
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TERMOFOTOVOLTAİK UYGULAMASININ KOMBİ ISITICIDA CFD İLE MODELLENMESİ

Barış İŞYARLAR

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2020

Barış İŞYARLAR tarafından hazırlanan "TERMOFOTOVOLTAİK UYGULAMASININ KOMBİ ISITICIDA CFD İLE MODELLENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Tayfun MENLİK

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. …….

Başkan: Prof. Dr. Şerafettin EREL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. …….

Üye: Prof. Dr. Adnan SÖZEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. …….

Üye: Prof. Dr. Kurtuluş BORAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. …….

Üye: Doç. Dr. Hasan ÖZCAN

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. …….

Tez Savunma Tarihi: 05/08/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

…….

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Barış İŞYARLAR
05/08/2020

TERMOFOTOVOLTAİK UYGULAMASININ KOMBİ ISITICIDA CFD İLE MODELLENMESİ

(Doktora Tezi)

Barış İŞYARLAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2020

ÖZET

Gaz ateşlemeli kombiler hem bireysel ısıtma sisteminde hem de kullanım sıcak suyunun hazırlanmasında yaygın olarak kullanıldığı için bu çalışma, termofotovoltaik bir sistemi kombiye dahil etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla bu çalışmada kombiye dahil edilmiş termofotovoltaik sistemin sayısal incelemesi araştırılmaktadır. İlk olarak, kombinin yanma odası için bir TPV sistem modeli tasarlanmıştır. Daha sonra kombinin yanma odasının sıcaklığı, kombinin en düşük ve en yüksek ısıtma gücünde çalıştırılmasıyla belirlenmiştir. Sayısal analizler bu sıcaklıklarla yapılmıştır. Son olarak TPV sistem modelinde, yayıcı kalınlığı, filtre-TPV hücre arasındaki mesafe, yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe ve filtre kalınlığı optimize edilmiştir. Sonuç olarak yayıcının optimum kalınlığı, filtre-TPV hücre arasındaki optimum mesafe, yayıcı-TPV hücre arasındaki optimum mesafe ve filtrenin optimum kalınlığı sırasıyla 20 mm, 1 mm, 34 mm ve 4 mm olarak belirlenmiştir. Bu optimizasyon ile TPV sistem modelinin elektrik güç yoğunluğu, yayıcı yüzeyinin belirlenen sıcaklıkları için 68,97 W/m^2-515,66 W/m^2 arasında değişmektedir. Ayrıca bu TPV sistem modeli, %1,05 ile %2,56 arasında değişen bir verime sahiptir.

Bilim Kodu : 92807

Anahtar Kelimeler : Kombi, termofotovoltaik, CFD

Sayfa Adedi : 137

Danışman : Prof. Dr. Tayfun MENLİK

THE MODELLING OF THE THERMOPHOTOVOLTAIC APPLICATION IN THE COMBI BOILER WITH CFD

(Ph. D. Thesis)

Barış İŞYARLAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2020

ABSTRACT

This study aims to integrate a thermophotovoltaic system into the combi boiler as gas-fired combi boilers are widely used in both the individual heating system and the preparation of domestic hot water. For this purpose, the numerical investigation of the thermophotovoltaic system integrated into the combi boiler is investigated in this study. Firstly, a TPV system model has been designed for the combustion chamber of the combi boiler. Then, the temperature of the combi boiler's combustion chamber has been determined by operating the combi boiler at the minimum and maximum heating power. Numerical analyses have been done with these temperatures. Finally, the emitter thickness, the distance between the filter-TPV cell, the distance between the emitter-TPV cell and the filter thickness have been optimized in the TPV system model. Consequently, the optimum thickness of the emitter, the optimum distance between the filter-TPV cell, the optimum distance between the emitter-TPV cell and the optimum thickness of the filter have been determined as 20 mm, 1 mm, 34 mm and 4 mm, respectively. With this optimization, the electric power density of the TPV system model varies between 68,97 W/m^2 / 515,66 W/m^2 for the determined temperatures of the emitter surface. In addition, the TPV system model has an efficiency varying between 1,05% and 2,56%.

Science Code : 92807

Key Words : Combi boiler, thermophotovoltaic, CFD

Page Number : 137

Supervisor : Prof. Dr. Tayfun MENLİK

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince kendisine ne zaman danışsam bana zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle faydalı olabilmek için elinden geleni sunan, her sorun yaşadığımda danıştığım, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Tayfun MENLİK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışmada kaynak ve yöntem açısından bana sürekli yardımda bulunarak yol gösteren hocalarım Prof. Dr. Kurtuluş BORAN'a ve Prof. Dr. Şerafettin EREL'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada desteğini ve yardımını benden esirgemeyen, karşılaştığım sorunların çözümünde ve çalışmanın yazım kuralları denetim konusunda bana yardımcı olan Öğr. Gör. Elif ŞENGÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince desteklerini her zaman hissettiğim, karşılaştığım sorunlarda bana yardım eden ve bu süreç boyunca beni güdüleyen Dr. Öğr. Üyesi Servet KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. ISI TRANSFER KURAMI 13

2.1. İletim 13

2.2. Taşınım 13

2.3. Işınım 14

3. ISIL IŞINIM 15

3.1. Karacisim Işınımı 17

3.2. Planck Kanunu 17

3.3. Wien'in Yer Değiştirme Kanunu 18

3.4. Stefan-Boltzmann Kanunu 19

3.5. Kirchhoff Kanunu 20

3.6. Işınım Şiddeti 20

3.7. Işınımın Özellikleri 22

3.8. Işınım Emilimi 23

3.9. Yüzeylerde Işınımla Isı Transferi 24

3.9.1. Görüş faktörü 25

3.10. Kara, Diffüz ve Gri Yüzeylerde Işınımla Isı Transferi 26

Sayfa

3.11. Gazlarda Işınımla Isı Transferi 27

4. MALZEMELERDE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER 29

4.1. Katıların Enerji Bant Yapıları 29

4.2. Malzemelerde İletkenlik 31

4.3. Malzemelerde Elektron Hareketliliği 33

4.4. Yarı İletken Malzemeler 34

4.4.1. Has yarı iletkenlik 34

4.4.2. Katkılı yarı iletkenlik 36

4.4.3. Yarı iletkenlerde p-n eklemi 40

4.5. Yarı İletken Malzemelerin İletkenliğini Etkileyen Etmenler 42

4.5.1. Elektron ve boşluk yoğunluğunun iletkenliğe etkisi 42

4.5.2. Yük taşıyıcılarının iletkenliğe etkisi 44

5. TERMOFOTOVOLTAİKLER 47

5.1. Termofotovoltaik Sistem 48

5.1.1. Isı kaynağı 48

5.1.2. Yayıcı 51

5.1.3. Filtre 61

5.1.4. Termofotovoltaik hücreler 66

5.2. Termofotovoltaik Sistemdeki Hücrelerin Uygun Çalışma Sıcaklığı ve Soğutulması 72

5.3. Termofotovoltaik Sistemin Elektriksel Verimi ve Tüm Sistemin Verimi 74

5.4. Termofotovoltaik Sistemdeki Elemanların Boşluk Düzenlemeleri 76

5.5. Termofotovoltaik Sistemin İlk Örnekleri 77

6. SAYISAL ÇALIŞMA 81

6.1. Kullanılan Yazılımlar 81

6.2. Geometrik Model ve Hücrelerin Soğutulması 81

Sayfa

6.3. Sayısal Model 85
6.4. Matematiksel Model 87
6.5. Ağ (mesh) Modeli 90
6.6. Kombiye Dahil Edilmiş TPV Sisteminin Yanma Odası Sıcaklığının Belirlenmesi 91
6.7. Sınır Koşulları 93
6.8. Sayısal Modelin Doğrulanması 95
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 97
7.1. TPV Sisteminde Yayıcı Kalınlığının Optimizasyonu 97
7.2. TPV Sisteminde Filtre-TPV Hücre Arasındaki Mesafenin Optimizasyonu 104
7.3. TPV Sisteminde Yayıcı-TPV Hücre Arasındaki Mesafenin Optimizasyonu 112
7.4. TPV Sisteminde Filtre Kalınlığının Optimizasyonu 119
8. SONUÇ 127
KAYNAKLAR 129
ÖZGEÇMİŞ 137

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Oda sıcaklığında bazı yarı iletken malzemelerin özellikleri..... 34

Çizelge 5.1. Nadir toprak oksitler için yardımcı malzemeler ve bu malzemeler ile katkılandırılmış nadir toprak oksitlerin ergime sıcaklıkları 57

Çizelge 6.1. Yayıcının genel tanımı..... 86

Çizelge 6.2. TPV hücresi için bileşen-değişkenlerin tanımı..... 87

Çizelge 6.3. Katı malzemelerin yayıcılıkları 87

Çizelge 6.4. Kesiti alınmış TPV sistemi için seçilen ağ modellerinin istatistiksel verileri..... 91

Çizelge 6.5. Eca Confeo Plus Dco 24 Hm kombinin teknik özellikleri 91

Çizelge 6.6. Heat transfer in solids modelinde uygulanan sınır koşulları 94

Çizelge 6.7. Surface-to-surface radiation modelinde uygulanan sınır koşulları..... 95

Çizelge 7.1. Yayıcı kalınlığına göre elektrik güç yoğunluğu sonuçları..... 99

Çizelge 7.2. Yayıcı kalınlığına göre TPV sisteminin verim sonuçları 100

Çizelge 7.3. Yayıcı kalınlığına göre TPV sistemin sıcaklık değerleri..... 101

Çizelge 7.4. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafeye göre elektrik güç yoğunluğu sonuçları 107

Çizelge 7.5. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sisteminin verim sonuçları 107

Çizelge 7.6. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sistemin sıcaklık değerleri..... 109

Çizelge 7.7. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafeye göre elektrik güç yoğunluğu sonuçları 114

Çizelge 7.8. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sisteminin verim sonuçları 114

Çizelge 7.9. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sistemin sıcaklık değerleri..... 116

Çizelge 7.10. Filtre kalınlığına göre elektrik güç yoğunluğu sonuçları..... 120

Çizelge 7.11. Filtre kalınlığına göre TPV sisteminin verim sonuçları 121

Çizelge 7.12. Filtre kalınlığına göre TPV sistemin sıcaklık değerleri..... 122

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Elektrik ve manyetik alanı gösteren elektromanyetik bir dalga 15

Şekil 3.2. Elektromanyetik dalga spektrumu 16

Şekil 3.3. Karacisim ışınım gücünün dalga boyu ve sıcaklıkla değişimi..... 19

Şekil 3.4. Işınım şiddeti 21

Şekil 3.5. İki yüzey arasındaki görüş faktörü 25

Şekil 4.1. 12 atomdan oluşan bir kümede elektron enerjisinin atomlararası mesafe ile değişimi 30

Şekil 4.2. 0 K sıcaklıkta katılarda çeşitli bant yapıları: (a) Metallerde bulunan elektron bant yapıları, aynı bantta dolu konumların üstünde ve dolu olana yakın elektron konumları mevcuttur, (b) elektron bant yapıları dolu valans bandı ile boş iletim bandı üst üste gelmektedir, (c) yalıtkanların elektron bant yapı özelliği, dolu valans bandı, boş iletim bandından nispeten geniş bir enerji aralığı ile ayrılmıştır, (d) yarı iletkenlerde bulunan elektron bant yapıları, bant aralığı dar olan yalıtkanlarınkiyle aynıdır 31

Şekil 4.3. Metallerin elektronlarının uyarılması: (a) metal elektronun uyarılmadan önceki konumu, (b) metal elektronun uyarıldıktan sonraki konumu 32

Şekil 4.4. Yalıtkan ve yarı iletken malzemelerin bir elektronunun valans bandından iletim bandına uyarılması: (a) yarı iletken ve yalıtkan malzemelerdeki bir elektronun valans bandından iletim bandına uyarılmadan önceki konumu, (b) yarı iletken ve yalıtkan malzemelerdeki bir elektronun valans bandından iletim bandına uyarılmadan sonraki konumu..... 33

Şekil 4.5. Has bir silisyuma ait elektrik iletkenliği ile ilgili bağlanma modeli: (a) silisyumda elektrik iletkenliğine ait uyarılma öncesi bağlanma modeli, (b) ve (c) silisyumda elektrik iletkenliğine ait uyarılma sonrası bağlanma modeli..... 35

Şekil 4.6. n-tipi bir yarı iletkenin enerji bant yapısı: (a) iletim bandının hemen altına yerleşen donör empürite seviyesinde elektron enerji seviyesinin gösterimi, (b) donör seviyesinde bulunan bir elektronun uyarılması sonucunda serbest elektron konumuna geçmesinin gösterimi..... 37

Şekil 4.7. n-tipi yarı iletkenlerdeki bir iletim elektronunun üretim şeması: (a) empürite atomu olan fosforun silisyum atomunun yerine geçmesi, (b) serbest elektronun meydana gelmesi için elektronun uyarılması, (c) elektronun uyarılması sonucu serbest elektronun hareket etmesi..... 38

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. p-tipi bir yarı iletkenin enerji bant yapısı: (a) IIIA gurubunda bulunan bor gibi bir katkılayıcı valans bandının yakınına alıcı bir konum üretimi, (b) valans bandında geride bir boşluk bırakılması ve alıcı seviyesine bir elektron uyarılması 39

Şekil 4.9. p-tipi yarı iletkenlerdeki bir elektron boşluğunun üretim şeması: (a) empürite atomu olan bor' un silisyum atomunun yerine geçmesi, (b) elektronun uyarılması sonucu boşluğun hareketi 40

Şekil 4.10. p-n eklemli yarı iletken bir malzeme: (a) p-n eklemine elektrik potansiyeli uygulamadan önce, (b) p-n eklemine ileri ön gerilim uygulanması, (c) p-n eklemine ters ön gerilim uygulanması..... 41

Şekil 4.11. İleri ve ters ön gerilim uygulanması durumunda p-n birleşmesi için akım voltaj davranışı..... 42

Şekil 4.12. Silisyum ve germanyum için has yük taşıyıcısı yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi..... 43

Şekil 4.13. Has yarı iletken silisyumun (kesikli çizgi) ve fosfor atomu ile katkılanmış silisyumun yük taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi 44

Şekil 4.14. Oda sıcaklığında silisyum için empürite yoğunluğuna göre elektron ve boşluk hareketliliği 45

Şekil 4.15. Belirlenmiş empürite yoğunluklarında elektron ve boşluk hareketliliğinin sıcaklıkla değişimi: (a) belirli empürite yoğunluklarında elektron hareketliliğinin sıcaklıkla değişimi, (b) belirli empürite yoğunluklarında boşluk hareketliliğinin sıcaklıkla değişimi..... 45

Şekil 5.1. TPV sisteminin bileşenleri (P_{em}: Yayıcının ışıma gücü, P_{rad}: Işınım gücü) ... 48

Şekil 5.2. Çeşitli malzemelerin normal yayınımının dalga boyu ile değişimi 53

Şekil 5.3. Çeşitli malzemelerin toplam normal yayınımının sıcaklıkla değişimi 53

Şekil 5.4. Silisyum karbürün ışıma spektrumu 54

Şekil 5.5. Dört farklı seçici yayıcının normalleştirilmiş yayma gücü ve dalga 56

Şekil 5.6. 1350 °C'de her bir tek-katkılı garnetlerin spektral ışımasına kıyasla çok-katkılı garnet kaplamanın spektral ışıması 58

Şekil 5.7. 1D, 2D ve 3D fotonik kristallerin yapısı 59

Şekil 5.8. 10 katmanlı Si/SiO_2-1D fotonik kristal seçici yayıcının taramalı elektron mikroskop görüntüsü..... 59

Şekil 5.9. Metamalzeme seçici bir yayıcının yapısı..... 60

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.10. İkili bazı yarı iletken malzemelerin kafes sabiti ile bant aralık ilişkisi 71

Şekil 5.11. Üçlü ve dörtlü bazı yarı iletken malzemelerin kafes sabiti ile bant aralık ilişkisi 71

Şekil 5.12. TPV hücresinin soğutulması..... 73

Şekil 5.13. Termofotovoltaik sistemin yayıcı ve hücre mesafesinin (boşluk) ayarlanması (kesik çizgi TPV sistem elemanlarının birbirlerine olan mesafelerini belirtmektedir) 77

Şekil 5.14. JX Crystals tarafından geliştirilen ilk ticari TPV sistemin şematik çizimi... 78

Şekil 6.1. Eca Confeo Plus Dco 24 Hm kombinin çizimi..... 82

Şekil 6.2. Eca Confeo Plus Dco 24 Hm kombiye dâhil edilmiş TPV sistemi 83

Şekil 6.3. Eca Confeo Plus Dco 24 Hm kombiye dâhil edilmiş TPV sisteminin bileşenleri 83

Şekil 6.4. Kesiti alınmış TPV sistemi 85

Şekil 6.5. Kesiti alınmış TPV sisteminin ağ modeli 90

Şekil 6.6. TPV sisteminin sayısal modelinin doğrulanması 96

Şekil 7.1. Yayıcı kalınlığı için elektrik güç yoğunluğu 98

Şekil 7.2. Yayıcı kalınlığı için TPV sisteminin verimi..... 99

Şekil 7.3. Yayıcı kalınlığı için TPV hücresinin sıcaklığı..... 101

Şekil 7.4. Yayıcı kalınlığı 2 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 102

Şekil 7.5. Yayıcı kalınlığı 10 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 102

Şekil 7.6. Yayıcı kalınlığı 20 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 103

Şekil 7.7. Yayıcı kalınlığı 50 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 103

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.8. Yayıcı kalınlığı 60 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 103

Şekil 7.9. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe için elektrik güç yoğunluğu 105

Şekil 7.10. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe için TPV sisteminin verimi..... 106

Şekil 7.11. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe için TPV hücresinin sıcaklığı 108

Şekil 7.12. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 1 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 109

Şekil 7.13. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 2 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 110

Şekil 7.14. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 10 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 110

Şekil 7.15. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 20 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 110

Şekil 7.16. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 30 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 111

Şekil 7.17. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 39 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 111

Şekil 7.18. Yaycı-TPV hücre arasındaki mesafe için elektrik güç yoğunluğu 112

Şekil 7.19. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe için TPV sisteminin verimi..... 113

Şekil 7.20. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe için TPV hücresinin sıcaklığı 115

Şekil 7.21. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 30 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 116

Şekil 7.22. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 33 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 117

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.23. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 34 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 117

Şekil 7.24. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 35 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 117

Şekil 7.25. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 40 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 118

Şekil 7.26. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 43 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 118

Şekil 7.27. Filtre kalınlığı için elektrik güç yoğunluğu 119

Şekil 7.28. Fitre kalınlığı için TPV sisteminin verimi 120

Şekil 7.29. Filtre kalınlığı için TPV hücresinin sıcaklığı..... 122

Şekil 7.30. Filtre kalınlığı 1 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 123

Şekil 7.31. Filtre kalınlığı 2 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 123

Şekil 7.32. Filtre kalınlığı 3 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 123

Şekil 7.33. Filtre kalınlığı 4 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 124

Şekil 7.34. Filtre kalınlığı 5 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 124

Şekil 7.35. Filtre kalınlığı 10 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı 124

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Yb_2O_3 ile kaplanmış SiC yayıcı (yaklaşık 140 mm genişliğindedir) 61

Resim 5.2. Yb_2O_3 ile kaplanmış SiC yayıcının iç yapı resmi 61

Resim 5.3. İç yüzeyinde kızılötesi yansıtıcı olan SnO_2 kaplamalı kuvars tüp..... 66

Resim 5.4. GaSb fotovoltaik hücre 72

Resim 5.5. Germanyum alt tabaka 72

Resim 5.6. JX Crystals tarafından geliştirilen ilk ticari TPV sistemi 77

Resim 5.7. Paul Scherrer Enstitüsü tarafından üretilen TPV sistemi:
(a) 56 W elektrik çıkış gücüne sahip TPV sistemi,
(b) 50 W elektrik çıkış gücüne sahip TPV sistemi 79

Resim 6.1. Kombinin en düşük ısıtma gücünde çalışması durumunda yanma odasının sıcaklık değerleri 92

Resim 6.2. Kombinin en yüksek ısıtma gücünde çalışması durumunda yanma odasının sıcaklık değerleri 92

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\boldsymbol{A}$	Alan
$\boldsymbol{c}$	Elektromanyetik dalganın ortamdaki yayınma hızı
$\boldsymbol{c_o}$	Elektromanyetik dalganın vakumda yayınma hızı
$\boldsymbol{c_p}$	Sabit basınçta özgül ısı
$\boldsymbol{e}$	Foton enerjisi
$\boldsymbol{\lvert e \rvert}$	Elektron üzerindeki mutlak elektriksel yük
$\boldsymbol{e_b}$	Tüm dalga boyları için güç
$\boldsymbol{E}$	Işınım yayma gücü
$\mathbf{E}$	Elektrik alanı
$\boldsymbol{E_b}$	Karacisim ışınım enerjisi
$\boldsymbol{E_{b\lambda}}$	Spektral karacisim ışınım enerjisi
$\boldsymbol{E_g}$	Gazın yayma gücü
$\boldsymbol{E_{yayınan}}$	Cismin yaydığı ışınım enerjisi
$\boldsymbol{F}$	Görüş faktörü
$\boldsymbol{F_{amb}}$	Ortamın görüş faktörü
$\boldsymbol{FF}$	Doluluk faktörü
$\boldsymbol{G}$	Gelen ışınım akısı
$\boldsymbol{G_{amb}}$	Çevre ışınım akısı
$\boldsymbol{G_{ext}}$	Dış ışınım kaynaklarından gelen ışınım akısı
$\boldsymbol{G_m}$	Karşılıklı ışınım akısı
$\boldsymbol{G_{soğ}}$	Soğurulan ışınım akısı
$\boldsymbol{h}$	Isı taşınım katsayısı veya Planck sabiti
$\mathbf{H}$	Manyetik alan
$\boldsymbol{I_b}$	Karacisim ışınım şiddeti
$\boldsymbol{I_{b\lambda}}$	Karacisim spektral ışınım şiddeti
$\boldsymbol{I_e}$	Yayınan ışınım şiddeti

Simgeler	Açıklamalar
I_{e+r}	Yayınan ve yansıtılan ışınım şiddetlerinin toplamı
I_{λ}	Spektral geçen ışınımın şiddeti
$I_{0\lambda}$	Spektral gelen ışınımın şiddeti
$i_{b\lambda}$	Karacisim yüzeyinin yaptığı ışıma
J	Giden ışınım
J_{SC}	Kısa devre akımı
k	Isı iletim katsayısı veya Boltzmann sabiti
κ_{λ}	Spektral soğurma katsayısı
L	Kalınlık
LHV	Yakıtın alt ısıl değeri
$\dot{m}_{yakıt}$	Yakıtın kütlesel debisi
$\mathbf{n}$	Kırılma indeksi veya birim hacim serbest elektron
n	Yüzey normal vektörü
$P_{el,AC}$	Alternatif akım elektrik çıkış gücü
$P_{el,DC}$	Doğru akım elektrik çıkış gücü
$P_{_emit}$	Yayıcıdan yayılan güç akısı
$P_{el,net}$	TPV hücresi tarafından üretilen elektrik güç yoğunluğu
P_{GAP}	Yayıcıdan gelen ışınım gücü
P'_{GAP}	Filtreden geçen ışınım gücü
P_{RAD}	Yayıcıdan gelen ışınım gücü
P_s	Kaynak ısı oranı
P_U	TPV hücresi üzerine gelen ışınım gücü
$P_{yakıt}$	Yakıtın ısıl gücü
q	Isı akısı
q_0	Isı akısı
$q_{0,\,s}$	Kaynak ısı akısı
Q	Isı kaynağı
Q_b	Isı kaynağı
$\dot{Q}_{iletim}$	Isı iletim hızı
$\dot{Q}_{taşınım}$	Isı taşınım hızı
$\dot{Q}_{yayılan,max}$	Isı ışınım hızı

Simgeler	**Açıklamamlar**
$\boldsymbol{r}$	Yarıçap
$\boldsymbol{S}$	Yol uzunluğu
$\boldsymbol{S_{em}}$	Yayıcı yüzey alanı
$\boldsymbol{t}$	Zaman
$\boldsymbol{T}$	Sıcaklık
$\mathbf{T__{emitter}}$	Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı
$\boldsymbol{T_{ext}}$	Dış sıcaklık
$\boldsymbol{u}$	Akışkan hızı
$\boldsymbol{V_{OC}}$	Açık devre gerilimi
$\boldsymbol{x}$	Kalınlık
$\boldsymbol{\sigma}$	Stefan-Boltzmann sabiti veya elektriksel iletkenlik
$\boldsymbol{\lambda}$	Elektromanyetik dalga boyu
$\boldsymbol{v}$	Elektromanyetik dalga frekansı
$\boldsymbol{\omega}$	Katı açı
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Yayıcılık
$\boldsymbol{\alpha}$	Soğurganlık
$\boldsymbol{\rho}$	Yansıtıcılık veya yoğunluk
$\boldsymbol{\tau}$	Geçirgenlik
$\boldsymbol{\alpha_{(\lambda)}}$	Emilim katsayısı
$\boldsymbol{v_d}$	Sürüklenme hızı
$\boldsymbol{\mu_e}$	Elektron hareketliliği
$\boldsymbol{\eta}$	Verim
$\boldsymbol{\gamma}$	Özgül ısıların oranı
$\boldsymbol{\rho_d}$	Yönden bağımsız yüzeyin yansıtıcılığı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
EQE	Dış kuantum verimi
PhC	Fotonik kristal
PV	Fotovoltaik

Kısaltmalar	Açıklamalar
R	Nadir toprak elementler
RTPV	Radyasyon izotoplu termofotovoltaik
STPV	Güneş ışığı ile yoğunlaştırılmış termofotovoltaik
TE	Termoelektrik
TPV	Termofotovoltaik
VF	Görüş faktörü
YAG	Çok katkılı garnet

1. GİRİŞ

Enerji insanoğlunun ihtiyaçlarının karşılanması, çağdaş yaşamın gelişmesi gibi birçok amaç için kullanılmaktadır. Bu amaçları gerçekleştirmek için yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmasına karşın halen ağırlıklı olarak hidrokarbon kaynaklı enerji kaynakları tercih edilmektedir.

