkarılması, ısı dağılımını hızlandırmasına rağmen termoelektrik modül üzerinde sürdürülebilir sıcaklık farkını azaltmış ve verimde düşüşe neden olmuştur.
- Üç boyutlu yüzey grafikleri, sıcaklık ve bakır talaşı miktarının sistem çıktıları üzerindeki birleşik etkilerini açıkça ortaya koymuş; optimum çalışma bölgesinin düşük sıcaklık ve düşük katkı oranlarında oluştuğunu göstermiştir.

Bu sonuçlar doğrultusunda, düşük sıcaklıklı atık ısı uygulamalarında yalnızca yüksek sıcaklık seviyelerinin hedeflenmesinin yeterli olmadığı; bunun yerine uzun süreli ve kararlı ısı depolama koşullarının sağlanmasının elektriksel verim açısından daha kritik olduğu sonucuna varılmıştır. Duyulur ısı depolama destekli termoelektrik jeneratör sistemlerinin, uygun parametreler altında düşük kaliteli atık ısıların geri kazanımı için uygulanabilir bir çözüm sunduğu değerlendirilmiştir.

5.1. Öneriler

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular ışığında, gelecekte yapılabilecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Isı depolama ortamında farklı metal katkı türlerinin (alüminyum, grafit, metal köpük vb.) kullanılarak ısı transferi ve verim üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenebilir.
- Termoelektrik jeneratör modüllerinin seri-paralel bağlantı konfigürasyonları araştırılarak, sistemin toplam güç ve enerji üretim kapasitesi artırılabilir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, düşük sıcaklıklı atık ısıların elektrik enerjisine dönüştürülmesinde duyulur ısı depolama ve termoelektrik jeneratör entegrasyonunun uygulanabilirliğini deneysel olarak ortaya koymuş ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik gelecekteki çalışmalar için önemli bir temel oluşturmuştur.

KAYNAKLAR

1. Ochieng ,A. O., Megahed., T. F. Ookawara, S., Hassan, H. (2022). Comprehensive review in waste heat recovery in different thermal energy-consuming processes using thermoelectric generators for electrical power generation. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 134–154.
2. Chen, W.H., Carrera Uribe, M., Kwon, E.E., Lin, K.Y.A., Park, Y.K., Ding, L., Saw, L.H. (2022). A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, ANOVA, and RSM. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112917.
3. Loni, R., Najafi, G., Bellos, E., Rajaei, F., Said, Z., Mazlan, M. (2021). A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future Outlook. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125070.
4. Li, H., Liu, C. (2022). Performance comparison of thermal power generation—organic Rankine cycle and thermoelectric generator for waste heat recovery (parametric/exergetic analysis). *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42(2), 159-168.
5. Nassar, A. (2024). Enhancing the thermal transfer properties of phase change material for thermal energy storage by impregnating hybrid nanoparticles within copper foams. *Results in Engineering*. 21, 101885.
6. Ochieng, A. O., Megahed, T. F., Ookawara, S., Hassan, H. (2022). Comprehensive review in waste heat recovery in different thermal energy-consuming processes using thermoelectric generators for electrical power generation. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 134–154,
7. Champier, D. (2017). Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 140, 167–181.
8. Mettawee, E. B. S., Assassa, G. M. R. (2016). Experimental study of a compact PCM solar collector. *Energy*, 31(14), 2958–2968,
9. Çinici, O.K. (2022). Optimization of melting time of solar thermal energy storage unit containing spring type heat transfer enhancer by Taguchi based grey relational analysis. *Journal of Energy Storage*, 47, 103671.
10. Afshan, S. (2020). Effect of tank aspect ratio / geometry on latent-heat thermal energy storage performance (experimental). *Renewable Energy*, 148, 876–888.
11. Cabeza, L. F., Mehling, H., Hiebler, S., Ziegler, F. (2002). Heat transfer enhancement in water when used as PCM in thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 22, 1141–1151.
12. Jaworski, M., Bednarczyk, M., Czachor, M. (2016). Experimental investigation of thermoelectric generator (TEG) with PCM module. *Applied Thermal Engineering*, 96, 527–533.

13. Atouei, S. A., Rezania, A., Ranjbar, A. A., Rosendahl, L. A. (2018). Protection and thermal management of thermoelectric generator system using phase change materials: An experimental investigation. *Energy*, 156, 311–318.
14. Tuoi, T. T. K., Toan, N. V., Ono, T. (2020). Theoretical and experimental investigation of a thermoelectric generator (TEG) integrated with a phase change material (PCM) for harvesting energy from ambient temperature changes. *Energy Reports*, 6, 2022-2029.
15. Acır, A., Aktı, S. (2019). Investigation of hydrogen production potential of the LASER inertial confinement fusion fission energy (LIFE) engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(45), 24867–24879,
16. Wang, Y., Peng, Y., Guo, K., Zheng, X., Darkwa, J., Zhong, H. (2021). Experimental investigation on performance improvement of thermoelectric generator based on phase change materials and heat transfer enhancement. *Energy*, 229, 2211-2226.
17. Naderi, M., Ziapour, B. M., Gendeshmin, M. Y. (2021). Improvement of photocells by the integration of phase change materials and thermoelectric generators (PV–PCM–TEG) and study on the ability to generate electricity around the clock. *Journal of Energy Storage*, 36, 102384.
18. Mohajerzadeh, Z., Azari, R., Nozariasbmarz, A.(2025). Review: Enhancing building energy efficiency through the integration of phase change materials (PCMs) and Thermoelectric Generators (TEGs) into the building envelope. *Journal of Building Engineering*, 108, 112919.
29. Wang, J., Song, X., Ni, Q., Li, X., Meng, Q. (2021). Experimental investigation on the influence of phase change material on the output performance of thermoelectric generator. *Renewable Energy*, 177, 884–894.
20. Darkwa, J., Calautit, J., Du, D., Kokogianakis, G. (2019). A numerical and experimental analysis of an integrated TEG–PCM power enhancement system for photovoltaic cells. *Applied Energy*, 248, 688–701.
21. Xiao, X., Zhang, P., Li, M., Ma, Z. (2017). Heat transfer enhancement of paraffin-based phase change material by metal additives. *Energy Conversion and Management*, 146, 179–188..
22. Borhani, S., Hosseini, M. J., Ranjbar, A. A., Bahrampoury, R. (2018). Investigation of heat transfer enhancement in paraffin phase change material using copper particles. *Applied Thermal Engineering*, 128, 1218–1230.
23. Atouei, S. Ahmadi, Rezania, A., Ranjbar, A.A., Rosendahl, L.A. (2018). Protection and thermal management of thermoelectric generator system using phase change materials: An experimental investigation. *Energy*, 156, 311–318.
24. Chen, W.H., Chiou, Y.B., Chein, R.Y., Uan, J.Y., Wang, X.D. (2022). Power generation of thermoelectric generator with plate fins for recovering low-temperature waste heat. *Applied Energy*, 306, 118012.

25. Wang, H., Li, W., Tian, Y., Ding, L. (2020). Performance analysis of thermoelectric generator integrated with phase change material for low-temperature waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 205, 112416.







Gazili olmak ayrıcalıktır