Enerjiyi verimli kullanarak ülke ekonomisine ve çevrenin korunmasına katkı sağlanabilir. Dünyanın en önemli enerji kaynaklarının birçoğu fosil yakıtlardan oluşmaktadır. Bundan dolayı enerji kaynakları hem üretim hem de tüketim aşamasında verimli bir şekilde kullanılmalıdır. Hidrokarbon yakıtlar enerji üretiminde (özellikle elektrik üretiminde) yaygın olarak kullanılmaktadır ve bilindiği gibi bu kaynaklar hızla tükenmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verileri incelendiğinde, Türkiye 2018 yılında elektrik üretimini, %37,3'ü kömürden, %29,8'i doğal gazdan, %19,8'i hidrolik enerjiden, %6,6'sı rüzgârdan, %2,6'sı güneşten, %2,5'i jeotermal enerjiden ve %1,4'ü diğer kaynaklardan elde etmiştir. 2019 yılı itibarıyla Türkiye'nin elektrik kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı %31,4'ü hidrolik enerji, %29'u doğal gaz, %22,4'ü kömür, %8'i rüzgâr, %6'sı güneş, %1,5'i jeotermal ve %1,7'si ise diğer kaynaklar şeklindedir [1]. Ayrıca Türkiye doğal gazın yaklaşık %98'ini ithal etmekte ve ithal edilen doğal gazla elektrik üretilmekte, bu doğal gaz sanayide çeşitli amaçlar için ve konutlarda ısıtma ve sıcak su temini için kullanılmaktadır [2]. Bu nedenle, enerji kullanan sistemler mevcut kaynakları verimli kullanmak doğrultusunda tasarlanmalıdır.

Yapılan çalışmalar

Yapılan çalışmalar ulusal ve uluslararası kapsamda ele alınmış olup, yapılan çalışmalarda kombiye uygulanmış bir TPV sistemine rastlanmamıştır. Yapılan tarama sonucunda çalışılan TPV sistem uygulamaları aşağıda verilmektedir.

Chubb ve Good (2018), "Birleştirilmiş Termofotovoltaik-Termoelektrik Enerji Dönüştürücüsü" adlı makalede, birleştirilmiş termoelektrik (TE) ve termofotovoltaik (TPV) enerji dönüştürücüsünün performansı teorik olarak modellenmiş ve çalışmada iki önemli sonuca varılmıştır. Birincisi; "dar bir sıcaklık aralığında birleştirilmiş sistem, tek başına TE

veya TPV' den daha yüksek bir verimliliğe sahiptir". İkincisi; "belirlenen sıcaklık aralığında elektrik güç çıkışı, tek başına TE veya TPV' den önemli ölçüde daha büyüktür" [3].

Tang ve diğerleri (2017), "GaInAsSb Termofotovoltaik Hücrelerinin Üretimi İçin "Ölü Bölge" Yüzeyinin Baskılanması" adlı makalede, n-$Ga_{0,78}In_{0,22}As_{0,2}Sb_{0,8}$ epitaksiyal filmlerde Zn difüzyon süreçleri, tek ve çift tümsekli bir dizi Zn profilinin elde edildiği farklı difüzyon kaynakları kullanılarak incelenmiştir. 1055 ℃'deki SiN seramik yayıcıdan gelen ışınımla Ga' dan zengin koşullar altında elde edilen GaInAsSb'nun çıkış güç yoğunluğu, GaInAsSb hücreleri Ga' dan zengin koşullar altında hassas aşındırma olmadan imal edilebilir olduğunu gösteren saf Zn koşulu altında elde edilen hücreninkinden çok daha büyük olduğu bulunmuştur [4].

Binidra ve diğerleri (2018), "Optimize Edilmiş Tek Boyutlu Fotonik Kristaller ile Termofotovoltaik Sistemlerde Spektral Kontrol" adlı makalede, Ge ve MgF_2 malzemesine dayanan çeyrek dalga periyodik, değiştirilmiş periyodik ve optimize edilmiş fotonik kristallerin optik tepkisi üzerine hesaplamalı sonuçları rapor edilmiştir. Termofotovoltaik sistemlerde spektral kontrole yönelik yüksek performanslı yapıların elde edilmesi için transfer matrisi yöntemi ile model arama optimizasyon algoritması birleştirilmiştir. Model arama algoritmasının, en uygun fotonik kristal tasarımına kolayca uygulanabileceğini ve böylece yüksek optik performans ve spektral verim elde ettiklerini göstermişlerdir [5].

Ferrari ve diğerleri (2014), "Termofotovoltaik Sistemlerin Tanıtımı ve Durumu" adlı makalede, bir TPV jeneratörünün özellikleri, temel bileşenlerinin davranışını yöneten fiziksel ilişkileri analiz edilmiştir. Ayrıca yakıcı, yayıcı, optik filtre ve fotovoltaik hücreler ile ilgili güncel teknolojiler hem her bir bileşenin rolünü hem de tüm sistemde birleştirilmesiyle göz önüne alarak incelenmiştir. Son olarak gerçekleştirilen ilk örneklerin eleştirel bir değerlendirmesini sunmuş ve tartışmışlardır [6].

Daneshvar ve diğerleri (2015), "Termofotovoltaikler: Temelleri, Zorlukları ve Beklentiler" adlı makalede, TPV' nin temel prensipleri ve ardından yanma termofotovoltaik sistemlerinin tüm ana bileşenlerinin gelişimi gözden geçirilmiş ve TPV' nin ticari olarak benimsenmesinin önündeki temel ve teknik zorluklar sunulmuştur. Son olarak TPV sisteminden beklentiler tartışılmıştır [7].

Heide (2012), “Termofotovoltaikler” adlı makalede, TPV sisteminin ana bileşenleri olan seçici yayıcı, filtre, TPV hücreleri hakkında ve TPV sisteminin pazar potansiyeli hakkında genel bilgi verilmiştir [8].

Bitnar ve diğerleri (2013), “Uygulamaya Geçişte Termofotovoltaikler” adlı makalede, yayıcılar, filtreler ve foto hücreler gibi TPV sistem bileşenleri ile ilgili gelişmeler gözden geçirilmiştir. Çalışmada teorik sistem simülasyonları, sistem verimliliği ve elektrik çıkış gücü konusunda deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca makalede yeni TPV uygulamaları önerilmiş ve bu teknolojinin ticari potansiyeli tartışılmıştır [9].

Alipoor ve diğerleri (2017), “Yeni Mikro-Termofotovoltaik Güç Jeneratöründe Hidrojen-Hava Yakma Özelliklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi” adlı makalede, termofotovoltaik (TPV) cihazlar için mikro yakıcı önermiş ve bu mikro yakıcının 3 boyutlu CFD modeli kullanılarak yanma özellikleri araştırılmıştır. Eğrisel tüplerde ikincil akışların bulunmasıyla, daha iyi ön ısıtmayı sağladığı ve yanıcılık sınırları, düz boruya kıyasla kavisli borularda dört kat daha fazla olduğu bulunmuştur. Ayrıca ikincil sıvının, mikro yakıcıda bir ısıl denge oluşturabildiğini göstermişlerdir [10].

Zhao ve diğerleri (2017), “Atık Isı Geri Kazanımı İçin Yüksek Performanslı Yakın Alan Termofotovoltaikler” adlı makalede, yüksek verimli ve yüksek güç yoğunluklu atık ısı geri kazanımı için yoğun alt dalga boylarına getirilen bir plazmonik yayıcı (indiyum kalay oksit) ve dar bantlı bir fotovoltaik hücreden (InAs) oluşan yakın alan TPV sistemi analiz edilmiştir. Böyle bir yakın alan TPV sisteminin, termal olarak uyarılmış yüzey plazmonları ve frekans düzenleyici modları ile spektral yeniden şekillendirme ve geliştirme sebebiyle 900 K yayıcı sıcaklığında yaklaşık %40’a kadar verim ve 11W/cm^2 güç yoğunluğuna sahip ısıyı elektriğe dönüştürebileceğini göstermişlerdir. Böylece atık ısı geri kazanımıyla yakın alan TPV sistemlerinin tipik termoelektrik sistemlerinden daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır [11].

Sansoni ve diğerleri (2017), “Yanma Termofotovoltaik Sistemi İçin Oval Optik Boşluk Değerlendirmesi” adlı makalede, oval enine kesitli bir yansıtıcı boşluk, bir yakıcıyı üç termofotovoltaik (TPV) hücre dizisine bağlanması önerilmiştir. Oval boşluk, yakıcı tarafından üretilen görünür ve kızılötesi ışınımı elektriğe dönüştürmek için bir termoelektrik mikro kojeneratörü içerisine yerleştirilmek üzere tasarlanmıştır. Germanyum bazlı foton

dönüştürücü, metalorganik kimyasal buhar birikimi teknikleriyle geliştirilmiş ve üretilmiştir. Her bir foton dönüştürücünün, 1473 K'de karacisim spektrumu ile aydınlatıldığında, 180 mW/cm^2'yi (230 mV gerilimde ve 55 °C'de) temin edebildiği tespit etmişlerdir [12].

Kim ve diğerleri (2018), "Nano-Baskı Litografisi Kullanılarak Termofotovoltaik Sistem İçin Spektral Seçici Yayıcının Tasarım ve Üretimi" adlı makalede, dönüşüm verimini düşük olan TPV sistemlerinin düşük verim sorununu çözmek için fotonik kristal (PhC) yapılarının üretimi de dahil olmak üzere çeşitli spektral seçici termal yayıcı teknolojileri araştırılmıştır. Bu amaçla ilk örnek olarak 2D-W (tungsten) PhC yayıcı tasarlamışlar ve düz bir W yayıcının performansı ile karşılaştırıldığında, toplam termal yayıcı veriminin 2D-W PhC yapısıyla birlikte neredeyse 3,25 kat daha arttığını tespit etmişlerdir [13].

DeMeo (2010), "Düşük Sıcaklıklı Termofotovoltaik Hücrelerin Test Edilmesi İçin Kriyojenik Termal Simülatör ve Bilgisayar Simülasyonları" adlı doktora tezinde, kriyojenik termal simülatörü, kızılötesi ışınımı elektriğe dönüştüren düşük sıcaklıklı (80 K- 400 K) termal fotovoltaik hücrelerin test edilmesi için tasarlanmış ve yapılmıştır. Sistem, sistem bileşenlerinin performansına dayalı olarak değerlendirilmiştir. Tezde ayrıca termofotovoltaik alanların gözden geçirilmesi, termofotovoltaik hücrelerin geliştirilmesi ve uygulanan testte kullanılan birçok araç ve yöntemin açıklanması da bulunmaktadır [14].

Xu (1998), "Orta Sıcaklıktaki Bir Termofotovoltaik (TPV) Sistemde Isı Değişiminin Çalışması" adlı yüksek lisans tezinde, yayıcı sıcaklığı 350 K ile 550 K arasında olan bir yayıcı ve bir fotovoltaik (PV) malzemeden oluşan vakumlanmış bir paralel plaka sistemindeki termal değişime ilişkin sayısal bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu simülasyon düşük sıcaklıkla çalışan sistemler için tasarlanmıştır. Sonuçlar, $In_{(0,72)}Ga_{(0,28)}As$ malzeme ile birleştirilmiş %25 Ho YAG ince film seçici yayıcının gerçek malzemeler için en yüksek güç üretim verimine sahip olduğunu göstermiş ve bu değerlerin, sıcaklığa bağlı olarak %28 ile %34 arasında değiştiğini tespit etmiştir [15].

Licht (2015), "Taşınabilir Enerji Üretimi için Termofotovoltaik Katalitik Akış Reaktörü" adlı yüksek lisans tezinde, TPV' ye ışınım enerjisi sağlayacak bir yanma sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Çalışma iki aşamalı olarak geçekleşmiştir. Birinci aşamada; yeni bir bölgesel ölçekli yanma sisteminin tasarımı ve denenmesi bulunmaktadır. Propan yakıtı, platin kaplı bir nikel köpük ara parçası ile katalitik olarak yakılır. Yakıtın hava eşdeğer oranı

Φ = 0,83 olduğunda yanma veriminin %7,4'e ulaştığı bulunmuştur. İkinci aşamada; bölgesel yakıcı yayma spektrumunu en iyi şekilde dönüştürmeye gerek duyan TPV cihazlarının işletme dalga boylarının uzatılmasına yönelik yöntemler araştırılmış ve difüzyon akımlarını bastırmak, karanlık akımı azaltmak ve genel güç özelliklerini geliştirmek için düzenli bir kafes yapısı kullanılmıştır. Silvaco yazılımı ile yapılan simülasyon sayesinde bariyer yapısının izafi diyot verimi %26,5 oranında arttırdığı tespit edilmiştir [16].

Shemelya (2013), "Foton bilimi: Termofotovoltaikler ve Işık Algılama Uygulamaları İçin Fotodiyotlar ve Metamalzemeler" adlı doktora tezinde, ışık algılama teknolojilerinde kullanılmak üzere bir termofotovoltaik enerji jeneratörünün çoklu aşamalarını optimize etmek ve dinamik kutuplanmaya duyarlı bir yüzey oluşturmak için foton biliminden yararlanılması amaçlanmıştır. Bu hedeflerin başarılması için, yüksek sıcaklıklı metamalzemeli yayıcılar, 2 boyutlu fotonik kristal filtreler, dinamik metamalzemeli polarizasyon filtreleri ve arayüzey uyumsuzluk dizisi fotodiyotları dahil olmak üzere çok sayıda fotonik yapı ve cihaz incelenmiş ve karakterize edilmiştir [17].

Pfiester (2015), "Termofotovoltaik Uygulamalarda Kullanılması İçin Metamalzeme Seçici Yayıcıların Optimizasyonu" adlı doktora tezinde, TPV sistemini verimli hale getirmek için TPV diyotunun bant aralığına uygun seçici yayıcıların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla atık ısının toplanması için gerekli sıcaklıklara dayanabilen, oldukça seçici bir yayıcı olarak metamalzeme yayıcıların kullanılması önerilmiştir [18].

Schroeder (1998), "Termofotovoltaik Sistemlerinin Performans Optimizasyonu" adlı doktora tezinde**,** termofotovoltaik (TPV) enerji üretim sistemi için sistem performansının modellenmesi ve uygun bir durumun belirlenmesi sorunu ele alınmıştır. Özellikle 100 W'lık silindirik bir TPV sisteminin performansı hem biçim hem de geometrinin bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Radyan verimi, sistem verimi ve güç yoğunluğu açısından uygun performans veren sistem değişkenleri değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda sonsuz paralel düz plaka kurulumu, maksimum radyan verimi %24,9 ve maksimum sistem verimi ise %22,4 oranında çıkardığı tespit edilmiştir [19].

Shemelya (2010), "Termofotovoltaik Geliştirme: Termofotovoltaik Verimi Artırmak İçin 2D Fotonik Kristaller" adlı yüksek lisans tezinde, fotonik kristallerin termofotovoltaik hücrelerle birleştirilmesi ile foton dönüşümünün geliştirilmesi üzerine bir çalışma

yapılmıştır. Böylece fotonik kristaller, termal foton emiliminin süresini artırarak önemli ölçüde kuantum ve dönüşüm verimi sağlamıştır [20].

Önal ve diğerleri (2017), "Endüstriyel Sistemlerde Yüksek Sıcaklıklı Atık Isı Kazanım Amaçlı Termofotovoltaik Uygulamalarında Teorik Modelleme" adlı bildiride, termofotovoltaik sistemlerde hücre tipi, yayıcı sıcaklığı, hücre sıcaklığı, seri ve paralel direnç gibi değişkenlerin hücre verimine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinin uygulanabilirliği, verimi ve geliştirilmesine yönelik görüşler belirtilmiş ve öneriler de bulunulmuştur [21].

Aybek (2015), "Endüstriyel Uygulamalarda Atık Isılardan Yararlanma Yöntemlerinin Belirlenmesi ve Termofotovoltaik Uygulama Yapılması" adlı yüksek lisans tezinde, enerji kayıplarını en aza indirmek için endüstriyel uygulamalarda atık ısılardan yararlanma yöntemleri araştırılmıştır. Yüksek sıcaklıklardaki ısı kaynaklarından atmosfere salınan atık ısı enerjisini termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemleri ile elektrik enerjisine dönüştüren teorik bir model uygulanmıştır. Sonuç olarak termofotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinin uygulanabilirliği, verimine ve geliştirilmesine yönelik görüşler belirtilmiştir [22].

Bernardi (2016), "Nano Ölçek- Aralıklı Termofotovoltaik Cihazda Gelişmiş Güç Üretimi İçin Sayısal ve Deneysel Teknikler" adlı doktora tezinde, nano ölçek-aralıklı termofotovoltaik (nano-TPV) cihazdaki güç üretimi ile geleneksel termofotovoltaik (TPV) sistemlerinin güç üretimi kıyaslanmıştır. İlk olarak, geleneksel TPV sistemlerine kıyasla nano-TPV cihazlarında artış gösteren güç üretimini ifade eden sayısal bir model sunulmuştur. Model, hücre içindeki ışınımı, elektrik ve ısıl kayıpları hesaba katarak yakın alan ışınımı, ısı ve yük taşımasını içermektedir. Sonuç bölümünde: Birinci olarak, bir tungsten yayıcı ve 100 nm kalınlığında bir boşluk ile 4,7'lik bir faktörle güç üretiminde bir artış gösterdiği tespit edilmiştir, ikinci olarak nano-TPV sistemlerinde geliştirilmiş güç oluşumunun altında yatan temel olgu olan karacisim sınırını aşan ışınımla ısı transferi deneysel verilere ayrılmıştır. 150 nm'lik bir aralık boyutunda karacisim sınırı, 8,4'lük bir faktör ile aşıldığı ve bu değerin, kriyojenik olmayan sıcaklıklarda makro ölçekli düzlemsel yüzeyler arasında kaydedilen en büyük değer olduğu tespit edilmiştir [23].

Lin (2015), "Termofotovoltaik Sistemlerin Verimini Artırmak İçin Farklı Seçici Termal Yayıcı Tasarımlarının Analizi" adlı yüksek lisans tezinde, farklı dielektrik malzemeler ve

farklı tasarım yapılarının etkilerini, ortaya çıkan emisyon dağılımı hesaplanarak analiz edilmiştir. TPV hücresinin kuantum verimine uygun yüksek bir emisyon üreten bir malzeme yapısı bulunması amaçlanmıştır. Farklı ince filmlerin, katkılı malzemelerin ve yüzey ızgaralarının spektral yayıcılığını hesaplamak üzere bir kod üretmek için Matlab'ı kullanmıştır. Sonuç olarak silisyum karbür veya silisyum dioksitin geliştirilmiş seçici termal yayıcı tasarımları, tungsten nano parçacıklar ile katkılanmıştır ve bu malzemelerin yüzey ızgaraları 0,4 μm ve 2 μm arasında yayıcılık değerlerine ulaştığını bulmuştur [24].

Saroop (1999), "Termofotovoltaik Uygulamalar İçin Düşük Bant Aralıklı Antimonidlerde Yeniden Düzenlenme Süreçleri" adlı doktora tezinde, termofotovoltaik (TPV) cihazları için antimonid-bazlı malzemelerde yeniden düzenlenme süreçlerini, bir radyo frekansı (RF) fotoreflektans tekniği kullanılarak araştırılmıştır [25].

Bauer (2006), "İngiltere'de Termofotovoltaik Uygulamalar: Sistem Tasarımının Kritik Özellikleri" adlı doktora tezinde, ticari TPV uygulamalarının potansiyeli, İngiltere'ye özel olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede, elektrik üretimi için rakip teknolojileri, yani güneş fotovoltaikleri, ısı makinesi jeneratörleri, elektrokimyasal hücreler ve doğrudan ısı-elektriği dönüştürme cihazları dikkate alınmıştır. TPV ve diğer yazılı kaynaklardan elde edilen bilgiler bir araya getirilmiştir. TPV sistemi için ısı kaynağı ve yayıcı, PV hücresi için ise teknolojik seçenekler incelenmiştir [26].

Astle (2004), "İlk örnek Termofotovoltaik Sistemin Tasarımı ve Testi" yüksek lisans tezinde, ticari tip uygulamada termofotovoltaik enerji üretimi bilgisinin arttırılması amaçlanmıştır. Temel sistem bileşenlerinin performansını ölçen deneysel bir çalışma yapılmıştır. 0,07 W/cm^2' den 0,13 W/cm^2 arasında değişen güç yoğunlukları, 6 kW' tan 9 kW' a kadar yakıcı ateşleme hızlarında ölçülmüştür [27].

El-Husseini (1997), "Termofotovoltaik Hücrelerin ve Sistemlerin Sayısal Modellenmesi" adlı doktora tezinde, TPV cihaz modellemesi için önemli olan sayısal cihaz modellerini içeren cihaz simülatörü ADEPT üzerinde değişiklik yaparak TPV sisteminin ısıl kayıpları ve sistem verimi üzerindeki etkileri açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıca sistem etkinliği ve üretilen güç arasındaki dengeyi içerecek şekilde sistem verimi üzerine yapılan analitik çalışmalar genişletilmiştir [28].

Adair (1997), “Termofotovoltaik Güç Üretim Ünitesinin Tasarımı ve Üretimi” adlı doktora tezinde, uygun seçici yayıcı sistemi belirleme ve yayıcıya karşılık gelen bir fotovoltaik hücreyle eşleştirme üzerine odaklanılmış bir sistem tasarlanmıştır. Sistem, akış tipi bir radyan yayıcıyı ısıtacak olan propan ve hava kullanan bir difüzyon tipi brülör içermektedir. Işınım enerjisini elektriğe çevirmek için yayıcının etrafına bir InGaAs fotovoltaik dizisi yerleştirilmiş ve sonuçları değerlendirmiştir [29].

Zierak (1997), “InGaAs ve InGaSb Termofotovoltaik Hücrelerin ve Malzemelerin Özellikleri ve Modellenmesi” adlı doktora tezinde, oda sıcaklığında çalışan $In_xGa_{1-x}As$ ve $In_xGa_{1-x}Sb$ hücrelerinin tasarımının optimize edilmesine yardımcı olmak için bir TPV hücre benzetim programı geliştirilmiştir. 0,55 eV bant aralıklı InGaAs ve InGaSb TPV hücrelerinin bir benzetimi, sırasıyla, %8,45 ve %7,56’ lık yüzey koruması olmayan InGaAs ve InGaSb hücreleri için dönüşüm verimini veren 1500 K karacisim kaynağı için gerçekleştirilmiştir. Yansıtıcı kaplamaları ve ideal spektral kontrol filtreleri olan hücrelerde ise sırasıyla InGaAs ve InGaSb için %34,2’lik ve %32,9’ luk verim elde edilmiştir [30].

Rahimi (2014), “Epitaksiyal ve Epitaksiyal Olmayan Termofotovoltaik Hücrelerin Tasarımı, Üretimi ve Nitelendirilmesi” adlı doktora tezinde, TPV uygulamaları için geniş alanlı GaSb tabanlı diyot teknolojisini gerçekleştirmeyi sağlayacak üretim ve tasarım yöntemleri uygulanmıştır. Bu büyüklükteki cihazlarda TPV verimi ciddi bir sorun olduğundan epitaksiyal GaSb, epitaksiyal GaInAsSb ve 1 cm^2 alanlı yerleştirilmiş GaSb kullanan işlevsel TPV hücreleri yapılmıştır. Tez ayrıca yarı iletken malzemelerin kalitesinden ohmik kontakların arayüzlerine, malzemelerin derinlemesine nitelendirilmesini ve analizini içermektedir [31].

Anikeev (2006), “Termofotovoltaik Uygulamaları İçin GaInAsSb ve InGaAs Malzemelerinde Yeniden Düzenlenme Süreçleri” adlı doktora tezinde, organik metalli buhar-faz epitaksi ile, GaSb ve InP alt tabakaları üzerinde geliştirilen GalnAsSb ve InGaAs alaşımlarında yeniden düzenlenme süreçlerinin analizi sunulmuştur. P-GalnAsSb / GaSb tip-II ara yüzeyinde elektron birikiminin, yeniden düzenlenme hızına önemli ölçüde katkıda bulunduğu anlaşılmıştır. Işınım ve Auger yeniden düzenlenme katsayıları, çeşitli kalınlık ve katkılama yoğunluklarına sahip bir dizi GalnAsSb yapısını ölçerek bulunmuştur. Bu çalışmada InGaAs’te yeniden düzenlenme kinetiği üzerine katkılayıcı madde tipinin etkisi ilk kez incelenmiştir [32].

Trifon (2012), “Termofotovoltaik Seçici Yayıcı Uygulamaları İçin Erbiyum Katkılı Seramik Nanofiber Sentezi” yüksek lisans tezinde, fotovoltaik hücrelerle birlikte kullanılmak üzere ısıl enerjinin toplanması için izotermal seçici yayıcıların gelişimi araştırılmıştır. Seçici yayıcı olarak kullanılması için $Er_xY_{2-x}Ti_2O_7$ piroklor yapısını sentezlemenin bir yolu üzerine odaklanılmıştır [33].

Walsh (2009), “Termofotovoltaik Uygulamalar İçin Metalik Fotonik Kristaller” doktora tezinde, fotonik bant aralık etkisi, fotonik kristal yapının kafes simetrisi ve boyutları ile belirlenen dar bir dalga boyuna uyarlamak için kullanılmıştır. Walsh çalışmasında “woodpile” 3D fotonik kristali incelemiştir. Çalışmasının en önemli bölümü kısa dalga boylu yüksek sıcaklıklı fotonik kristal yayıcılar için kullanılan malzeme ile ilgilidir. Tungsten, yüksek erime noktası nedeniyle woodpile fotonik kristal termal yayıcılar olarak araştırılmıştır. İridyum, 1-2 μm aralığında tungstenden daha ideal optik davranışa sahip alternatif bir yüksek sıcaklık malzemesidir. Atomik katman biriktirme kullanılarak ince tabaka iridyum ile tungsten woodpile yapıların kaplanmasıyla fotonik bant kenarının, bazı ölçeklendirmeler yapılarak tungstende mümkün olmayan 1 μm’nin altına hareket ettirilebilir olduğu bulunmuştur [34].

DeMeo (2013), “Termofotovoltaik Elektrik Üretimi İçin Nanoyapılar ve Metafotonikler” adlı doktora tezi, TPV cihazının üç ana bileşeni olan termal yayıcı, filtre ve fotodiyotun her birine hitap ederek bu teknolojiyi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Yayıcıyı, seçici ve son derece ayarlanabilir bir yayıcı yaratmak için yeni metamalzeme ve tasarımlar kullanılarak geliştirmeyi; iyi bir seçicilik ve ışık yakalama kabiliyetlerini gösteren ayarlanabilir bir filtre oluşturmayı hedeflemiştir. Bunlara ek olarak fotodiyotu, gerilmeli tabaka- tip II düzenli örgüler ve tek kutuplu bariyer diyotlar gibi yeni cihaz tasarımları kullanılarak ve ara yüzey uyuşmazlığı olan diziler, kafes uyumsuz malzemelere rağmen daha ucuz olan gerekli alt tabaka olarak galyum antimonide değiştirilmesini önermeyi amaçlamıştır [35].

Aljarrah (2009), “Düşük Sıcaklık Termofotovoltaik Sistemler İçin Seçici Yayıcı Olarak Gözenekli Nanokompozitlerde Işınım Isı Transferinin Modellenmesi ve Deneysel Olarak Doğrulanması” adlı doktora tezinde, nadir toprak oksitler ile katkılanmış elektro-eğrilmiş seramik nanofiberlerden elde edilen seçici yayıcılar sunulmuştur. Tercih edilen malzemeler, lifler için alüminyum oksit ve yayıcı malzeme olarak erbiyum oksittir. Üretilen yayıcıların, GaSb ve InGaAs PV hücreleri ile etkili bir şekilde bağlanabilen bir aralıkta seçici bir şekilde

kızılötesi ışınım yaydığı bulunmuştur. Üretilen yayıcılardan elde edilen net ışınımı hesaplamak için ışınım transferinin genel denklemine dayanan bir matematiksel model de geliştirilmiştir. Kuramsal olarak hesaplanan ile deneysel olarak ölçülen yayıcılık değerleri arasında çok tatmin edici bir tutarlılık elde edilmiştir [36].

Movahed (2016), "Kolloidal Nicem Noktalarına Dayalı Gradyan-Katkılı Termofotovoltaik Cihazlar" adlı yüksek lisans tezinde, 800 °C bir karacisim kaynağından kızılötesi ışınımını toplayan kuantum noktaları kullanılarak yapılan termofotovoltaik cihazlar sunulmuştur. Gradyan katkılı kolloidal kuantum nokta termofotovoltaik cihaz yaparak, %0,39' luk bir güç dönüştürme verimi ile termofotovoltaik güç üretimi elde edilmiştir [37].

Horner (1994), "III-V Yarı iletkenlerinde Kendiliğinden Düzenlenme: $GaInP_2$'nin Optik Spektroskopi Çalışmaları ve İkinci Nesil Ga_2AsSb Termofotovoltaik Güç Üreticisi İçin Öneriler" adlı doktora tezinde, III-V yarı iletken olan $GaInP_2$'da yeniden düzenlenme, çeşitli optik spektroskopi teknikleri ile araştırılmıştır. Önce tek ve çift alt-değişken kendiliğinden düzenli örnekler arasında ayrım yapmanın optik bir yöntemi geliştirilmiştir. Son olarak, düzenlenmiş Ga_2AsSb'nun, çok çeşitli yayıcı sıcaklıkları için tek parçalı kafes ve akım uyumlu çoklu bağlantılı termofotovoltaik güç jeneratörleri yapımında kullanılabileceğini öngörmek için doğrusal cihaz modeli kullanılmıştır [38].

Notaro (2009), "Güneş-Termofotovoltaik Uygulama İçin Seramik Alt Tabaka Üzerinde Silisyum Karbür İnce Film Yayıcılar ve Galyum Antimonit Fotovoltaik Cihaz Tabakaları" adlı doktora tezinde, iki hedef belirlenmiştir: (1) düşük maliyetli ince film bazlı bir SiC yayıcı geliştirmek ve (2) fotovoltaik cihazlar için uygun düşük maliyetli III-V yarı iletken kristal ince filmler geliştirmek. Düşük maliyetli fotovoltaik cihaz malzemesi için, düşük maliyetli SiC ve seramik yüzeyler üzerinde ince film GaSb katmanları geliştirmek için bir işlem ortaya konulmuştur. Yüksek sıcaklıklı erime epitaksi işlemi, önceden sentezlenmiş GaSb topaklarından SiC ve seramik alt tabakalar üzerinde GaSb kesintisiz ince filmlerin yeniden kristalleştirilmesi için kullanılmıştır. Hidrojen ortamının, GaSb'nin erime noktası ve gelişme sıcaklığı olan 710 °C'de, yüksek kalitede film elde etmek için en uygun ortam olduğu tespit edilmiştir [39].

Bhusal (2006), "Orta Kızılötesi Fotovoltaikler İçin InP ile Eşleşen Kısa Süreli Gerilme Dengeli GaAsN/InAsN Düzenli Örgülü Kafes" adlı doktora tezinin 7. bölümünde kızılötesi

fotovoltaik uygulama için GaAsN/InAsN düzenli örgü esaslı cihaz başlığı altında termofotovoltaikler hakkında bilgiler verilmiştir [40].

Efendi (2017), "Dar bantlı GaInAsSb termofotovoltaik Yapıların Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi" adlı doktora tezinde, GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb TPV hetero diyotların elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir [41].

Çalışmanın amacı

Yukarıda seçilen çalışmalar incelendiğinde, elektrik güç yoğunluğunu ve TPV sistem verimini arttırmak için kombiye uygulanan TPV sisteminin uygun bir duruma getirilmesi ve sistemde kullanılan TPV hücrelerinin soğutulması hakkında bilgi eksikliği olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, sistem tarafından en yüksek elektrik güç yoğunluğunu ve en yüksek sistem verimini elde edebilmek için bir kombinin yanma odasına yerleştirilen TPV sistemini optimize etmektir.

Gaz yakıtlı kombiler hem bireysel ısıtma sisteminde hem de kullanım sıcak suyunun hazırlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yakıt olarak doğal gaz kullandıklarından, kombiler kendilerine verilen enerjiyi verimli kullanmak için uygun bir şekilde tasarlanmalıdır. Piyasada birçok gaz yakıtlı kombi ürünü vardır ve bu ürünler farklı ısı gücünde tasarlanmakta ve üretilmektedir. Bu kombiler, kullanım sıcak suyu hazırlama gibi işlemleri gerçekleştirmek için belirli miktarda elektrik tüketir. Bunlar dikkate alındığında, bir evin ısıtılması veya kullanım sıcak suyunun hazırlanması sırasında TPV sistemini bir kombinin yanma odasına yerleştirerek elektrik üretimi sağlamak mümkündür. Bu çalışma, kombiye uygulanan TPV sisteminin uygun bir tasarımla optimize edilmesiyle, en yüksek elektrik güç yoğunluğunun ve en yüksek sistem veriminin elde edilebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

2. ISI TRANSFER KURAMI

Isı, iki sistem arasında veya sistem ile çevresi arasındaki sıcaklık farkından dolayı gerçekleşen enerjinin bir biçimidir. Isı geçişi üç farklı yolla gerçekleşebilmektedir. Bunlar iletim, taşınım ve ışınımdır [42, 43]. TPV sistemlerinde yayıcıdan TPV hücresine iletim ve taşınımla olan ısı transferi, istenmeyen ısı transferi olarak kabul edilmektedir. Bu iki yolla TPV hücresine aktarılan ısı transferi en aza indirilmesi, bunun aksine, TPV sistemleri için ışınımla olan ısı transferi ise yüksek elektrik çıkış gücü ve verim açısından optimize edilmesi gerekmektedir [26].

2.1. İletim

İletim, bir maddenin yüksek enerjili parçacıklarından daha düşük enerjili parçacıklarına enerji aktarılmasıdır. İletim ile ısı transferi katı, sıvı ve gazlarda meydana gelebilmektedir [42]. Isı iletim eşitliği *Fourier ısı iletim kanunu* olarak ifade edilmektedir. İletim ile ısı transferi Eş. 2.1'de verilmektedir.

$$\dot{Q}_{iletim} = k.A.\frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{2.1}$$

Burada $\dot{Q}_{iletim}$ ısı iletim hızı (W), k ısı iletim katsayısı (W/m.°C), A iletimin gerçekleştiği yüzeyin alanı (m^2), Δx kalınlık (m) ve ΔT duvar boyunca sıcaklık farkıdır (°C).

2.2. Taşınım

Taşınımla ısı transferi, katı bir yüzey ile onun temas halinde olduğu bir akışkan arasında meydana gelmektedir. Katı yüzeyle temas halinde olan akışkanın hareketi ne kadar hızlı olursa, taşınım ile ısı transferi o kadar büyük olmaktadır. Taşınımla olan ısı transferinde akışkanın hareketi fan veya pompa gibi bir vasıtayla gerçekleşiyorsa buna zorlanmış taşınım, aksine akışkanın hareketi kaldırma kuvveti vasıtasıyla oluyorsa buna doğal taşınım denilmektedir [42]. Isının taşınım eşitliği *Newton'un soğutma kanunu* olarak bilinmektedir. Taşınımla olan ısı transferi Eş. 2.2'de verilmektedir.

$$\dot{Q}_{taşınım} = h.A_s.(T_s - T_\infty) \tag{2.2}$$

Burada $\dot{Q}_{taşınım}$ ısı taşınım hızı (W), h ısı taşınım katsayısı (W/m^2.°C), A_s taşınımın gerçekleştiği yüzeyin alanı (m^2), T_s yüzey sıcaklığı (°C) ve T_∞ akışkanın sıcaklığıdır (°C).

2.3. Işınım

Işınım, atom veya moleküllerin elektronik değişmelerin sonucunda maddeden elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılan enerjidir. Cisimlerin sıcaklıklarından dolayı yaydıkları ışınım türü ısıl ışınım olarak nitelendirilmektedir. Işınım ile ısı transferi, iletim ve taşınımdan farklı olarak bir aracı ortam olmadan da geçekleşebilir. Katılar, sıvılar ve gazlar ışınımı yayar, soğurur veya geçirirler [42]. Işınımla olan ısı transferi *Stefan-Boltzmann kanunu* olarak bilinmekte ve Eş. 2.3'te verilmektedir.

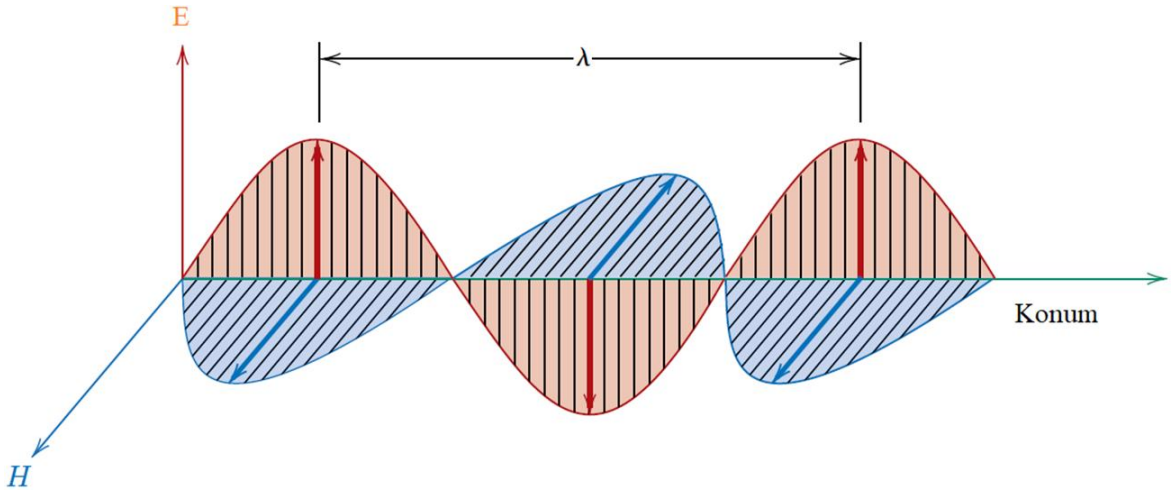
$$\dot{Q}_{yayılan,max} = \sigma . A_s . T_s^4 \tag{2.3}$$

Burada $\dot{Q}_{yayılan,max}$ ısı ışınım hızı (W), σ Stefan-Boltzmann sabiti (W/m^2.K^4), A_s ışınımın gerçekleştiği yüzeyin alanı (m^2) ve T_s termodinamik sıcaklıktır (K).

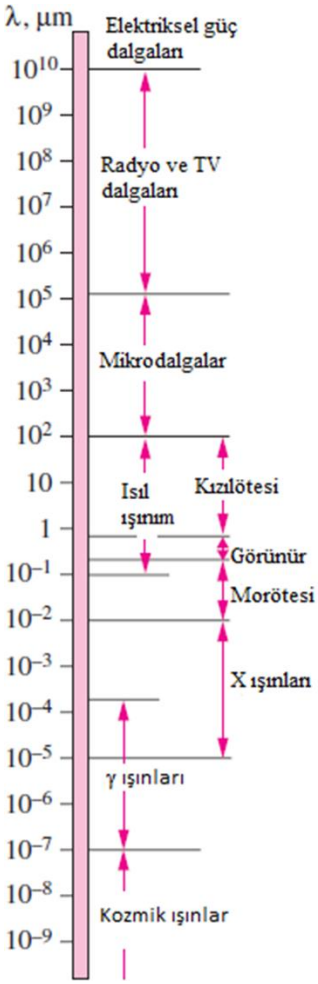
3. ISIL IŞINIM

Işınımın temelleri James Clerk Maxwell tarafından 1864 yılında atılmıştır. Elektromanyetik ışınım birbirine dik olan elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden meydana gelen dalgalardır. Bu dalgalar enerjiyi taşırlar. Elektromanyetik spektrum gama ışınlarını, X-ışınlarını, ultraviyole ışınlarını, görünür ışığı, ısıl ışınımını, mikrodalgaları ve radyo dalgalarını kapsamaktadır [42-44]. Elektrik (E) ve manyetik alanı (H) gösteren elektromanyetik bir dalga şekil 3.1'de [44], elektromanyetik dalga spektrumu şekil 3.2'de verilmektedir [42].

Işınım, iyonize eden ve iyonize etmeyen ışınım olarak ikiye ayrılır. Uzak morötesi, X-ışınları ve gama ışınları gibi iyonize eden ışınım, elektronları yörüngelerinden koparabilecek enerjiye sahiptir. Radyo dalgalar, mikrodalgalar, kızılötesi, yakın morötesi ve görünür ışık gibi iyonize etmeyen ışınım, elektronları atom içerisindeki yörüngelerinden hareket ettirebilecek enerjiye sahip olmayan ışınım çeşididir [17, 45].



Şekil 3.1. Elektrik ve manyetik alanı gösteren elektromanyetik bir dalga



Şekil 3.2. Elektromanyetik dalga spektrumu

Elektromanyetik dalgalar, dalga frekansı ve dalga boyu ile tanımlanır [17, 42]. Eş. 3.1'de elektromanyetik dalganın, frekans ve dalga boyu ile ilişkisi verilmektedir.

$$\lambda = \frac{c}{v} \tag{3.1}$$

Burada λ dalga boyu (µm), c dalganın bulunduğu ortamdaki yayınma hızı (m/s) ve v dalga frekansıdır (Hz).

Elektromanyetik ışınım foton adı verilen temel parçacıktan oluşmaktadır [44]. Eş. 3.2'de bir fotonun enerji eşitliği verilmektedir.

$$e = h.v = \frac{h.c}{\lambda} \tag{3.2}$$

Burada h Planck sabiti (J.s), v frekans (Hz), λ dalga boyu (μm)ve c dalganın bulunduğu ortamdaki yayınma hızıdır (m/s).

Isı transferine uygun olan elektromanyetik ışınım ısıl ışınımdır. Isıl ışınım, bir maddenin molekül, atom ve elektronlarının enerji değişiminin bir sonucu olarak yayınır. Isıl ışınım, sıcaklığı mutlak sıfırın üstünde olan maddelerden yayınmakta ve ısıl ışınımın yayınımı sıcaklık arttıkça artmaktadır. Elektromanyetik spektrumun 0,1 μm'den 100 μm'ye kadar olan bölümü ısıl ışınım olarak tanımlanmaktadır. Bu dalga boyu aralığında morötesi ışınların bir bölümü, kızılötesi ve görünür ışınların ise tamamı bulunmaktadır [42, 43].

3.1. Karacisim Işınımı

Işınımı mükemmel bir şekilde yayan ve soğuran cisimlere karacisim adı verilmektedir. Karacisim yönden ve dalga boyundan bağımsız olarak gelen bütün ışınımı soğurur ve yayınım yönüne dik, her yönde aynı ışınım enerjisi yayar. Başka bir deyişle karacisim diffüz yani yönden bağımsız yayıcıdır [42, 43]. Bir karacismin birim alan başına yaydığı ışınım enerjisi Stefan-Boltzmann kanunu olarak bilinen Eş. 3.3'te verilmektedir,

$$E_b(T) = \sigma . T^4 \tag{3.3}$$

Buradan E_b karacisim ışınım enerjisi (W/m^2), σ Stefan-Boltzmann sabiti (W/m^2.K^4) ve T yüzeyin mutlak sıcaklığıdır (K).

3.2. Planck Kanunu

Eş. 3.3 bütün dalga boyları için karacismin toplam ışınım enerjisini vermektedir. Ancak bazı durumlarda spektral karacisim yayma gücünün bilinmesi, yani karacismin dalga boyuna bağlı olarak ifade edilmesi gerekmektedir [24, 42, 43]. Karacismin dalga boyuna göre ifadesi *Planck Kanunu* olarak bilinmekte ve Eş. 3.4'te verilmektedir.

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 . \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda . T}\right) - 1\right]} \tag{3.4}$$

C_1 (W. μm^4/m^2) ve C_2 (μm.K), sırasıyla aşağıdaki gibi Eş. 3.5'te ve Eş. 3.6'da ifade edilmektedir.

$$C_1 = 2.\pi.h.c_o^2 = 3{,}74177x10^8 \tag{3.5}$$

$$C_2 = \frac{h.c_o}{k} = 1{,}43878x10^4 \tag{3.6}$$

Burada $E_{b\lambda}$ spektral kara cisim yayma gücü (W/m^2. μm), h Planck sabiti (6,626069x10^{-34}J.s), λ dalga boyu (μm), k Boltzmann sabiti (1,38065x10^{-23} J/K) ve T yüzeyin mutlak sıcaklığıdır (K). Ayrıca v frekans (Hz), n kırılma indeksi ve λ dalga boyu olmak üzere, $c_o = v.n.\lambda$ olarak ifade edilmektedir (c_o, vakumda elektromanyetik dalganın yayınma hızıdır) [46].

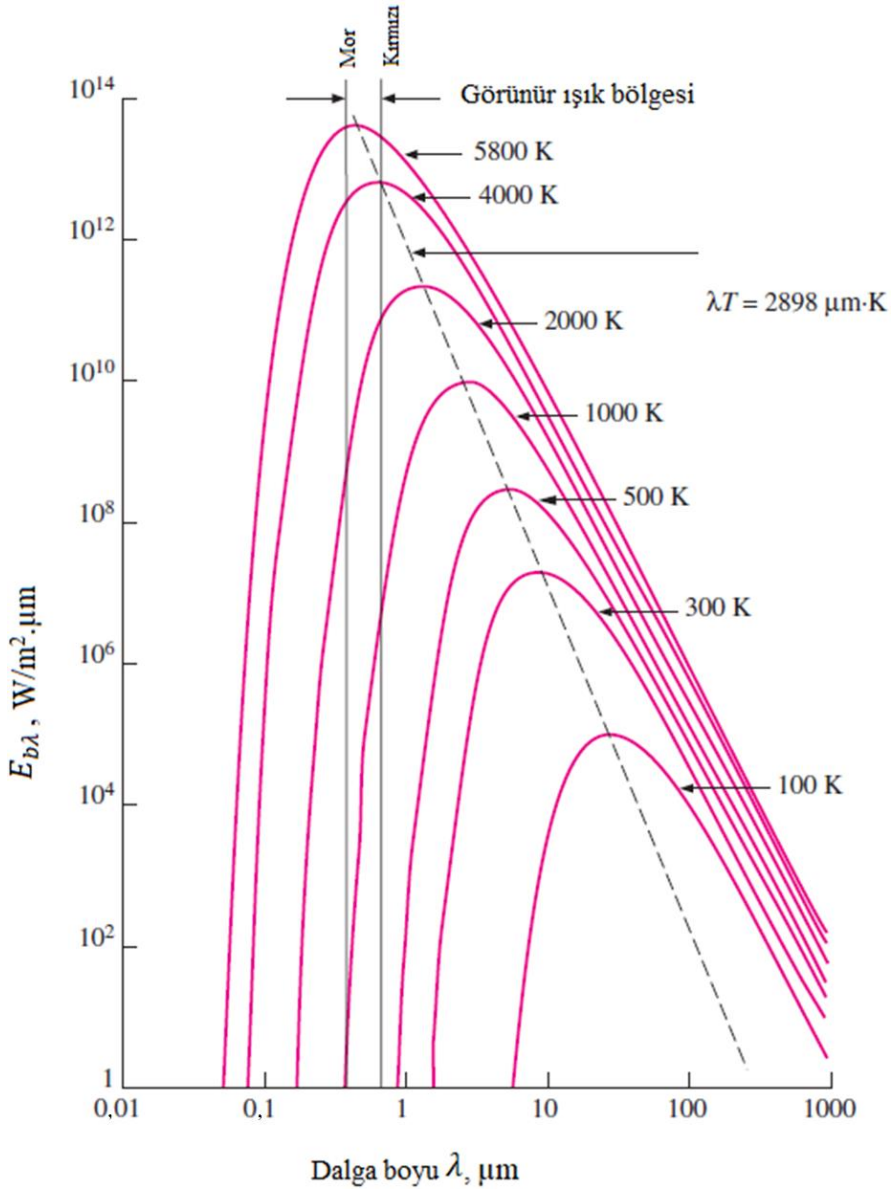
3.3. Wien'in Yer Değiştirme Kanunu

Karacismin yayma gücü artan sıcaklıkla birlikte artmakta, ancak dalga boyu küçülmektedir. Eş. 3.7'de görüldüğü gibi karacismin yayma gücü, dalga boyu ve sıcaklığın fonksiyonudur. Bu eşitlik kullanılarak karacismin yayma gücünün en yüksek olduğu değer, aşağıda verilen Eş. 3.7'den hesaplanabilmekte ve bu ifadeye *Wien'in Yer Değiştirme Kanunu* denilmektedir [26, 42, 43].

$$\lambda_{max}.T = 2897{,}8 \tag{3.7}$$

Burada λ dalga boyu (μm) ve T mutlak sıcaklıktır (K).

Karacisim ışınım gücünün dalga boyu ve sıcaklıkla değişimi şekil 3.3'te verilmektedir [42].



Şekil 3.3. Karacisim ışınım gücünün dalga boyu ve sıcaklıkla değişimi

3.4. Stefan-Boltzmann Kanunu

Eş. 3.4, bir dalga boyu için karacismin yayma gücünü vermektedir. *Stefan-Boltzmann Kanunu* olarak bilinen karacismin toplam yayma gücü, tüm dalga boyları için Eş. 3.4'e integrasyon yapılarak Eş. 3.8 elde edilmektedir [26].

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_{b\lambda}\, d\lambda = \frac{2.\pi^5.k^4.T^4}{15.c^2.h^3} = \sigma T^4 \tag{3.8}$$

Buradan σ Stefan-Boltzmann sabiti (5,67x10^{-8} W/m^2.K^4) ve T yüzeyin mutlak sıcaklığıdır (K).

3.5. Kirchhoff Kanunu

İzotermal geniş bir kovuk, yüzeyin ışıma özelliklerinden bağımsız olarak karacisim kovuğu olarak davranmaktadır. Bu cismin herhangi bir yüzeyine gelen ışınım, sıcaklığı T olan bir karacisim tarafından yayınan ışınıma eşit olduğunu veren ifadeye *Kirchhoff Kanunu* denir [42, 43]. Cismin soğurduğu ışınım Eş. 3.9'da ve cismin yaydığı ışınım Eş 3.10'da verilmektedir.

$$G_{soğ} = \alpha . A_s . \sigma . T^4 \tag{3.9}$$

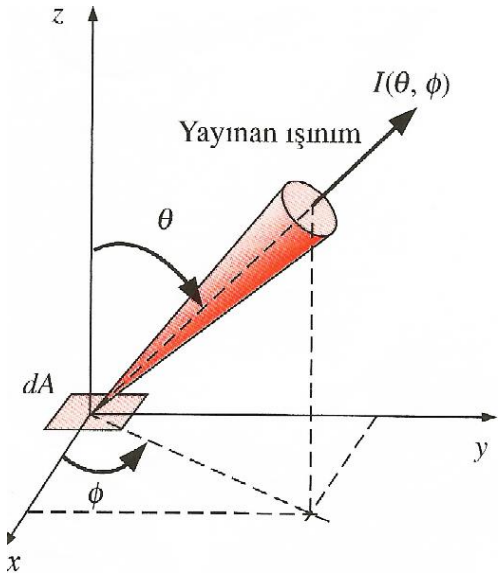
$$E_{yayınan} = \varepsilon . A_s . \sigma . T^4 \tag{3.10}$$

Burada α soğurganlığı, ε yayıcılığı, A_s yüzeyin alanını (m^2) ve T sıcaklığı (K) ifade etmektedir. Kirchhoff Kanunu'na göre cismin yaydığı ışınım, soğurduğu ışınıma eşit olmalıdır ve bu durum Eş. 3.11'de verilmektedir.

$$\alpha . A_s . \sigma . T^4 = \varepsilon . A_s . \sigma . T^4 \Rightarrow \alpha = \varepsilon \tag{3.11}$$

3.6. Işınım Şiddeti

Işınım şiddeti, ışınım enerjisinin yöne bağlı olarak tanımlanmasıdır. Bir noktadan geçen ışınımın yönü şekil 3.4'te gösterildiği zenit açısı (θ) ve azimut açısı ($\emptyset$) cinsinden tanımlanmaktadır. Gerçek yüzeylerden ışınımın yayınımı düzgün (uniform) değildir [42, 43]. dA alanından yayılan toplam enerji dQ olarak ifade edilmesi durumunda, ışınımın şiddeti (I) Eş. 3.12'deki gibi tanımlanmaktadır.



Şekil 3.4. Işınım şiddeti

$$I_e(\theta, \emptyset) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA.\cos\theta.d\omega} \tag{3.12}$$

Burada $I_e(\theta, \emptyset)$ ışınım şiddeti (W/m^2.sr), $d\dot{Q}_e$ ışınım enerjisi (W), dA diferansiyel yüzey alanı (m^2) ve $d\omega$ diferansiyel katı açıdır (sr). Katı açı, bir maddenin uzayda kapladığı alanı belirtmek için kullanılan açıdır ve birimi steradyandır (sr). Katı açı diferansiyel olarak Eş. 3.13'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} = \frac{(r.sin\theta.d\emptyset).(r.d\theta)}{r^2} = sin\theta.d\theta.d\emptyset \tag{3.13}$$

Birim alan için ışınımın yayma gücü, diferansiyel olarak Eş. 3.14'te verilmektedir.

$$dE = \frac{dQ_e}{dA} = I_e(\theta, \emptyset).cos\theta.sin\theta.d\theta.d\emptyset \tag{3.14}$$

Eş. 3.14 integrasyonla yüzeyden çevresine olan ışınım yayma gücü, Eş. 3.15'te gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$E = \int dE \int_{\emptyset=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_e(\theta, \emptyset).cos\theta.sin\theta.d\theta.d\emptyset \tag{3.15}$$

Eş. 3.15, diffüz yayan yüzeyler için Eş. 3.16'daki gibi sadeleştirilebilir.

$$E = \pi . I_e \tag{3.16}$$

Eş. 3.15, karacisim için ise Eş. 3.17'deki gibi sadeleştirilebilir.

$$E_b = \pi . I_b \tag{3.17}$$

Gelen ışınım, bir yüzey için birim alan başına bütün yönlerden gelen ışınımdır [42]. Gelen ışınımın değeri Eş. 3.18'de ve diffüz olarak gelen ışınımın değeri Eş. 3.19'da verilmektedir.

$$G = \int dG = \int_{\emptyset=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_i(\theta, \emptyset) . cos\theta . sin\theta . d\theta . d\emptyset \tag{3.18}$$

$$G = \pi . I_i \tag{3.19}$$

Giden ışınım, bir yüzeyin birim alanını terk eden ışınıma denir [42]. Giden ışınımın değeri Eş. 3.20'de, diffüz yayıcı ve yansıtıcı için giden ışınımın değeri Eş. 3.21'de verilmektedir. Eşitliklerde verilen I_{e+r} değeri yayınan ve yansıtılan ışınım şiddetlerinin toplamıdır.

$$J = \int_{\emptyset=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{e+r}(\theta, \emptyset) . cos\theta . sin\theta . d\theta . d\emptyset \tag{3.20}$$

$$J = \pi . I_{e+r} \tag{3.21}$$

3.7. Işınımın Özellikleri

Yayıcılık, bir yüzeyin belli bir sıcaklıkta yaydığı ışınımın aynı sıcaklıktaki karacismin yaydığı ışınıma oranıdır ve boyutsal olmayan bir ışınım özelliğidir. Yayıcılık, yayınan ışınımın dalga boyuna, yönüne ve yüzeyin sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir [24, 42]. Yayıcılığın değeri Eş. 3.12'de verilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{bir\ yüzeyden\ yayınan\ enerji}{bir\ karacisimden\ yayınan\ enerji} = \frac{E(T)}{E_b(T)} \tag{3.22}$$

Bir yüzeye ışınım düştüğünde yüzey tarafından bu ışınımın bir kısmı soğurulur, bir kısmı yansıtılır ve bir kısmı da geçirilir. Işınımın üç temel özelliği sırasıyla, soğurganlık, yansıtıcılık ve geçirgenlik Eş. 3.23'te, Eş. 3.24'te, Eş. 3.25'te olduğu gibi tanımlanmaktadır [24, 42].

$$\alpha = \frac{gelen\ ışınımın\ soğurulan\ kısmı}{toplam\ gelen\ ışınım} = \frac{G_{soğ}}{G} \tag{3.23}$$

$$\rho = \frac{gelen\ ışınımın\ yansıtılan\ kısmı}{toplam\ gelen\ ışınım} = \frac{G_{yan}}{G} \tag{3.24}$$

$$\tau = \frac{gelen\ ışınımın\ geçirilen\ kısmı}{toplam\ gelen\ ışınım} = \frac{G_{geç}}{G} \tag{3.25}$$

Işınımın bu üç özelliği boyutsuzdur ve 0 ile 1 arasında değişmektedir. Yukarıda verilen eşitliklerin her biri toplam gelen ışınıma bölünmesiyle Eş. 3.26 elde edilebilir [24 ,42].

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{3.26}$$

3.8. Işınım Emilimi

Bir ortamdan geçen ışınım ikinci bir ortamın yüzeyine çarptığında, bu ışınımın tamamı veya bir kısmı yansıtılabilir. Yansıtılmayan kısım ise ikinci ortama nüfuz eder. *Lambert-Beer Yasası*'na göre, bir çözeltiden geçen ışık miktarı, ışığın çözelti içinde kat ettiği yol ve çözelti yoğunluğu ile logaritmik olarak ters orantılı, emilen ışık miktarı ile ise doğru orantılıdır ve Eş. 3.27'de verilmektedir [26, 46].

$$I_\lambda = I_{0\lambda}.\, e^{-\alpha_{(\lambda)}.S} \tag{3.27}$$

Burada I_λ spektral geçen ışınımın şiddeti (W/m^2.µm), $I_{0\lambda}$ spektral gelen ışınımın şiddeti (W/m^2.µm), $\alpha_{(\lambda)}$ emilim katsayısı ve S yol uzunluğudur (µm). Optik kalınlık olan $\alpha_{(\lambda)}.S$ için üç durum söz konusudur [47]:

I. Şeffaf olmayan veya optik olarak kalın: $\alpha_{(\lambda)}.S \gg 1$
II. Saydam veya optik olarak ince: $\alpha_{(\lambda)}.S \ll 1$
III. Yarısaydam: $\alpha_{(\lambda)}.S$'in diğer tüm durumları için

Metaller, şeffaf olmayan durum için küçük bir yol uzunluğu (S) eğilimi göstermektedir. Ancak çok ince metal tabakalar bazı dalga boyları için şeffaf davranış gösterebilmektedir. Örneğin bazı TPV sistemlerinde kalınlığı 15-25 nm olan altın tabakalar, dielektrik filtre olarak kullanılmakta ve bu filtreler çok ince olduklarından dolayı şeffaf davranış

göstermektedirler [48]. Metal dışı maddeler genellikle şeffaf olmayan hale gelmeden önce çok daha büyük kalınlıklar gerektirir. Şeffaf olmayan bir ortam için, ışınımın ortama nüfuz etmesine rağmen ışınımla etkileşim, yüzey olayı olarak değerlendirilebilir. Yarı saydam ortam için ise, yüzey ve ortam arasında ışınım etkileşimleri vardır. TPV sistemleri için bunlara örnek; yayıcılar, filtreler ve TPV hücreleri gösterilebilir [26, 47].

3.9. Yüzeylerde Işınımla Isı Transferi

Karacisim diffüz bir yüzeydir. Bundan dolayı *Lambert Kosinüs Yasası* olarak bilinen, yönsel olarak yayınan ışınım normalden uzaklaştıkça teta açıyla birlikte azalmaktadır [26, 47]. Lambert'in kosinüs yasası Eş. 3.28'de verilmektedir. Işınım yayan cisim, noktasal bir kaynak ve ışınım ışınlarının paralel olduğu (fotovoltaik hücreler için güneş ışınları gibi) yerlerde bu yasa önemli değildir. Ancak TPV sistemlerinde bu yasa önemlidir. Biri karacisim yayıcısı ve diğeri ise TPV hücresi olmak üzere iki sonsuz plakadan oluşan bir TPV sistemi olduğunu düşünürsek, TPV hücresinde ışınımın tüm açılara bağlı olduğu, ancak hücre yüzeyi sadece belirli açılar altında ışınımı emebileceği anlaşılmaktadır [26].

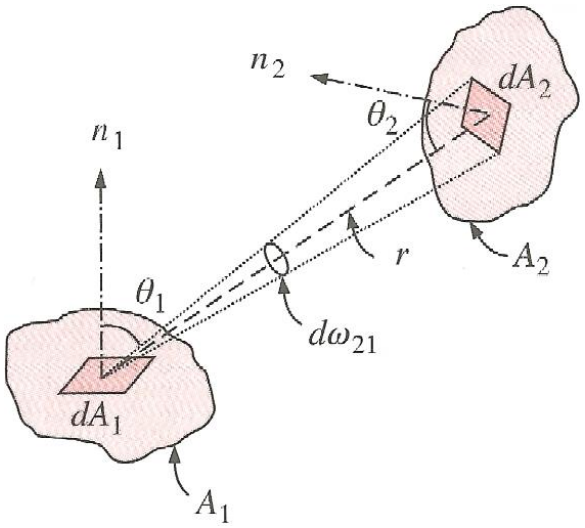
$$I_{b\lambda}(\lambda, T_s, \theta) = i_{b\lambda}(\lambda, T_s).cos\theta \tag{3.28}$$

Burada $I_{b\lambda}$ karacismin spektral ışınım şiddeti (W/m^2), $i_{b\lambda}$ karacisim yüzeyinin yaptığı ışımadır (W/m^2).

Daha önceden belirtildiği gibi yayıcılık, yayınan ışınımın dalga boyuna, yönüne ve yüzeyin sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bunlara ek olarak bir yüzeyin yayıcılığı malzemenin bileşimine ve fiziksel yapısına da bağlıdır. Buna göre TPV sistemlerinde kullanılan tungsten gibi seçici yayıcılar, yüzey yapıları ışınım dalga boyu ile aynı boyutta imal edilmektedir [26]. Bu yüzey sadece spektral olarak değil, aynı zamanda yönsel olarak da seçici olabilir [46]. TPV hücre yüzeyi, yüzey normalinden uzaktaki açılar için giderek daha fazla yansıtıcı hale geldiği için bu durum TPV yayıcıları açısından yararlı olabilir [26]. Spektral olarak sabit yayıcılığa sahip yüzeyler gri yüzeyler olarak tanımlanmaktadır [42]. Saf parlatılmış metaller, 1 μm ile 2 μm gibi kısa dalga boylarında yüksek yayıcılığa sahiptir. Uzun dalga boylarında ise yayıcılık, yaklaşık olarak $\sqrt{T/\lambda}$ ile orantılı olarak azalmaktadır [49]. Bu doğal spektral seçicilik, metalleri TPV yayıcıları için uygun hale getirmektedir. Ancak eşitlik, uzun dalga boyu yayıcılığının sıcaklıkla arttığını da göstermektedir [50].

3.9.1. Görüş faktörü

Işınımla ısı transferinde yüzey özelliklerinden ve sıcaklığından bağımsız, yüzeyler arasındaki yönlenme ektilerini açıklamak için kullanılan değişkene görüş faktörü denir. Işınım dalgaları doğrusal olarak yayıldıklarından bir yüzeyin diğer yüzeyi görmesiyle ışıma olmaktadır [42, 43]. Görüş faktörü, ışınlanma olaylarını içeren yüzeyler arasındaki geometri ve mesafeye göre hesaplanmaktadır [6]. İki yüzey arasındaki görüş faktörünün bulunduğu geometri şekil 3.5'te gösterilmektedir [42].



Şekil 3.5. İki yüzey arasındaki görüş faktörü

Görüş faktörü eşitliğini ifade etmek amacıyla A_1 ve A_2 alanlarına ait uzaklık r ve yüzeylerin normalleri arasındaki açılar θ_1 ve θ_2 kabul edilsin [42, 43]. Bu durumda A_1 ile A_2 arasındaki görüş faktörü Eş. 3.29'da görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 . \cos\theta_2}{\pi . r^2} dA_1 . dA_2 \tag{3.29}$$

Aynı şekilde A_2 ile A_1 arasındaki görüş faktörü Eş. 3.30'da görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$F_{21} = \frac{1}{A_2} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 . \cos\theta_2}{\pi . r^2} dA_1 . dA_2 \tag{3.30}$$

Eş. 3.29 A_1 ile Eş. 3.30 A_2 ile çarpılır ve birleştirilirse Eş. 3.31'de görüldüğü gibi karşılıklılık bağıntısı elde edilir.

$$A_1.F_{12} = A_2.F_{21} \tag{3.31}$$

Yüzeyler arasında ışınımla ısı transferi, görüş faktörü kullanılarak hesaplanabilir. Karacisim yüzey özelliklerine sahip iki sonsuz paralel yüzey için, sıcak bir yüzeyden soğuk bir yüzeye ışınımla ısı akısı Eş. 3.32'de verilmektedir. Ancak bu eşitlikte ısı transferinin diğer biçimleri olan iletim ve taşınım dikkate alınmamaktadır [26].

$$Q_{ışınım} = n^2.\sigma.(T_h^4 - T_c^4) \tag{3.32}$$

Burada $Q_{ışınım}$ ışınımla olan ısı akısı (W/m^2), n kırılma indeksi, σ Stefan-Boltzmann sabiti (W/m^2.K^4), T_h sıcak yüzey sıcaklığı (K) ve T_c soğuk yüzey sıcaklığıdır (K).

3.10. Kara, Diffüz ve Gri Yüzeylerde Işınımla Isı Transferi

i yüzeyinden ayrılıp *j* yüzeyine giden iki kara yüzeyde olan ışınımla ısı transferinin miktarı Eş. 3.33 ile bulunabilmektedir.

$$\dot{Q}_{i\to j} = A_i.F_{ij}.\sigma.(T_i^4 - T_j^4) \tag{3.33}$$

Burada $\dot{Q}_{i\to j}$ *i* yüzeyinden *j* yüzenine ışınımla olan ısı transferi (W), A_i *i* yüzeyinin alanı (m^2), F_{ij} görüş faktörü, σ Stefan-Boltzmann sabiti, T_i ve T_j mutlak sıcaklıklardır (K).

Işınımla olan ısı transferini basitleştirmek amacıyla yüzeylerin opak, diffüz ve gri oldukları kabul edilmektedir. Yayıcı olan gri bir yüzeyde ışıma oranı ve yutma oranı görüş açısından ve dalga boyundan bağımsızdır ve bu iki oran gri yüzeyler için eşittir. Bunların aksine gerçek yüzeylerde çalışma yapmak oldukça karmaşıktır. Bu bilgiler doğrultusunda bir yüzeyin birim alanından birim zamanda ayrılan toplam ışınım enerjisine giden ışınım denir ve bu giden ışınımın ifadesi Eş. 3.34'te verilmektedir [42, 43].

$$J_i = \varepsilon_i.E_{bi} + (1-\varepsilon_i).G_i \tag{3.34}$$

Burada J_i giden ışınımı (W/m^2), ε_i yüzeyin yayıcılığını, E_{bi} karayüzey yayma gücünü (W/m^2) ve G_i giden ışınımı (W/m^2) ifade etmektedir.

Bir yüzeyin ışınımla olan net ısı transferi olan $\dot{Q}_i$ (W) Eş. 3.35'te verilmektedir.

$$\dot{Q}_i = \frac{A_i.\varepsilon_i}{1-\varepsilon_i}.(E_{bi} - J_i) \tag{3.35}$$

İki yüzey arasındaki ışınımla olan net ısı transferi Eş. 3.36'da verilmektedir.

$$\dot{Q}_{i\to j} = A_i.F_{ij}.(J_i - J_j) \tag{3.36}$$

Burada $\dot{Q}_{i\to j}$ i yüzeyinden j yüzenine ışınımla olan net ısı transferi (W), A_i i yüzeyinin alanı (m^2), F_{ij} görüş faktörü, J_i i yüzeyinden giden ışınım (W/m^2) ve J_j j yüzeyinden giden ışınımdır (W/m^2).

3.11. Gazlarda Işınımla Isı Transferi

Gazlar dar bir dalga boyu bandında ışınımı soğurmakta ve yaymaktadırlar. Işınım olaylarında gaz ışınımı hacimsel bir olgudur. Bir gaz karışımında bulunan bileşenlerin soğurma ve yayma özellikleri sıcaklık, basınç ve gaz karışımının yapısına bağlıdır. Hidrojen ve azot gibi basit moleküllü gazlar ışınımı geçirmektedirler. Ancak daha karmaşık olan hava, su buharı gibi gazlar ise enerjiyi soğurmakta ve yaymaktadırlar. Bundan dolayı ışınım olaylarında bu gazların ışınım etkisi dikkate alınmalıdır. *dx* kalınlığındaki tabakadan geçen ışınımın şiddetindeki azalma, şiddetin kendisiyle ve *dx* kalınlığıyla orantılıdır ve buna *Beer Kanunu* denir [42, 43, 47]. Bir gazın dalga boyuna bağlı ışınımı Eş. 3.37'de verilmektedir.

$$dI_\lambda(x) = -\kappa_\lambda.I_\lambda(x).dx \tag{3.37}$$

Eş. 3.37'nin integrali alındıktan sonra Eş. 3.38 elde edilir.

$$\frac{I_{\lambda,L}}{I_{\lambda,0}} = e^{\kappa_\lambda.L} \tag{3.38}$$

Burada I_λ spektral ışınım şiddeti ($W/m^2.sr.\mu m$), L kalınlık (m) ve κ_λ spektral soğurma katsayısıdır (m^{-1}).

Bir gazın yayma gücü Eş. 3.39'da verilmektedir.

$$E_g = \varepsilon_g . \sigma . T_g^4 \tag{3.39}$$

Burada E_g gazın ışınım yayma gücü (W/m^2), ε_g gazın toplam yayıcılığı, σ Stefan-Boltzmann sabiti (W/m^2.K^4) ve T_g gazın mutlak sıcaklığıdır (K).

Kazan ve yanma odalarının yayıcılıkları 0,7'den büyüktür ve Hottel, yayıcılıkları 0,7'den büyük olan kara yüzeye yakın yüzeyler için Eş. 3.40'ı önermektedir [42].

$$\dot{Q}_{net,kara} = A_s . \sigma . (\varepsilon_g . T_g^4 - \alpha_g . T_s^4) \tag{3.40}$$

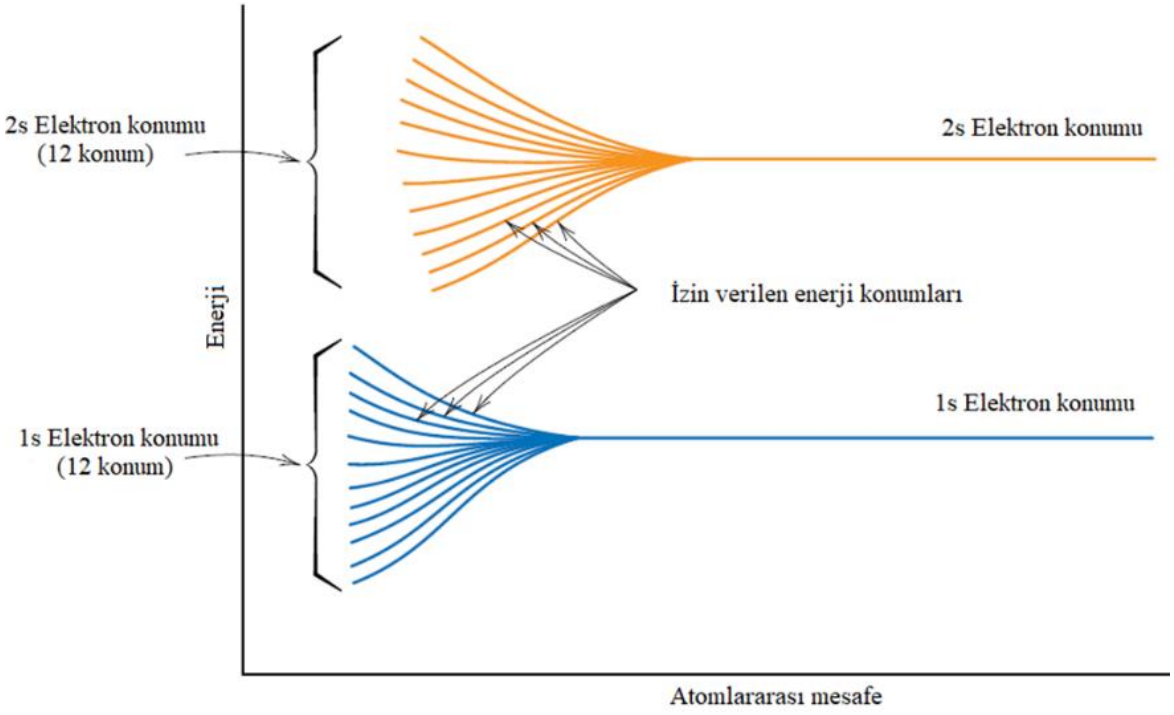
Burada $\dot{Q}_{net,kara}$ ışınım ısı transfer hızı (W), A_s sınırlanan yüzeyin alanı (m^2), σ Stefan-Boltzmann sabiti (W/m^2.K^4), ε_g gazın yayıcılığı, T_g gazın mutlak sıcaklığı (K), α_g gazın soğurganlığı ve T_s sınırlanan yüzeyin mutlak sıcaklığıdır (K).

4. MALZEMELERDE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER

4.1. Katıların Enerji Bant Yapıları

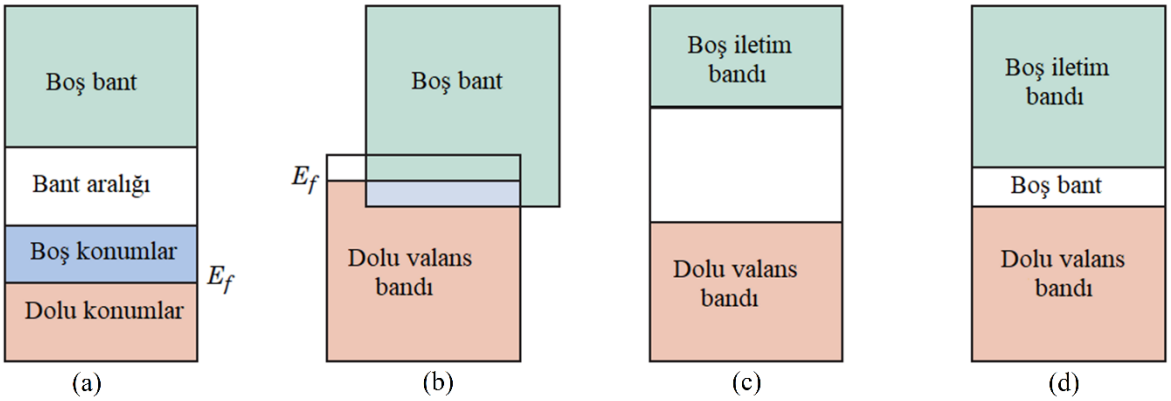
İletken, yarı iletken ve birçok yalıtkan malzemelerde yalnızca elektronik iletkenlik söz konusudur. İletkenlik işlemine katılan elektronların sayısına bağlı olarak elektrik iletkenliğinin büyüklüğü değişmektedir. Bir malzemedeki elektrik iletkenliğini sağlayan elektronların sayısı, elektronların dizilişine, elektronların enerji seviyelerine ve elektronların konumlarına bağlıdır. Bir atom yörünge ve alt yörünge şeklinde belirli enerji seviyelerinde bulunur. Ayrıca birçok atomda bulunan elektronlar en düşük enerji seviyesine sahip konumda bulunmakta ve *Pauli* dışlama prensibine göre aynı enerji seviyesine sahip olan iki elektron zıt yönde dönmektedirler [44, 51].

Atomlararası mesafe büyük olduğu durumlarda her bir atom birbirinden bağımsızdır. Ancak atomlararası mesafe çok küçük olduğu durumlarda her bir atomun elektronları ve çekirdeği birbirinden etkilenmektedir. Her bir atomun konumu, atomlararası mesafe çok küçük olduğu için birbirlerini etkilemesiyle çok kısa mesafeli bir seri elektron konumlarına ayrılmaktadır. Bu durum *elektron enerji bandı* olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.1'de 12 atomdan oluşan bir kümede elektron enerjisinin atomlararası mesafe ile değişimi gösterilmektedir [44, 51].



Şekil 4.1. 12 atomdan oluşan bir kümede elektron enerjisinin atomlararası mesafe ile değişimi

Elektron bant yapısına bağlı olarak katı malzemelerin elektriksel özellikleri değişmektedir. Mutlak sıcaklık 0 K'de dört faklı bant yapısı mevcuttur. Bu bant yapıları şekil 4.2'de gösterilmektedir. 0 K'de enerji bandındaki en yüksek dolu konumunun enerjisi *Fermi enerji seviyesi* (E_f) olarak bilinmektedir. Metallerdeki birinci bant yapısında (a) Fermi enerji seviyesi belirgindir. Metallerdeki ikinci bant yapısında (b) dolu bant ile boş bant üst üste çakışmaktadır. Metallerdeki diğer iki bant yapısı (c), (d) ise boş olan iletim bandı ile elektronlar tarafından tamamen dolu olan valans bandı, enerji bant aralığı ile ayrılmaktadır. Yalıtkanlarda bu enerji bant aralığı 2 eV değerinden büyük, yarı iletkenlerde bu enerji bant aralığı 2 eV değerinden küçüktür [44, 51].

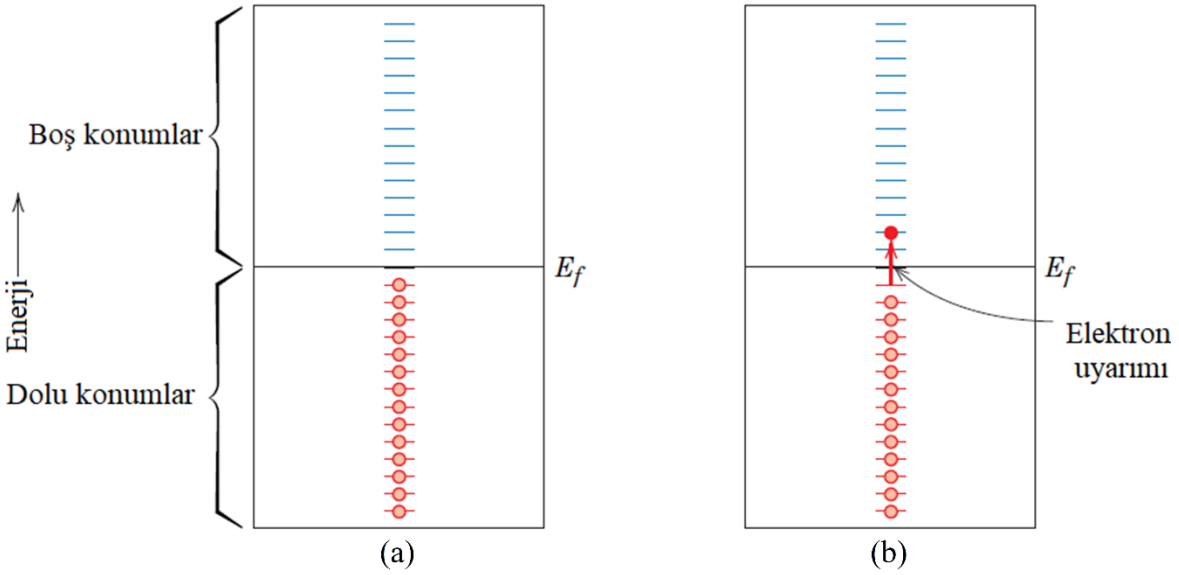


Şekil 4.2. 0 K sıcaklıkta katılarda çeşitli bant yapıları: (a) Metallerde bulunan elektron bant yapıları, aynı bantta dolu konumların üstünde ve dolu olana yakın elektron konumları mevcuttur, (b) elektron bant yapıları dolu valans bandı ile boş iletim bandı üst üste gelmektedir, (c) yalıtkanların elektron bant yapı özelliği, dolu valans bandı, boş iletim bandından nispeten geniş bir enerji aralığı ile ayrılmıştır, (d) yarı iletkenlerde bulunan elektron bant yapıları, bant aralığı dar olan yalıtkanlarınkiyle aynıdır

4.2. Malzemelerde İletkenlik

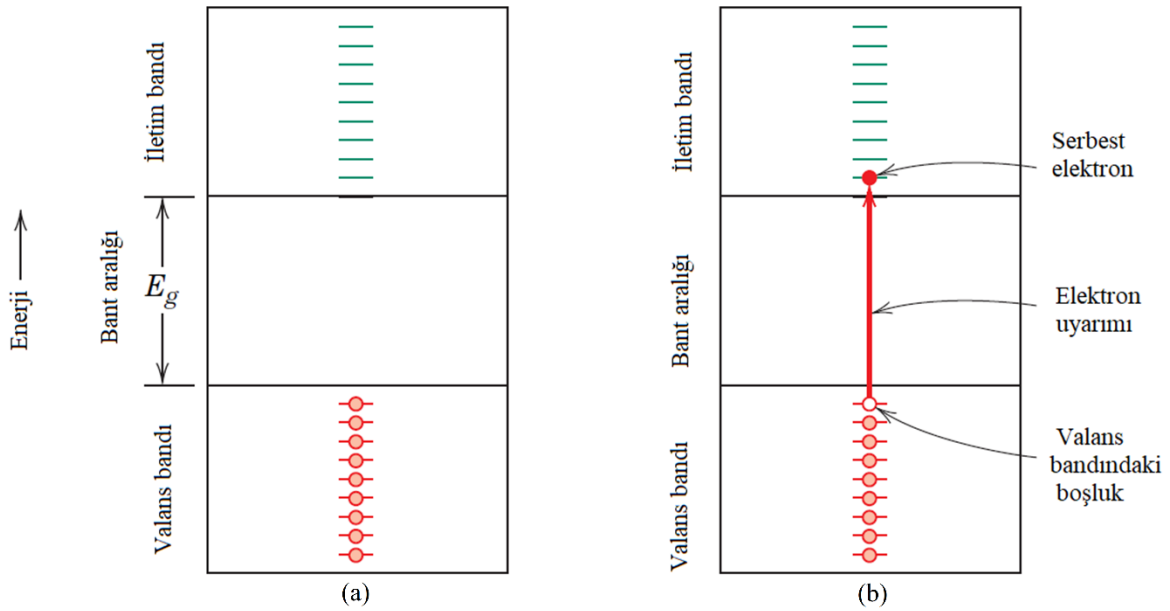
Malzemelerde iletkenliği gerçekleştiren elektronlara serbest elektron denilmektedir. Yarı iletken ve yalıtkan malzemeler boşlukta bir elektrik yüküne sahiptir ve bu boşlukların enerjileri Fermi enerji seviyesinden daha azdır. Ancak bu boşluklar iletime katkıda bulunmaktadır. Unutulmamalıdır ki elektrik iletkenliği elektron-boşluk çiftinin sayısına bağlıdır. Oda sıcaklığında valans bandından iletim bandına elektronların az ama önemli bir miktarı, ısı enerjisi tarafından uyarılabilmektedir. Her bir elektronun uyarılması, *elektron-boşluk çifti* diye adlandırılan bir çift yük taşıyıcısı meydana getirmektedir. Elektron boşlukları, iletim elektronlarının sayısına eşit valans bandında üretilmektedir [44, 51].

Metallerde bir elektronun serbest hale geçmesi için Fermi enerji seviyesinden daha yüksek boş bir enerji seviyesine uyarılmalıdır. Metallerde bir elektrik enerji alanı, birçok elektronu boş enerji seviyelerine uyarabilmektedir. Bunlara ek olarak metallerdeki valans elektronları serbest hareket edebilmektedir ve bu elektronlar belirli bir atoma bağlı değillerdir. Ancak bu elektronların elektriği iletmesi için uyarılması gerekmektedir. Şekil 4.3'te metallerin elektronlarının uyarılması gösterilmektedir [44, 51].



Şekil 4.3. Metallerin elektronlarının uyarılması: (a) metal elektronun uyarılmadan önceki konumu, (b) metal elektronun uyarıldıktan sonraki konumu

Yarı iletken ve yalıtkan malzemelerde valans bandının üst kısmında boş enerji konumları bulunmadığından dolayı elektronların serbest hale geçebilmesi için enerji bant aralığını aşabilmesi gerekmektedir. Bu olayın gerçekleşebilmesinde bir elektron, valans bandından iletim bandına geçebilmesi için enerji bant aralığına (E_g) eşit miktarda bir enerji ile uyarılmalıdır. Elektronun uyarılması için gerekli olan enerji genellikle ısı veya ışık kaynaklı olmaktadır. Malzemede bant aralığı ne kadar büyükse, mevcut sıcaklık için elektrik iletkenliği o kadar düşük olmaktadır. Yarı iletken malzemelerde bant aralığı dar, yalıtkan malzemelerde ise bant aralığı yarı iletken malzemelere göre geniştir. Ayrıca yarı iletken malzemelerdeki bağlar genellikle kovalent bağla bağlandığından dolayı (kovalent bağ nispeten zayıf bir bağdır) valans elektronları atoma sıkıca bağlı değildir. Bundan dolayı yarı iletkenlerdeki elektronların ısı enerjisi ile uyarılması daha kolay olmaktadır. Şekil 4.4'te yalıtkan ve yarı iletken malzemelerin bir elektronunun valans bandından iletim bandına uyarılması gösterilmektedir [44, 51].



Şekil 4.4. Yalıtkan ve yarı iletken malzemelerin bir elektronunun valans bandından iletim bandına uyarılması: (a) yarı iletken ve yalıtkan malzemelerdeki bir elektronun valans bandından iletim bandına uyarılmadan önceki konumu, (b) yarı iletken ve yalıtkan malzemelerdeki bir elektronun valans bandından iletim bandına uyarılmadan sonraki konumu

4.3. Malzemelerde Elektron Hareketliliği

Herhangi bir malzemeye uygulanan elektrik alanı, serbest elektronlar üzerinde bir yük oluşturmaktadır. Bundan dolayı negatif yüklü elektronlar, uygulanan alana ters yönde ivmelenir. Elektrik akımında bir artışın meydana gelmesi için tüm serbest elektronlara elektrik alanının uygulanması gereklidir. Ancak bir elektrik alanı uygulandığında akım sabit değere ulaşır. Bunun nedeni sürtünme kuvvetleridir. Bu sürtünme kuvvetleri, kristal kusurların ve atomların kendi ısıl titreşimlerinin elektronlarda sebep olduğu saçılmadır. Bu saçılma olayı elektronun kinetik enerjisini düşürmekte ve hareket yönünü değiştirmektedir. Saçılmayı ifade etmek için *sürüklenme hızı* ve *elektron hareketliliği* diye adlandırılan iki değişken kullanılmaktadır. Çünkü bu iki değişken iletkenliğin bir fonksiyonudur. Kısaca iletkenlik yük taşıyıcılarının yoğunluğun, her biri tarafından taşınan yükün ve her bir yük taşıyıcısının hareketliliğinin bir ürünüdür. Elektron hareketliliği Eş. 4.1'de ve malzemelerin iletkenliği Eş. 4.2'de verilmektedir [44, 51].

$$v_d = \mu_e . E \tag{4.1}$$

$$\sigma = n . |e| . \mu_e \tag{4.2}$$

Burada v_d sürüklenme hızı (m/s), μ_e elektron hareketliliği ($m^2/V.s$), E elektrik alanı (V/m), σ iletkenlik ($\Omega^{-1}.m^{-1}$), n birim hacim başına serbest elektron veya iletken elektron sayısı (m^{-3}) ve $|e|$ bir elektron üzerindeki mutlak elektriksel yüktür (C).

4.4. Yarı İletken Malzemeler

Yarı iletkenler, yalıtkan ve iletken malzemeler arasında bulunan iletken malzemelerdir. Daha önceden bahsedildiği gibi yarı iletkenlerin bant aralığı 2 eV'dan daha azdır. Yarı iletkenlerde bant aralığı yaklaşık 1 eV mertebesinde olduğu unutulmamalıdır. Yarı iletkenlerinin bünyesinde bulunan empürite miktarına bağlı olarak, bu malzemelerin elektriksel özellikleri değişmektedir. Yarı iletkenler has ve katkılı yarı iletken olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Oda sıcaklığında bazı yarı iletkenlerin özellikleri çizelge 4.1'de verilmektedir [44, 51].

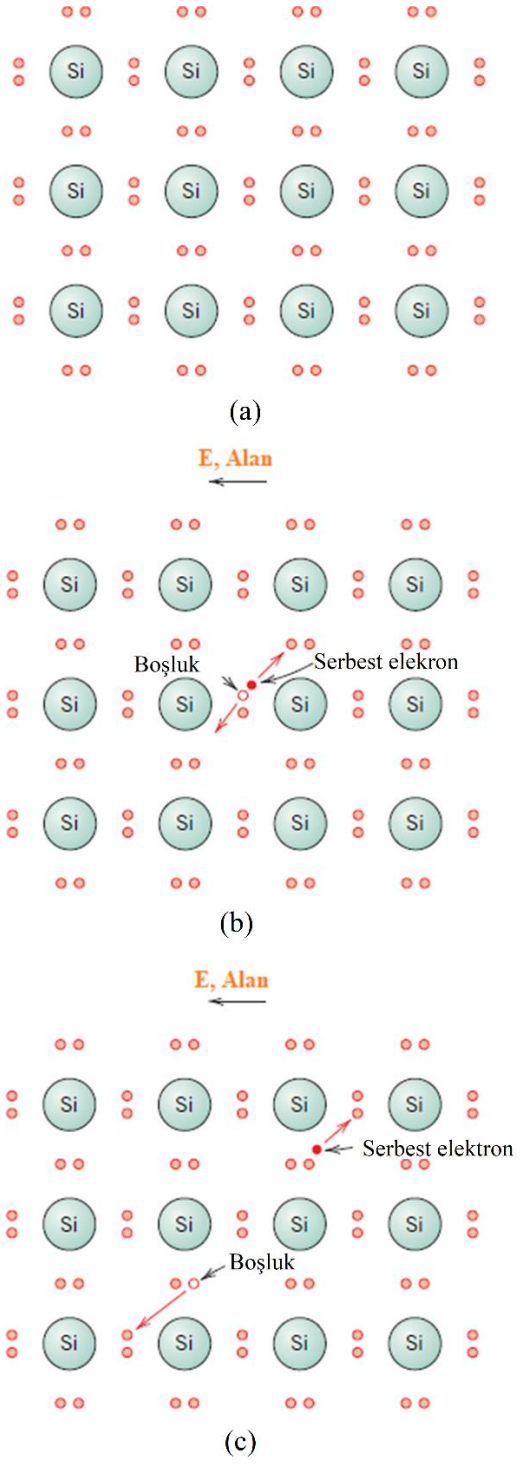
Çizelge 4.1. Oda sıcaklığında bazı yarı iletken malzemelerin özellikleri

Malzeme	Bant aralığı, E_g (eV)	Elektron hareketliliği, μ_e ($m^2/V.s$)	Boşluk hareketliliği, μ_h ($m^2/V.s$)	Taşıyıcı yoğunluğu, n (m^{-3})
Si	1,11	0,14	0,05	$14x10^{15}$
Ge	0,67	0,38	0,18	$23x10^{18}$
GaAs	1,42	0,85	0,04	$1,4x10^{12}$
InSb	0,17	7,7	0,07	$13,5x10^{21}$

4.4.1. Has yarı iletkenlik

Has yarı iletkenlik, saf bir malzemenin özelliğidir. Yarı iletken olan silisyum (Si) ve germanyum (Ge) elementleri kovalent bağ yapısına sahiptir. Ayrıca, bileşik yarı iletken malzemelerde, örneğin galyum arsenik (GaAs) ve indiyum antimuan (InSb), has yarı iletkenlik gibi özellik göstermektedir. Bu tür malzemelerde atomsal bağ daha fazla iyonik özellik göstermekte ve yalıtkan olma eğilimine girmektedir. Bu tür yarı iletkenlerde, iletim

bandına uyarılan her bir elektrona karşılık kovalent bağlardan bir tanesi kopmaktadır. Böylece kopan bağ sayesinde geride bir boşluk oluşmaktadır. Kısacası uyarılan elektron ve boşluklar birbirlerine zıt yönde hareket etmektedir. Şekil 4.5'te has bir silisyuma ait elektrik iletkenliği ile ilgili bağlanma modeli gösterilmektedir [44, 51, 52].



Şekil 4.5. Has bir silisyuma ait elektrik iletkenliği ile ilgili bağlanma modeli: (a) silisyumda elektrik iletkenliğine ait uyarılma öncesi bağlanma modeli, (b) ve (c) silisyumda elektrik iletkenliğine ait uyarılma sonrası bağlanma modeli

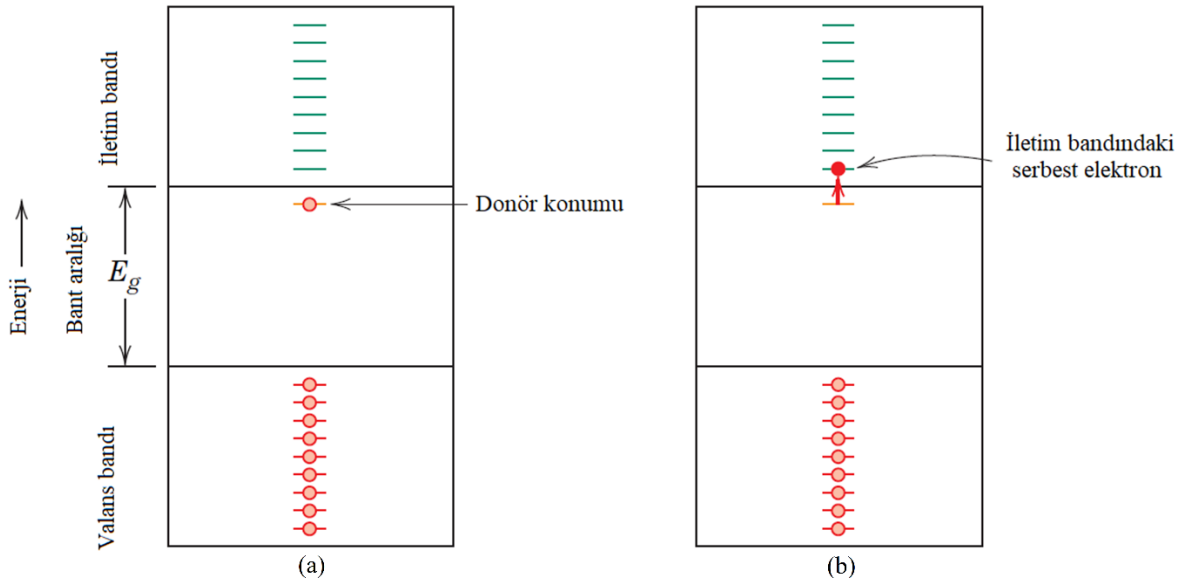
4.4.2. Katkılı yarı iletkenlik

Katkılayıcı olarak bilinen saflığı bozan (empürite) atomlarının eklenmesi ile oluşan yarı iletkenlere katkılı yarı iletkeneler ve bu bileşenlerin eklenmesi sürecine de katkılama denilmektedir. Has yarı iletkenler yüksek bir saflıkta üretildikten sonra saflığı bozan atomlar, has yarı iletkenlere dikkatli bir şekilde eklenmektedir. Saflığı bozan atomlar genellikle fosfor (P), arsenik (As), antimon (Sb) gibi VA grubu veya alüminyum (Al), bor (B) ve galyum (Ga) gibi IIIA grubu elementlerdir. İki tip katkılı yarı iletken vardır. Bunlar n-tipi ve p-tipi katkılı yarı iletkenlerdir [44, 51, 52].

n-tipi katkılı yarı iletkenlik

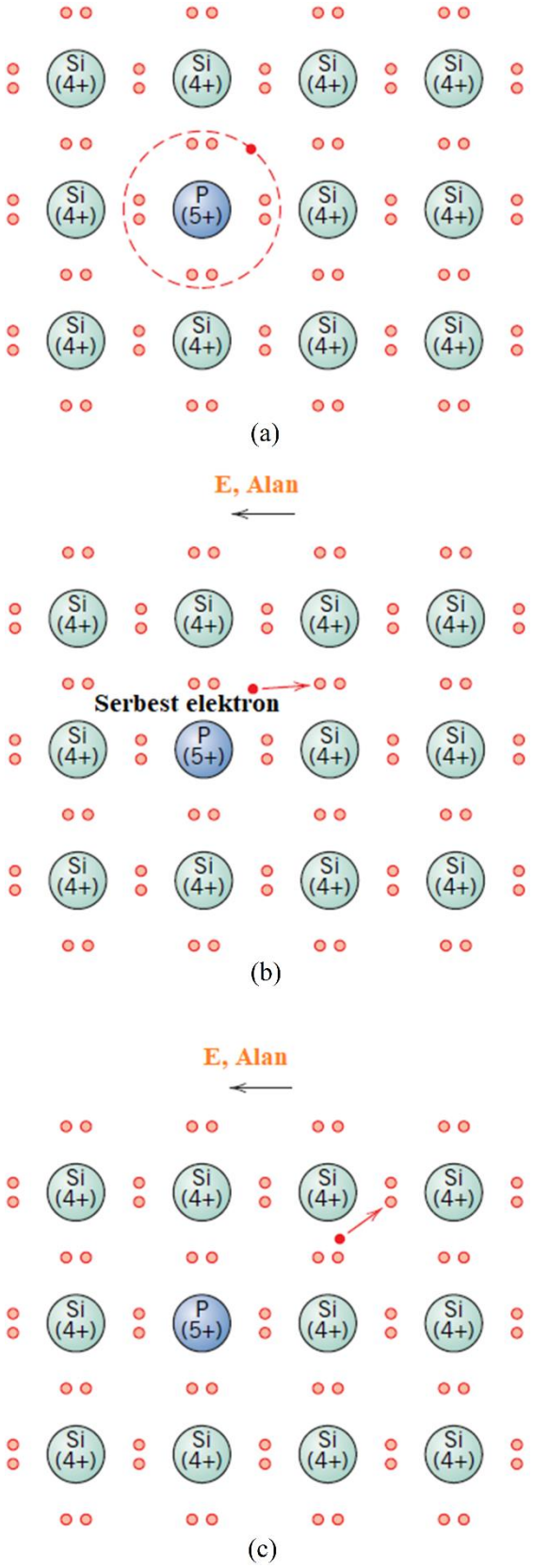
Bu tip yarı iletkenlikte negatif yük taşıyıcıları baskındır. n-tipi katkılı yarı iletkenliği açıklamak amacıyla silisyum elementini dikkate alalım. Silisyum atomunun 4 valans elektronu bulunmakta ve bu elektronlar diğer silisyum atomları ile kovalent bağla bağlanmaktadır. Burada kullanılan empürite atomlar VA grubunda bulunmaktadır ve 5 valans elektronuna sahiptir. Bu 5 valans elektrondan sadece 4'ü silisyumun 4 valans elektronu ile bağ oluşturabilir. Bağ oluşturmayan geri kalan elektron, zayıf elektrostatik bir kuvvetle yörüngeye bağlanmaktadır. Bu elektron çok kolay bir şekilde empürite atomdan ayrılabilmekte ve serbest elektron konumuna geçmektedir [44, 51].

Şekil 4.6'da n-tipi bir yarı iletkenin enerji bant yapısı gösterilmektedir. Şekil 4.6 (a)'da görüldüğü gibi iletim elektronlarının nispeten kolay üretimini sağlayan iletim bandının yakınına VA grubundan bir elektron yerleşmektedir. Daha sonra uyarılma sonucu (şekil 4.6 (b)) donör diye adlandırılan empürite elektronlar iletim bandına geçmektedir. Böylece valans bandında bir boşluk oluşmaktadır. Donör konumunda bulunan elektronlar, ısı enerjisi ile uyarılabilmektedir. Bu durumda iletim bandında bulunan elektron sayısı, valans bandında bulunan boşluk sayısından fazla olmaktadır. Bu tip yarı iletkenlere n-tipi yarı iletken denilmektedir [44, 51].



Şekil 4.6. n-tipi bir yarı iletkenin enerji bant yapısı: (a) iletim bandının hemen altına yerleşen donör empürite seviyesinde elektron enerji seviyesinin gösterimi, (b) donör seviyesinde bulunan bir elektronun uyarılması sonucunda serbest elektron konumuna geçmesinin gösterimi

Şekil 4.7'de n-tipi yarı iletkenlerdeki bir iletim elektronun üretiminin şeması verilmektedir. Şekil 4.7 (a)'da empürite atomu olan fosforun silisyum atomunun yerine geçmesi, şekil 4.7 (b)'de serbest elektronun meydana gelmesi için elektronun uyarılması, şekil 4.7 (c)'de elektronun uyarılması sonucu serbest elektronun hareket etmesi gösterilmektedir [44].

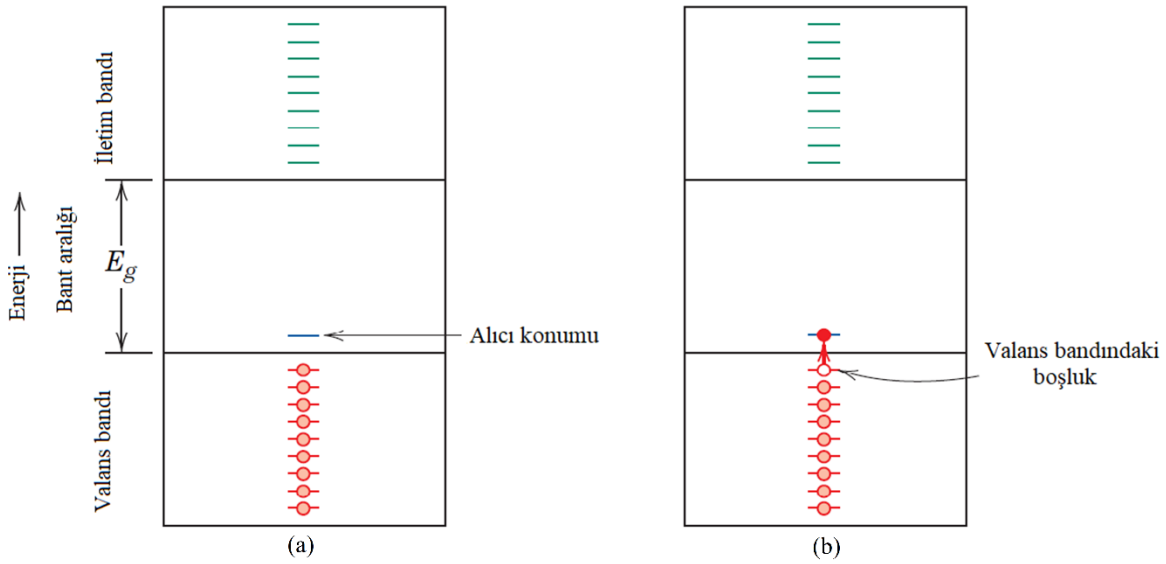


Şekil 4.7. n-tipi yarı iletkenlerdeki bir iletim elektronunun üretim şeması: (a) empürite atomu olan fosforun silisyum atomunun yerine geçmesi, (b) serbest elektronun meydana gelmesi için elektronun uyarılması, (c) elektronun uyarılması sonucu serbest elektronun hareket etmesi

p-tipi katkılı yarı iletkenlik

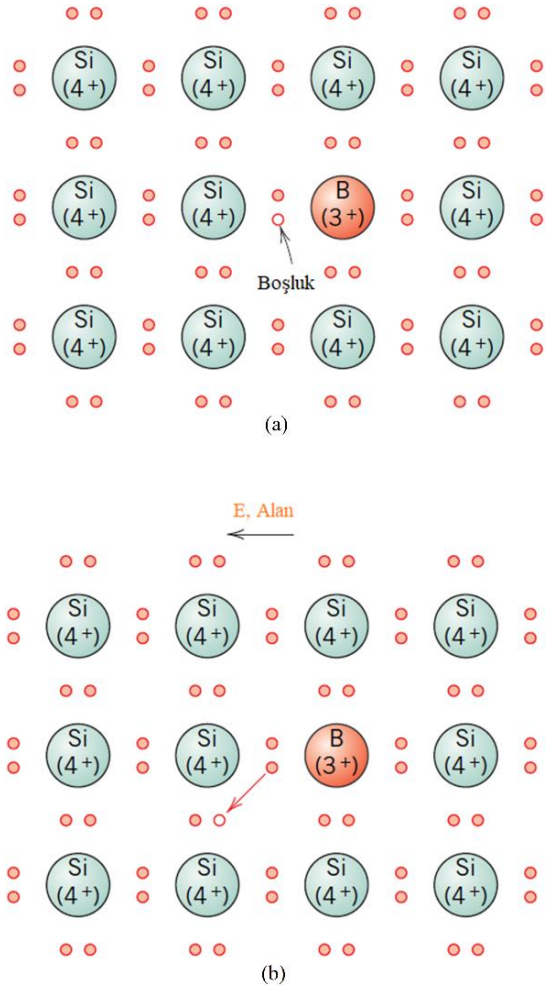
p-tipi katkılı yarı iletkenlerde pozitif yük taşıyıcıları baskındır. n-tipi katkılı yarı iletkenlerde olduğu gibi p-tipi yarı iletkenleri açıklamak için yine silisyum elementini dikkate alalım. Silisyum atomunun 4 valans elektronu olduğu ve bu elektronların diğer silisyum atomları ile kovalent bağla bağlandığı daha önce açıklanmıştır. p-tipi katkılı yarı iletkenlerde kullanılan empürite atomlar IIIA grubunda bulunmaktadır ve 3 valans elektronuna sahiptir. Bu empürite atomlar galyum, alüminyum, bor' dur ve p-tipi katkılı yarı iletkenlerde n-tipi katkılı yarı iletkenlerden farklı olarak ters bir etki yaratmaktadır. Silisyum elementinin etrafındaki bağlardan birisinin elektronu eksiktir. Bu, empürite atomuna zayıf bağlı bir boşluk olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu boşluk, komşu bağdaki bir elektronun hareketi sonucu empürite atomundan uzaklaşır. Böylece hareket eden boşluk uyarıldığında iletkenliğe katkı sağlamaktadır [44, 51].

Şekil 4.8'de p-tipi bir yarı iletkenin enerji bant yapısı gösterilmektedir. Şekil 4.8 (a)'da görüldüğü gibi IIIA gurubunda bulunan bor gibi bir katkılayıcı valans bandının yakınına alıcı bir konum üretmekte ve daha sonra şekil 4.8 (b)'de gösterildiği gibi, valans bandında geride bir boşluk bırakarak alıcı seviyesine bir elektron uyarılmaktadır [44, 51].



Şekil 4.8. p-tipi bir yarı iletkenin enerji bant yapısı: (a) IIIA gurubunda bulunan bor gibi bir katkılayıcı valans bandının yakınına alıcı bir konum üretimi, (b) valans bandında geride bir boşluk bırakılması ve alıcı seviyesine bir elektron uyarılması

Şekil 4.9'da p-tipi yarı iletkenlerdeki bir elektron boşluğunun üretiminin şeması verilmektedir. Şekil 4.9 (a)'da empürite atomu olan bor' un silisyum atomunun yerine geçmesi, şekil 4.9. (b)'de elektronun uyarılması sonucu boşluğun hareketi gösterilmektedir [44].

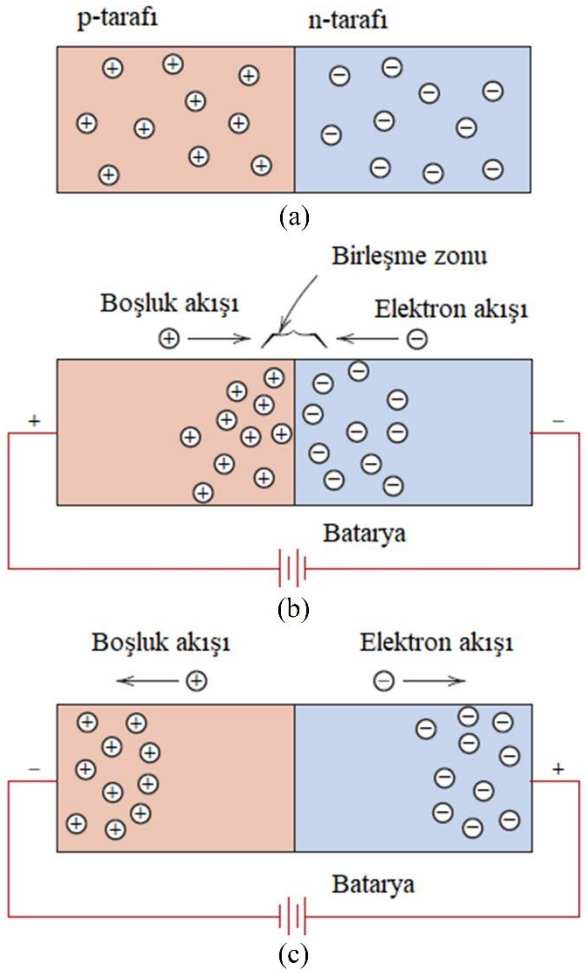


Şekil 4.9. p-tipi yarı iletkenlerdeki bir elektron boşluğunun üretim şeması: (a) empürite atomu olan bor' un silisyum atomunun yerine geçmesi, (b) elektronun uyarılması sonucu boşluğun hareketi

4.4.3. Yarı iletkenlerde p-n eklemi

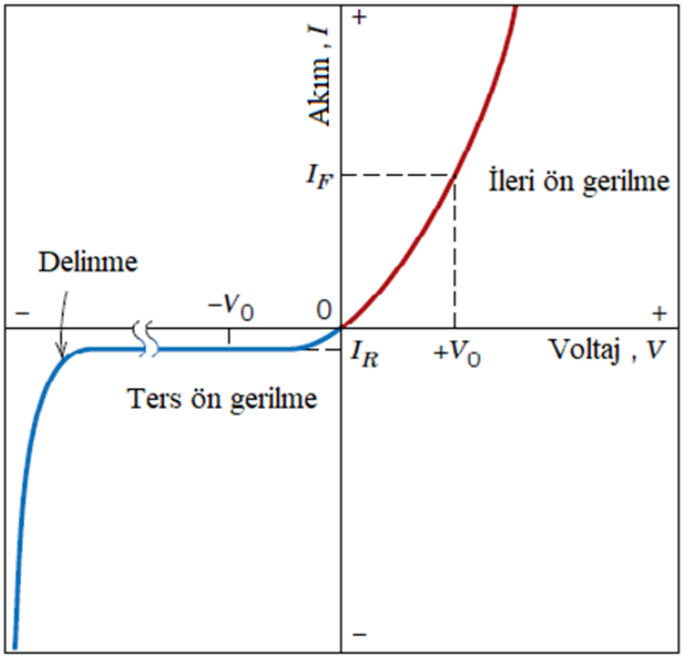
Termofotovoltaik sistemlerde hücre olarak yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır. Bu yarı iletken malzemeler p-n eklemlerinden oluşmaktadır. Bu eklemler n ve p tipi yarı iletken malzemelerin birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Yani eklem, bir tarafı n-tipi diğer tarafı p-tipi olan katkılandırılmış tek parça yarı iletken bir malzemeden meydana gelmekte ve bu işleme p-n doğrultma birleşimi denilmektedir. Şekil 4.10'da p-n eklemli yarı iletken bir malzeme gösterilmektedir. Şekil 4.10 (a)'da gösterildiği gibi potansiyel uygulamadan önce

p-n ekleminde p kısmında boşluklar ve n kısmında ise elektronlar, taşıyıcıları oluşturmaktadır. Şekil 4.10 (b)'de görüldüğü gibi ileri ön gerilim uygulandığında p tarafındaki boşluklar ve n tarafındaki elektronlar birleşim bölgesine yönelmektedirler. Şekil 4.10 (c)'de ise ters ön gerilimde boşluk ve elektronlar birleşme yerinden uzaklaşmakta ve bu şekilde birleşme yeri negatif ve pozitif yüklerden temizlenmiş olmaktadır [44, 52, 53].



Şekil 4.10. p-n eklemli yarı iletken bir malzeme: (a) p-n eklemine elektrik potansiyeli uygulamadan önce, (b) p-n eklemine ileri ön gerilim uygulanması, (c) p-n eklemine ters ön gerilim uygulanması

Bunlara ek olarak ileri ön gerilim uygulanması durumunda akım, gerilimle üstel olarak artmaktadır. Aksine ters ön gerilim uygulanması halinde ise akım, gerilimin artması ile küçük bir doyma akımına yaklaşmaktadır [53]. Şekil 4.11'de ileri ve ters ön gerilim uygulanması durumunda p-n birleşmesi için akım voltaj davranışı gösterilmektedir [44].



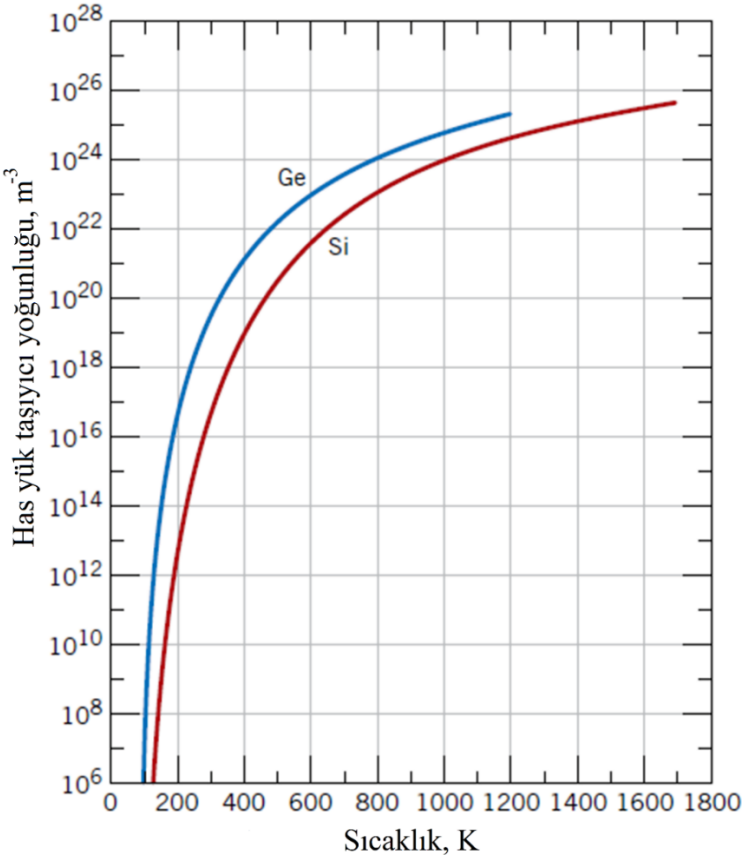
Şekil 4.11. İleri ve ters ön gerilim uygulanması durumunda p-n birleşmesi için akım voltaj davranışı

4.5. Yarı İletken Malzemelerin İletkenliğini Etkileyen Etmenler

Yarı iletken bir malzemenin iletkenliği elektron, boşluk yoğunluğuna ve yük taşıyıcılarının hareketliliğine bağlıdır. Bu bölümde bu üç etken açıklanmaktadır.

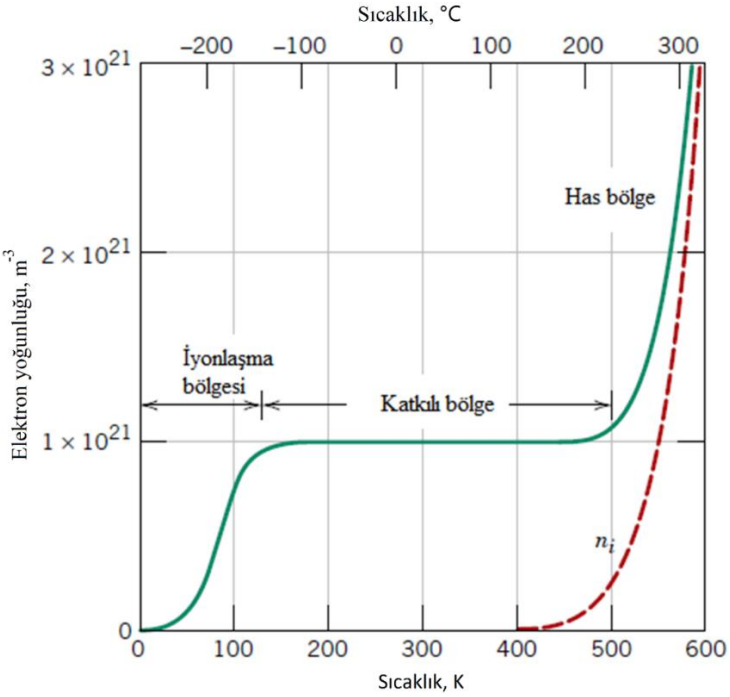
4.5.1. Elektron ve boşluk yoğunluğunun iletkenliğe etkisi

Yarı iletken bir malzemede has yük taşıyıcısının yoğunluğu, artan sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Çünkü bir yarı iletkende elektron ve boşluk yoğunlukları sıcaklıkla artmaktadır. Şekil 4.12'de silisyum ve germanyum için has yük taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir [44].



Şekil 4.12. Silisyum ve germanyum için has yük taşıyıcısı yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi

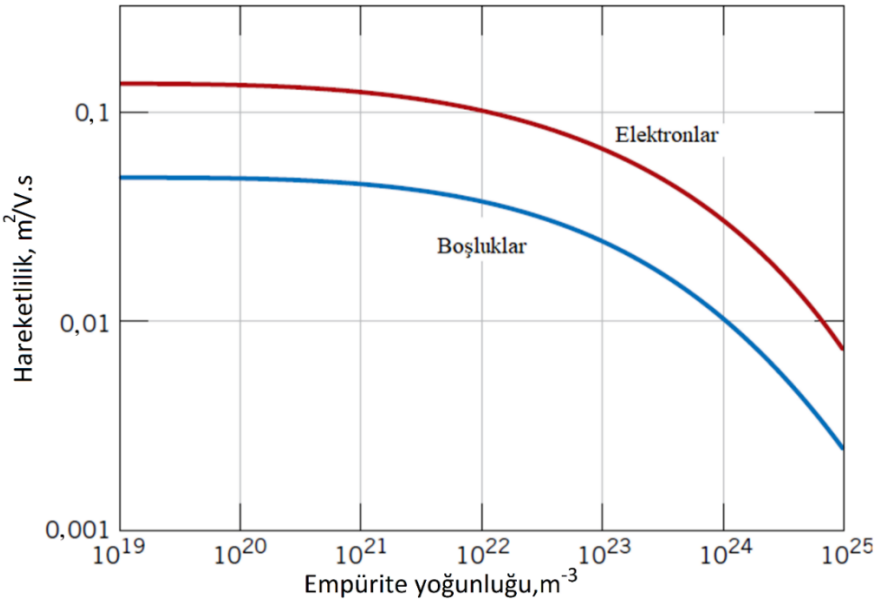
Katkılı bir yarı iletkende ise yük taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi has yarı iletkenlerden faklıdır. Şekil 4.13'te has yarı iletken silisyum ve fosfor atomu ile katkılanmış silisyumun yük taşıyıcı yoğunluğu karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 150 K-450 K sıcaklıklar arasında yoğunluk sabittir, 100 K sıcaklığın altında yoğunluk düşmekte ve artan sıcaklıklarda ise yükselmektedir [44].



Şekil 4.13. Has yarı iletken silisyumun (kesikli çizgi) ve fosfor atomu ile katkılanmış silisyumun yük taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi

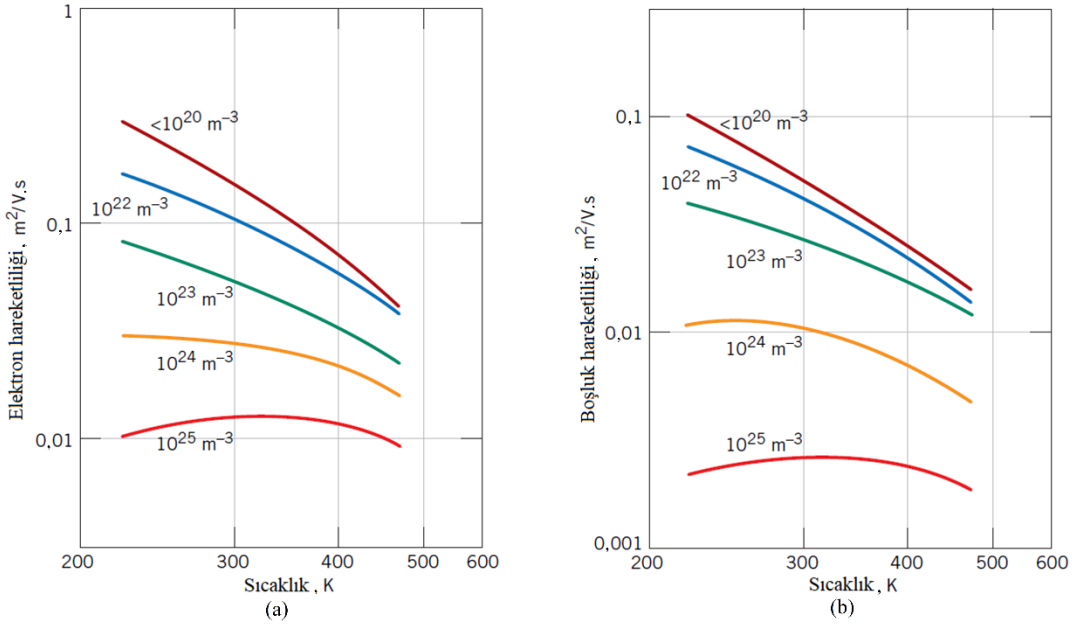
4.5.2. Yük taşıyıcılarının iletkenliğe etkisi

Yarı iletken bir malzemenin iletkenliğini etkileyen diğer önemli etmen yük taşıyıcılarının hareketliliğidir. Empürite miktarının iletkenliğe etkisi şekil 4.14'te silisyum için gösterilmektedir. Katkı miktarının $10^{20}\,m^{-3}$'ten az olduğunda elektron ve boşluk hareketliliği en yüksek seviyeye çıkmaktadır. Ancak artan empürite miktarı ile birlikte elektron ve boşluk hareketliliği azalmaktadır [44].



Şekil 4.14. Oda sıcaklığında silisyum için empürite yoğunluğuna göre elektron ve boşluk hareketliliği

Şekil 4.15'te belirlenmiş empürite yoğunluklarında elektron ve boşluk hareketliliğinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Empürite yoğunluğu 10^{24} m^{-3}'ten düşük olduğunda hem elektron hem de boşluk hareketliliği artan sıcaklıkla azalmaktadır. Buna ek olarak empürite yoğunluğu 10^{20} m^{-3}'ten daha büyük olduğunda hareketlilikte azalmaktadır [44].



Şekil 4.15. Belirlenmiş empürite yoğunluklarında elektron ve boşluk hareketliliğinin sıcaklıkla değişimi: (a) belirli empürite yoğunluklarında elektron hareketliliğinin sıcaklıkla değişimi, (b) belirli empürite yoğunluklarında boşluk hareketliliğinin sıcaklıkla değişimi

5. TERMOFOTOVOLTAİKLER

Fotovoltaik sistemler, güneşten yayılan fotonlar vasıtasıyla ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu işleme benzer şekilde, başka bir kaynak tarafından yayılan ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek de mümkündür. Isı kaynağı, bu tür fotovoltaik teknolojilerde temel enerji kaynağı olduğu için sistem genelde termofotovoltaik (TPV) olarak adlandırılmaktadır. Kısacası termofotovoltaik sistemler, bir ısı kaynağından yayılan ışınımı elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Kömür, benzin, doğal gaz gibi enerji kaynaklarının kullanıldığı işlemler, 1000-3000 ℃ aralığındaki sıcaklıklarda yanma süreçlerini içermektedirler. Bu enerji kaynaklarından üretilen enerjinin bir kısmı ısınma ve elektrik enerjisi üretmek amacı ile kullanılmaktadır. Bununla birlikte sıcak cisimlerden yayılan ışıma enerjisi bu süreçler boyunca kaybolmaktadır. TPV sistemlerinin diğer bir amacı atık ısı gibi düşük enerji aralığına sahip bu enerjiyi, fotovoltaik hücrelerle elektrik enerjisine dönüştürmektir [7, 8, 52].

Termofotovoltaik dönüşümle ilgili ilk çalışmalar, 1960'ların ilk yıllarında gerçekleştirilmiş olsa da sadece son on yılda TPV sistemleri ile ilgili araştırmaların belirgin bir şekilde hızlandığı görülmektedir. Gerçekleştirilen ilk örneklerde elektriksel verim %0,6 ile %11 aralığındadır. Ancak yapılan bazı çalışmalarda %24'e yakın elektriksel verimde bildirilmektedir [6].

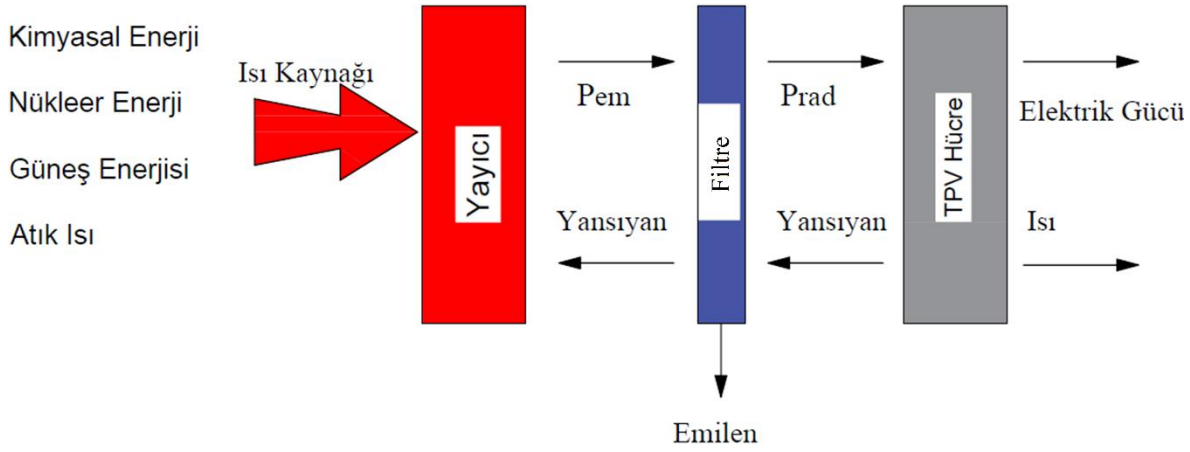
Farklı yakıt türlerinin kullanılabilmesine, hareketli parçası bulunmadığından düşük ses seviyelerine, kolay bakıma, hafifliğe ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları gibi üstünlükler, TPV sisteminin olumlu yanları arasında sıralanabilir. Bunun yanı sıra TPV sistemleri genellikle karbondioksit (CO) ve azot oksitler (NO_x) gibi çok düşük kirletici salınımlarına neden olmaktadır. Bunun nedeni genellikle ev tipi kazanlar gibi yanma cihazlarıyla birleştirilmeleridir [6, 8].

TPV sistemlerinde genellikle güneşten farklı ısı kaynakları kullanılmaktadır. Bundan dolayı termofotovoltaik hücre yüzeyinde, güneş fotovoltaik hücre yüzeyindekinden daha farklı bir spektrum görülmektedir. Güneş yüzeyinin sıcaklığına kıyasla genellikle 1200 °C gibi düşük sıcaklığa sahip ısı kaynağı, Wien'in Yer Değiştirme Kanunu'nun bir sonucu olarak yayınım spektrumunun daha uzun dalga boylarına doğru kaymasına neden olmaktadır. Bu kayma,

düşük enerjili fotonları emmek için alıcı-hücre olarak düşük bant aralıklı bir yarı iletken kullanılmasını gerektirmektedir [8].

5.1. Termofotovoltaik Sistem

Bir TPV sistemi üç ana bileşenden oluşmaktadır. Şekil 5.1'de gösterildiği gibi ısı kaynağı, seçici yayıcı ve TPV hücresidir. Ayrıca enerjinin, termofotovoltaik hücre tarafından daha kolay emilebilmesi ve elektriğe daha kolay dönüştürülebilmesi için spektral kontrole yardımcı olan filtrelerde kullanılabilmektedir [7, 9, 12, 54].



Şekil 5.1. TPV sisteminin bileşenleri (P_{em}: Yayıcının ışıma gücü, P_{rad}: Işınım gücü)

5.1.1. Isı kaynağı

TPV sistemlerinde, çalışma sıcaklığı 1000 K ile 1800 K arasında olan herhangi bir ısı kaynağı kullanılmaktadır [55-57]. Yazılı kaynaklarda düşük sıcaklıklarda çalışan TPV sistemleri de mevcuttur. Örneğin Xu, 350 K ile 550 K arasında değişen bir yayıcı sıcaklığına sahip, fotovoltaik malzemeden ve yayıcıdan oluşan bir sistemin ısıl değişimi üzerine bir tez hazırlamıştır [15]. TPV sistemlerinde yüksek sıcaklıklara sahip olan yanma alevleri, radyasyon izotopları (RTPV) ve yoğunlaştırılmış güneş ışığı (STPV) gibi birçok farlı ısı kaynağı tercih edilmektedir. TPV sistemlerinde en çok kullanılan ısı kaynağı, yeterince yüksek sıcaklığa sahip olan yanma sistemleridir. Çünkü Stefan-Boltzmann Kanunu'na göre (bkz. Eş. 2.3), yayılan güç miktarı sıcaklığın dördüncü kuvveti ile orantılıdır. Ayrıca Wien'in Yer Değiştirme Kanunu'na göre ısı kaynağının sıcaklığı, daha uzun dalga boylarına doğru spektrumda bir değişime neden olmaktadır. Sonuç olarak 1811 K sıcaklığındaki bir karacismin sıcaklığı, TPV hücrelerinin birçoğu için ihtiyaç duyulan 1600 nm' de yayılan

spektrumdaki bir zirveye ulaşması gerekmektedir. Çoğu uygulamada bu çok yüksek bir sıcaklık olduğu için, seçici bir yayıcının kullanımı yüksek dönüşüm verimine ulaşmak açısından gereklidir [8].

NO_x salınımı azaltmak için yakıcıların en uygun duruma getirilmesi çok önemlidir. Etkili bir yakıcı ile yüksek bir sıcaklığa ulaşılacağı için NO_x salınımı sorunu ortaya çıkacaktır. Yakıcının sıcaklığı 1300 ℃'de sabit tutularak uygun bir şekilde kontrol edilmesiyle, bu sorunu ortadan kaldırmak mümkündür [8].

Bu çalışmada kimyasal bir tepkime olan yanma, nükleer, güneş ve atık ısı kaynakları ayrıntılı bir şekilde tanımlanacaktır.

Yanma ısı kaynağı

TPV sistemlerinde yanma ısı kaynağı kullanılarak yayıcı için uygun sıcaklıklara ulaşılabilmektedir. Bu tip sistemlerde kullanılan yanma odalarının sıcaklığı, yakıtın cinsi ve yakıt-hava karışımı gibi birçok etkene bağlıdır. Düşük ısıl değere sahip yakıtlar, TPV sistemlerinde kullanılan yayıcılar için düşük sıcaklıklar üretmektedir. Diğer taraftan, yaygın olarak kullanılan hidrokarbon yakıtlar 2500 K yanma sıcaklığına ulaşabilmekte ve böylece istenen yayıcı sıcaklığı elde edilebilmektedir [26, 58]. Ancak hidrokarbon bir yakıtın yanması, yerel ve küresel kirlilik gibi bazı olumsuz etkilere neden olmaktadır. Örneğin bu hidrokarbon yakıtlar, azot oksit ve kükürt oksit içeren yerel asit yağmurlarına neden olabilmektedirler. Buna ek olarak bu yakıtların kullanılması atmosferdeki karbon dioksit seviyesini artırmakta ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Ancak bu sistemlerde biyoyakıt gibi yakıtların kullanılması durumunda karbon dioksit etkisinin az olduğu kabul edilmektedir [26].

TPV sistemlerinde farklı hidrokarbon yakıtlar kullanılmaktadır. Bu sistemlerde en yaygın kullanılanlar, doğal gaz ve bütan gibi gaz yakıtlardır. Bu gaz yakıtlara ek olarak gazyağı ve dizel gibi yakıtlarda bu sistemlerde kullanılmaktadır. Ancak gaz yakıtlarla kıyaslandığında sıvı yakıtlar daha karmaşık yanma teknikleri gerektirmektedir [26, 59].

Hidrokarbon bir yakıtın yanması sonucu oluşan alevin ışınımının spektral yayınım bandı, yaklaşık 2,7 μm ile 4,4 μm aralığındadır. Bu spektral yayınım bandı, elektromanyetik

spektrumda kızılötesi ışınıma denk gelmektedir. Işınımla olan ısı transferinin yanma sonucu ortaya çıkan toplam ısıya oranı, yakıt türü ve brülör tasarımı gibi etkenlere bağlıdır. Bu oran doğal gaz için yaklaşık %30 düzeyindedir. Buradan şu sonuç çıkarılabilir: Uygun olmayan ışınım spektrumundan ve ışıma ısısının toplam yanma ısısına olan düşük oranından dolayı alev ışınımının doğrudan dönüşümü TPV sistemleri için uygun değildir. Bundan dolayı TPV sistemlerinde ışınımın yoğunluğunu arttırmak ve spektrumu ayarlamak için bazı bileşenler gereklidir [26, 60, 61].

Nükleer ısı kaynağı

TPV sistemleri için kullanılan diğer bir ısı kaynağı nükleer enerjidir. Bu ısı kaynağının en önemli avantajı yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Ancak, yakıt işleme ve nakliyesi, işletimi, hizmet dışı bırakma ve atıkların imhası gibi olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bu ısı kaynağı uzay işlemleri için uzun vadeli güç sağlanması gereken alanlarda, mW değerlerden kW değerlerine kadar güç sağlayabilmektedir. En yaygın kullanılan radyoizotoplar ise plütonyum 238 ve stronsiyum 90'dır [26].

Güneş ısı kaynağı

Güneşte meydana gelen nükleer füzyon hem güçlü hem de sürekli bir ısı kaynağıdır. Güneş ışınımı, 5800 K sıcaklığa sahip karacisim spektrumuna yaklaştırılabilir. Yanma gibi diğer ısı kaynaklarıyla kıyaslandığında güneş ısı kaynağı, maliyetsiz bir şekilde kullanılabilirliği ve kirliliğinin olmaması gibi olumlu, ancak ısı kaynağının düşük yoğunluklu olması gibi olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bir yüzeyde meydana gelen güneş ışınımı konum, yönlendirme, çalışma ortamı ve bulut örtüsü gibi etkenlere bağlıdır. En iyi durumda karasal güneş ışınımının yoğunluğu yaklaşık 0,1 W/cm^2'dir. Düşük güneş ışınımından dolayı, TPV sistemlerinde uygun yayıcı sıcaklığını elde etmek için güneş yoğunlaştırıcıları kullanılmaktadır [26]. Yoğunlaştırıcılı güneş termofotovoltaik (STPV) sisteminde, güneş ışınları yoğunlaştırıcılar tarafından toplanarak yayıcıya gönderilmekte ve daha sonra yayıcı tarafından gönderilen fotonlar düşük bant aralıklı fotovoltaik hücreler sayesinde elektriğe dönüştürülmektedir. Geleneksel olanlara kıyasla böyle bir sistemin temel avantajı, düşük bant aralıklı fotonları kullanma imkânı sağlamasıdır. STPV veriminin teorik olarak tahmini değerleri, kullanılan yaklaşıma bağlı olarak %30'dan %70'e kadar geniş aralıktadır. Uygulamada ise STPV dönüştürücülerin beklenen verimi %30-35 aralığındadır [8].

Bir STPV sisteminde güneş ışınımını emen ara bir parça kullanılmaktadır. Emilen bu güneş ışınımı, fotovoltaik (PV) hücrelere doğru uygun hale getirilmiş dalga boylarına sahip yüksek sıcaklıklardaki fotonlara STPV tarafından tekrar yayınlanmaktadır. Yüksek verimli STPV'lerin geliştirilmesindeki en büyük zorluk, yüksek sıcaklıklarda çalışan (1000 K üzerindeki bir sıcaklık) soğurucu ve yayıcının spektral tepkisini ayarlamaktır. TPV uygulamalarında kullanılmak amacıyla uygun bir yayıcı için birçok çalışmada nadir toprak oksitler ve tungsten gibi çeşitli malzemeler araştırılmıştır. Ancak henüz uygun bir yayıcı performansına yaklaşılamamıştır [62-64].

Atık ısı kaynağı

Atık ısı kaynağı, temel amacı ısı üretimi olan ve ısının geri kalan bir kısmıyla TPV sistemleri tarafından elektrik üretimine dönüştürülen bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Büyük güç aralığına sahip cam sanayisi gibi alanlarda yüksek sıcaklıklı atık ısının geri kazanılması için TPV sistemleri önerilmektedir [26]. Örneğin ABD sanayisinde tüketilen enerjinin yaklaşık %20-50'si atık ısı olarak çevreye gönderilmektedir. Bu büyük miktardaki enerji TPV gibi bir sistem tarafından kullanılmasıyla enerjinin verimli bir şekilde kullanılması sağlanabilir [11, 65].

5.1.2. Yayıcı

Bir alevden çıkan elektromanyetik ışınımın doğrudan uygulanmasının aksine seçici bir yayıcı kullanımı çeşitli nedenlerden ötürü yararlıdır. Güneş ışınımına kıyaslandığında, 2000 K altındaki sıcaklıklara sahip bir ısı kaynağından gelen ışınım önemli derecede kırmızıya dönmektedir ve daha geniş dalga boyu aralığında yayılmaktadır. Örneğin sıcaklığı 1800 K'de bir karacisim yayıcısı, Si güneş hücrelerinin 1,1 eV bant aralık enerjisi üzerindeki foton enerjilerinin ışınım gücünün yalnızca %6'sını yaymaktadır. Bant aralığı ötesine çok küçük ışınım gücünü artırmanın bir yolu, yukarıda geçen bant aralık enerjilerindeki dar spektrum üzerine fotonları ideal bir şekilde yayan seçici bir yayıcıdan yararlanmaktır. Aynı zamanda bu yayıcılar, devamlı olarak hücrenin sıcaklığının yükselmesine neden olan ve böylece dönüşüm verimini düşüren gereksiz emilimi önlemek için de alt-bant aralıklı fotonların fotovoltaik hücrenin içine girmesini engellemektedir. Yansıtıcı kaplamalar veya yüzeyi dokulu olan filtreler, alt-bant aralığı ışınımını yayıcıya geri yansıtmak için kullanılabilir. Bu

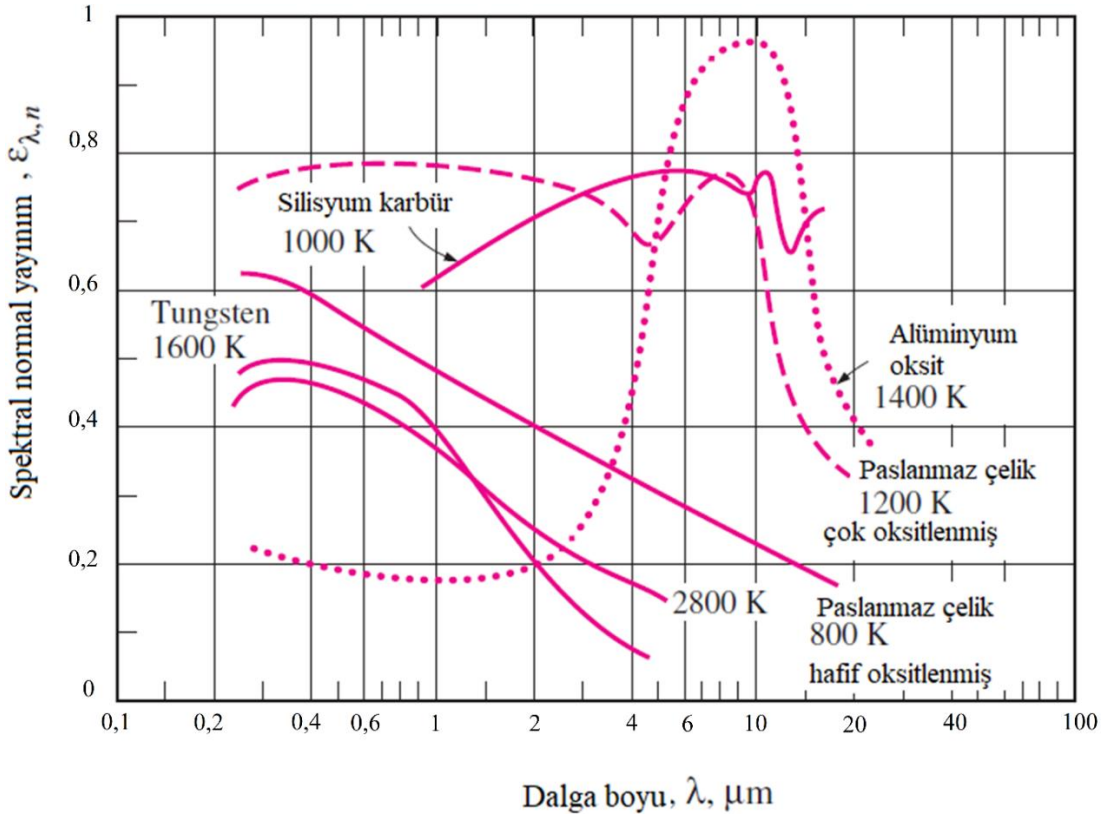
fotonların bir kısmı yayıcı tarafından emilir ve TPV hücresinin bant aralığı üzerindeki enerjilerle tekrar yayınlanır [7].

Bir ısı kaynağının yayınım spektrumu sıcaklığa büyük oranda bağlıdır. Tipik ısı kaynakları 1000 K ve 1800 K aralığında bir sıcaklığa sahip olduklarından ve fotovoltaik hücreler sadece bant aralığının üzerinde enerjiye sahip olan fotonları emecekleri için, yayılan ışınımın yalnızca küçük bir kısmı elektriğe dönüşebilir. Sistem verimini arttırmak için seçici bir yayıcının kullanılması çok önemlidir. Kısacası seçici yayıcının rolü, gelen ısıyı emmek ve alıcı duyarlılığına uyarlanmış bir yayıcı spektrumunda yaymaktır [8].

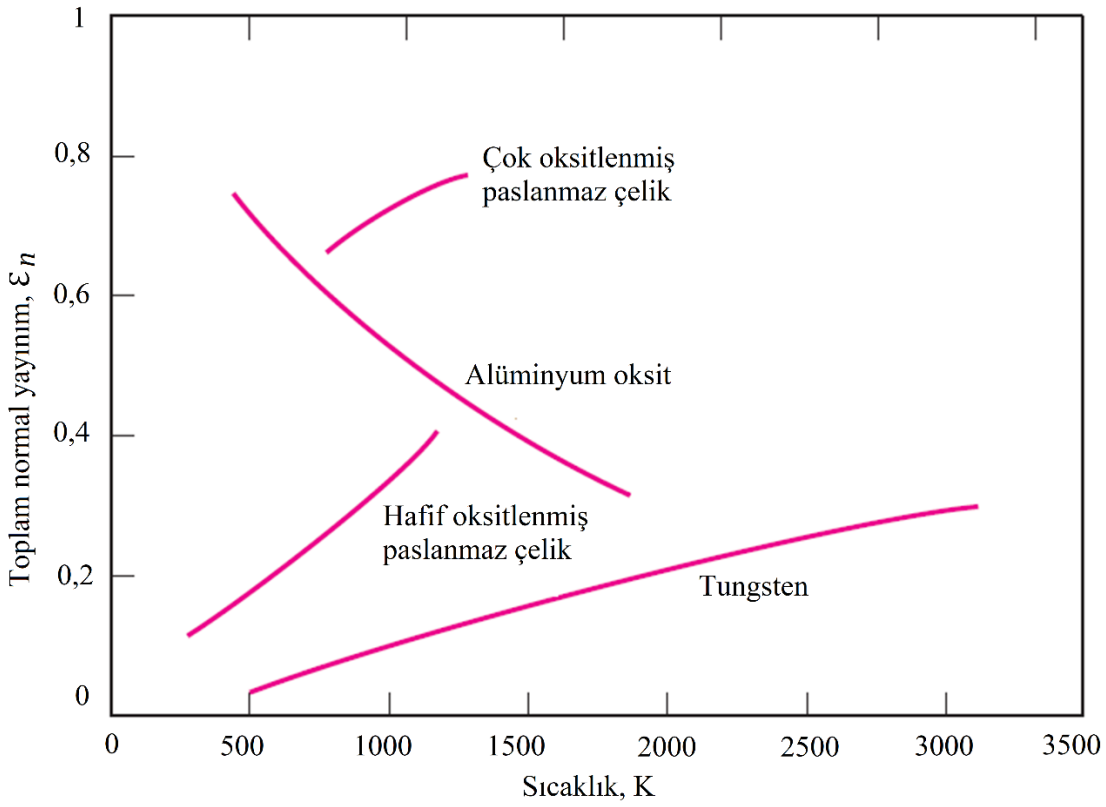
Bu bölümde iki tip yayıcı incelenmektedir. Bunlardan birincisi sabit spektral yayma gücüne sahip gri cisim yayıcılar, diğeri ise değişken spektral yayma gücüne sahip seçici yayıcılardır.

Gri cisim yayıcılar

Yayıcılık, bir malzeme için yayılan ışınım akısını belirleyen optik bir özelliktir. Gri bir malzemenin spektral yayma gücü, tüm dalga boyları için aynıdır. Aslında yalnızca karacisim için tüm dalga boylarında spektral yayma gücü aynıdır. Yani karacisim için spektral yayma gücü (ε) 1'e eşittir. Ancak birçok malzeme için spektral yayma gücü, tüm dalga boylarında neredeyse sabittir [66]. Şekil 5.2'de çeşitli malzemelerin normal yayınımının dalga boyu ile değişimi ve şekil 5.3'te çeşitli malzemelerin toplam normal yayınımının sıcaklıkla değişimi verilmektedir [42].



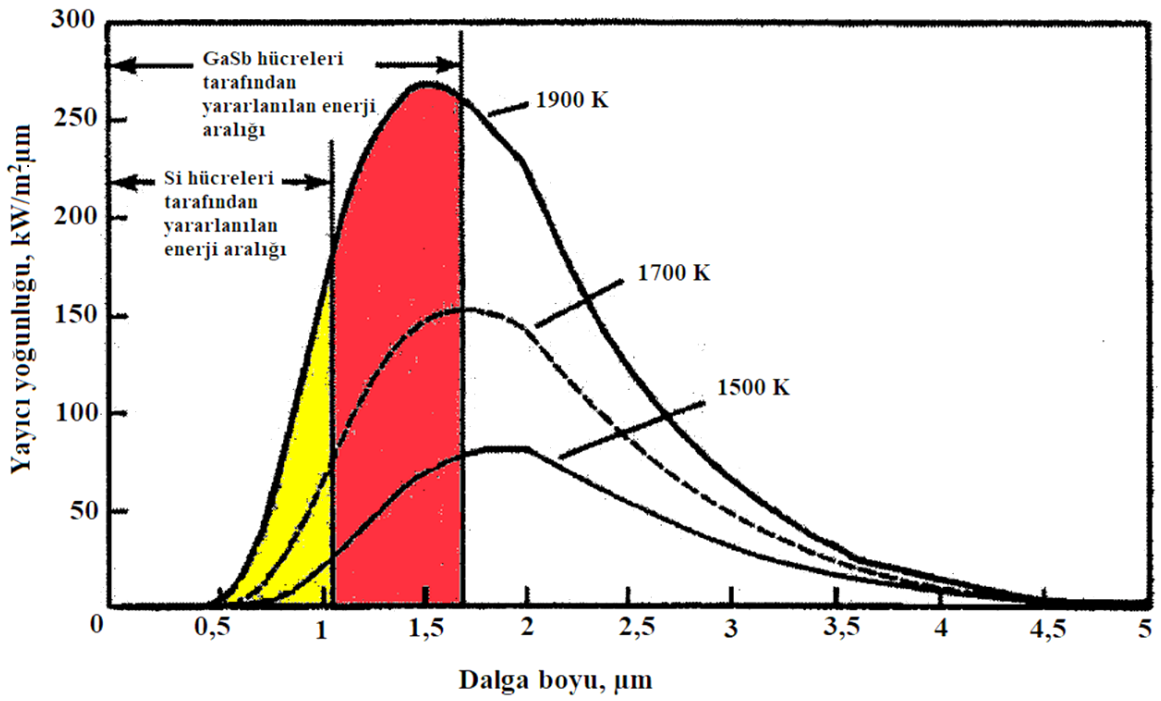
Şekil 5.2. Çeşitli malzemelerin normal yayınımının dalga boyu ile değişimi



Şekil 5.3. Çeşitli malzemelerin toplam normal yayınımının sıcaklıkla değişimi

Şekil 5.2'de verilen sıcaklıklar malzemelerin ergime noktalarıdır. Şekillerde gösterilen tungsten ve silisyum karbür, TPV sistemlerinde yayıcı olarak kullanılabilmektedir. Ancak tungstenin yüksek sıcaklıklarda havada oksitlenmesinden dolayı yayıcı olarak kullanılması uygun değildir. Silisyum karbür, 2000 K üzerindeki sıcaklıklarda yapısı bozulmaktadır. Bununla birlikte bahsedilen bu sıcaklığın altında büyük bir yayma gücünden dolayı TPV sistemlerinde tercih edilebilmektedir [7, 8, 66]. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi dalga boyu düştükçe silisyum karbürün spektral normal yayınımı düşmektedir. TPV sistemlerinde yayıcı olarak silisyum karbür kullanılması durumunda TPV sistem verimi olumsuz yönde etkilenmektedir. Bunlara ek olarak genellikle birçok malzemenin toplam normal yayınımı sıcaklığın artmasıyla artmaktadır [66].

Şekil 5.4'te silisyum karbürün ışıma spektrumu gösterilmektedir. Silisyum karbür yüksek ışıma değerinden ve yüksek sıcaklıklarda yapısının bozulmamasından dolayı TPV sistemlerinde yayıcı olarak tercih edilmektedir. Işıma değerleri sıcaklığın bir fonksiyonudur. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi, Wien yasasına göre yükselen sıcaklıkla birlikte ışıma artarak sola kaymaktadır. Yayıcı sıcaklığının yüksek olması arzu edilen bir durumdur. Ancak sıcaklığın artmasıyla hem yayıcı hem de TPV sisteminde kullanılan diğer elemanların yapısı bozulmaktadır. Bundan dolayı sıcaklığın çok yüksek değerlere çıkması istenmemektedir [27].



Şekil 5.4. Silisyum karbürün ışıma spektrumu

Bu çalışmada TPV sisteminde yayıcı olarak yüksek ışıma gücüne sahip olmasından ve yaygın olarak kullanılmasından dolayı silisyum karbür tercih edilmiştir.

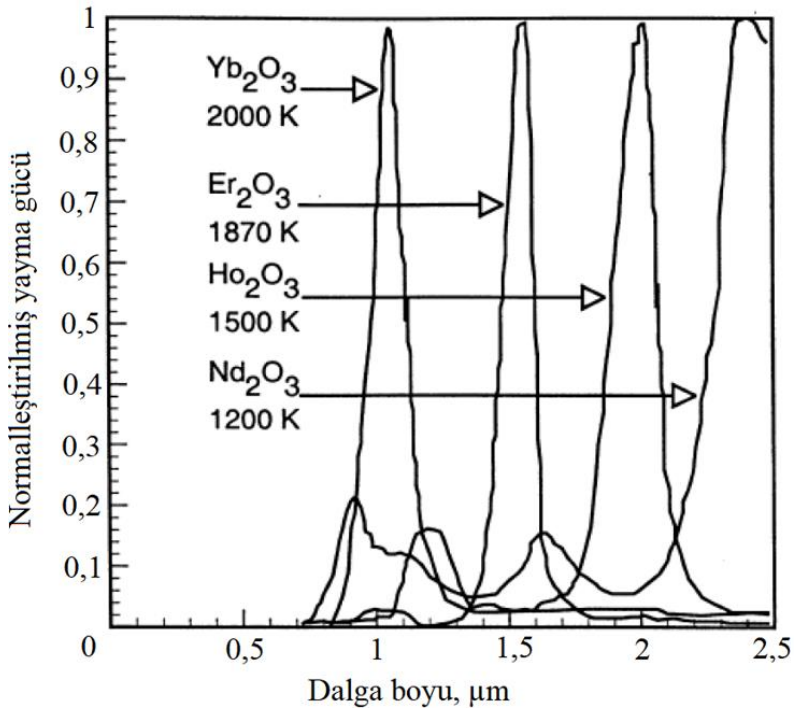
Seçici yayıcılar

Uygun bir yayıcı, yalnızca TPV hücresinin bant aralık enerjisine eşit fotonları yaymalıdır [66]. Bir TPV sistemi için etkili bir ışınım yayıcısı, TPV hücreleri tarafından dönüştürülebilen ışınım için yüksek, ancak dönüştürülemeyen ışınım için ise düşük yayma oranına sahip olmalıdır. Yüksek yayma oranını gerçekleştirmek için karacisim kullanılabilir. Ancak düşük yayma oranını gerçekleştirmek için yayıcının seçici bir filtre ile çalışması gerekmektedir. İlke olarak seçici bir yayıcı, hem dönüştürülebilen ışınım için yüksek yayma oranını hem de dönüştürülemeyen ışınım için düşük yayma oranını yerine getirebilmektedir [9].

Malzeme özelliği olarak seçici bir yayma gösteren malzemelerin başında nadir toprak oksitler gelmektedir. Seçici yayıcılığın en yüksek olduğu dalga boyu, nadir toprak elementlerin 4f-elektron konumuna bağlıdır [9, 67].

Seçici yayıcılar, elektromanyetik spektrumun sadece küçük bir kısmı üzerinde ışıma yapmaktadır. Bundan dolayı, verimi en üst seviyeye çıkarmak için TPV sistemlerinde seçilen seçici yayıcılar TPV hücreleriyle uyumlu olmak zorundadır. Seçici yayıcılar tipik olarak nadir toprak seramik oksitlerinden yapılmaktadır. Bu oksitlerde kullanılan elementler; iterbiyum (Yb), erbiyum (Eb), holmiyum (Ho), neodimiyum (Nd) ve tulyum (Tm) [14, 27, 66-69].

Şekil 5.5'te seçici yayıcıların dalga boyu ve normalleştirilmiş yayma güçleri verilmektedir [14]. Şekilde 5.5'te görüldüğü gibi iterbiyum oksit (Yb_2O_3), erbiyum oksit (Er_2O_3), holmiyum oksit (Ho_2O_3) ve neodimiyum oksit (Nd_2O_3) seçici yayıcıların en yüksek ışıma değerleri sırasıyla; 1 µm, 1,5 µm, 2,1 µm ve 2,4 µm'dir.



Şekil 5.5. Dört farklı seçici yayıcının normalleştirilmiş yayma gücü ve dalga

TPV sistemleri için ilgi çekici bu nadir toprak elementler, mevcut TPV hücrelerinin bant aralığı enerjileriyle eşleşen yayım bantlarına sahip olan elementlerdir. Bu bant aralık enerjileri, indiyum galyum arsenik (InGaAs) için $E_g \approx 0{,}5$ eV ($\lambda \approx 2500$ nm) ile Si için $E_g \approx 1{,}1$ eV ($\lambda \approx 1000$ nm) arasında değişebilmektedir. Diğer bir deyişle bu nadir toprak elementlerin yayım bantları 1000 nm $\leq \lambda \leq$ 2700 nm aralığındadır [66].

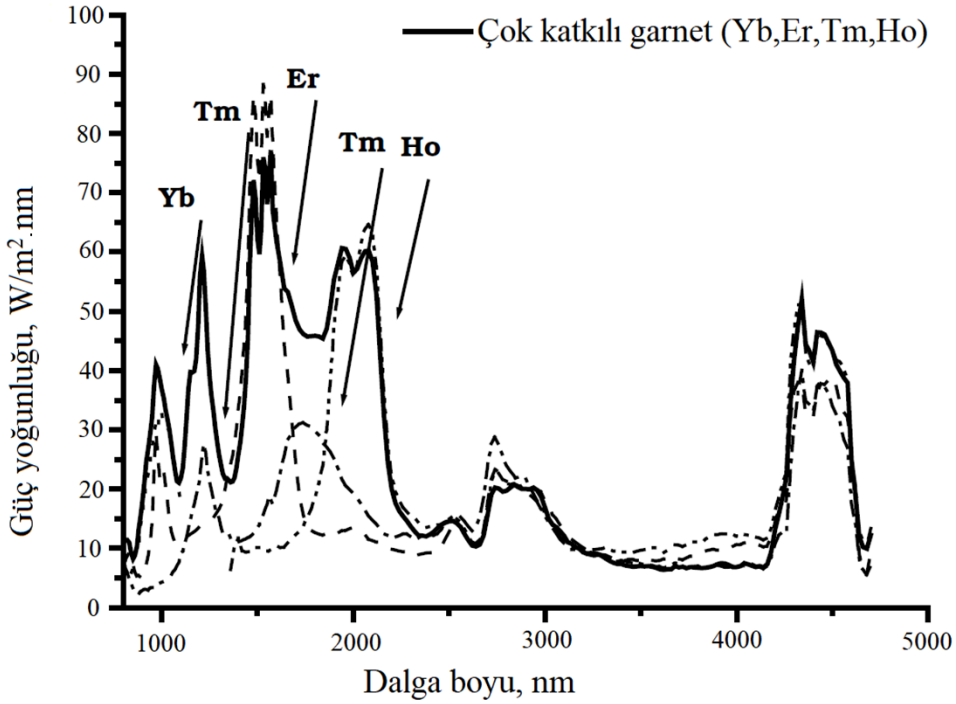
TPV sistemlerinde yayıcı sıcaklığı genellikle 1000 °C'den daha yüksek sıcaklıklardadır. Bundan dolayı nadir toprak içeren yayıcı malzemeler yüksek bir ergime noktasına sahip olmalıdır. Nadir toprak iyonları için birçok olası yüksek sıcaklığa dayanıklı yardımcı malzemeler vardır. Ayrıca, nadir toprak iyonunun yayınım bantlarının genişlikleri ve dalga boyu konumları yardımcı malzemeden neredeyse etkilenmemektedir. Bu yardımcı malzemelerin birkaçı çizelge 5.1'de verilmektedir [66]. Çizelgede verilen R simgesi, nadir toprak elementlerini ifade etmektedir.

Çizelge 5.1. Nadir toprak oksitler için yardımcı malzemeler ve bu malzemeler ile katkılandırılmış nadir toprak oksitlerin ergime sıcaklıkları

Yardımcı malzeme	Kimyasal formül	Ergime noktası, ℃
Saf nadir toprak oksit	R_2O_3	>2200
İtriyum alüminyum garnet (YAG)	$R_xY_{3-x}AlO_{12}$ $0<x<3$	1930
Spinel	$R_xMg_{1-x}Al_2O_4$	2100
Gadolinyum galyum garnet (GGG)	$R_xGd_{3-x}Ga_5O_{12}$ $0<x<1$	1750
Zirkonya	$R_xZr_{1-x}O_2$ $0<x<1$	2700
İtriyum	$R_xY_{2-x}O_3$ $0<x<2$	2400

Nadir toprak seçici yayıcıların ilk örnekleri çok taneli bir yapıya sahipti. Bu örnekler, oksit tozları sinterlenerek nadir toprak oksit yayıcılardan elde edilmiştir. Elde edilen bu yayıcılar 1 mm kalınlığındaydı. İlerleyen yıllarda TPV sistemleri için lifli seçici yayıcılar üretilmiştir [66].

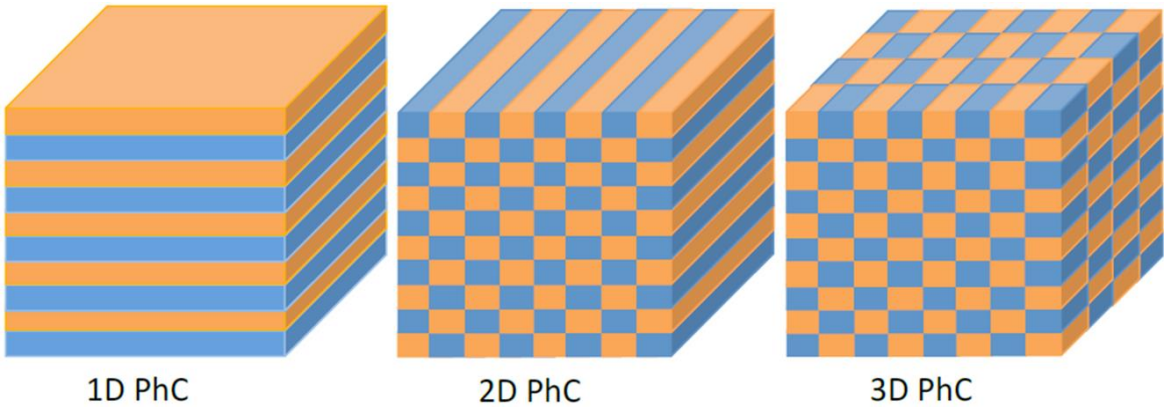
Bazı çalışmalarda, tek bir nadir toprak elementin ışıma bant aralığı herhangi bir TPV sistemi için uygun olmadığı belirtilmektedir. Çünkü bu yayıcılar tarafından sağlanan güç yoğunluğu çok düşüktür. Bazı araştırmacılar, farklı tipteki karma nadir toprak elementlerden oluşan yayıcıları incelemişlerdir. Şekil 5.6'da 1350 ℃ sıcaklıkta her bir tek-katkılı garnetlerin spektral ışımasına kıyasla çok-katkılı garnet kaplamanın spektral ışıması gösterilmektedir. Çok katkılı garnetin ışıması, farklı nadir toprak elementlerin birleşerek üst üste binmesidir [69].



Şekil 5.6. 1350 ℃'de her bir tek-katkılı garnetlerin spektral ışımasına kıyasla çok-katkılı garnet kaplamanın spektral ışıması

Seçici bir yayıcının önemli bir özelliği, foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak yayıcılığıdır. Seçici yayıcının yayıcılık özelliği, belirli bir yakıcı yardımı ile ulaşılan yayıcı sıcaklığını, seçici yaymanın tepe noktasının yüksekliğini ve TPV hücrelerini ısıtan istenmeyen (parazit) kızılötesi ışınımın miktarını belirlemektedir [70].

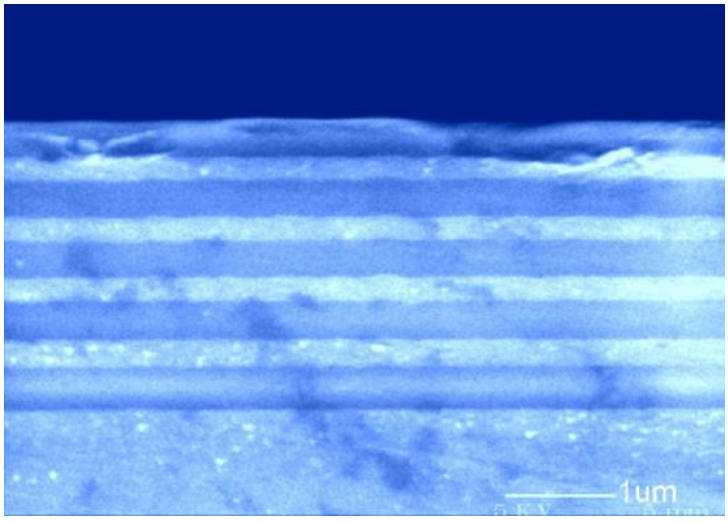
Seçici yayıcıların bir kısmı, düzenli çok katmanlı ince filmlerden, metamalzemelerden veya plasmoniklerden oluşan fotonik kristallerdir. Fotonik kristaller (PhC), farklı kırılma indekslerine sahiplerdir ve bu seçici yayıcılar doğal veya yapay düzenli yapılardır. Fotonik kristallerin yapıları bir (1D), iki (2D) ve üç boyutlu (3D) yapılar olarak ayrılmaktadır. Şekil 5.7'de fotonik kristallerin yapıları gösterilmektedir [7, 34, 70].



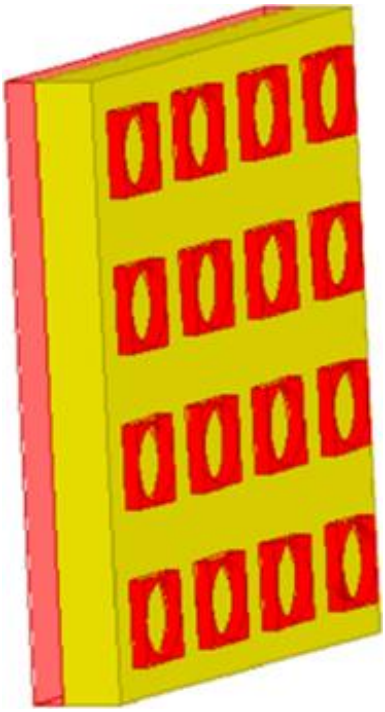
Şekil 5.7. 1D, 2D ve 3D fotonik kristallerin yapısı

TPV sistemlerinde süper optik performansa sahip fotonik kristallerin uygulanması, yayıcının daha düşük sıcaklıklarda kullanılmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı yayıcı sıcaklığının azalmasından dolayı TPV sistemlerinde kullanılan yayıcının ısıl gerilmeleri azalacaktır [70].

Fotonik kristal yayıcı olarak tungsten yaygın olarak araştırılmaktadır. Ancak tungstenin dışında Si/SiO_2, $W/SiO_2/W$ ve tantalyum gibi malzemelerden yapılan seçici yayıcılarda mevcuttur. Şekil 5.8'de Si/SiO_2'ten oluşan fotonik kristal seçici bir yayıcı ve şekil 5.9'da W-SiN oluşan metamalzeme seçici bir yayıcı gösterilmektedir [70-74].



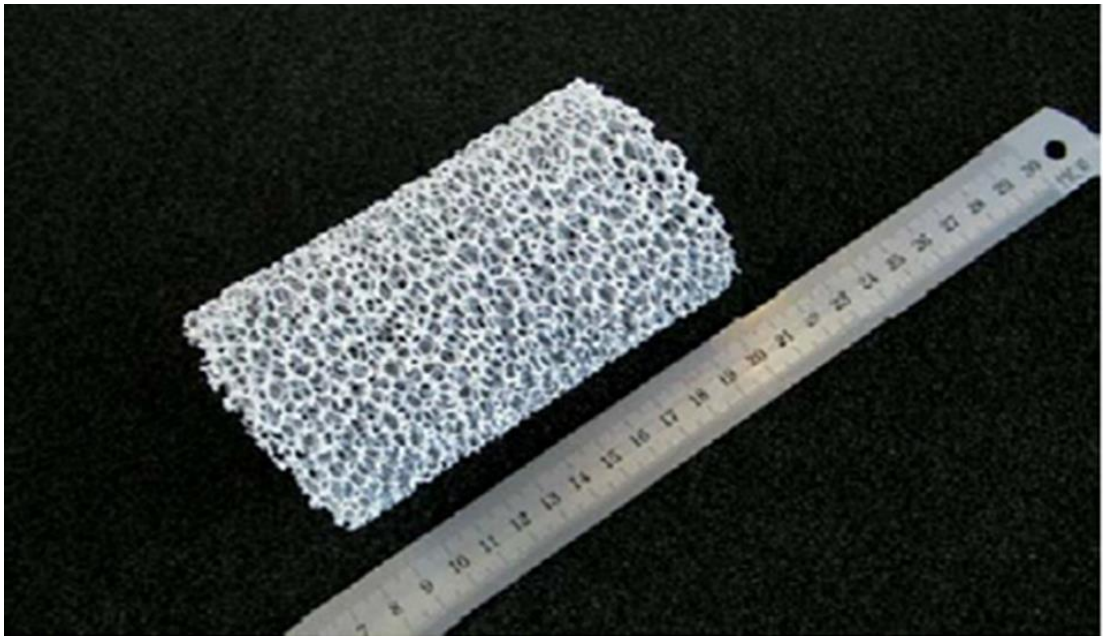
Şekil 5.8. 10 katmanlı Si/SiO_2-1D fotonik kristal seçici yayıcının taramalı elektron mikroskop görüntüsü



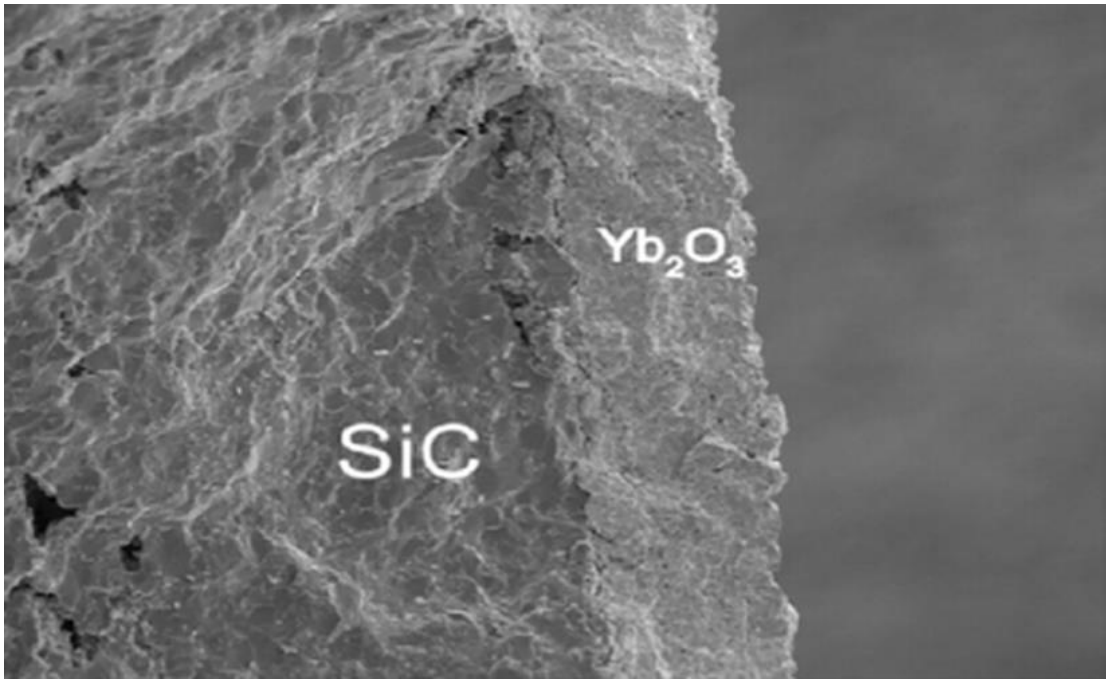
Şekil 5.9. Metamalzeme seçici bir yayıcının yapısı

Yukarıda bahsedilen seçici yayıcıların dışında *uyumlu yayıcı* adı verilen sürekli-tip yayıcılar TPV sistemlerinde kullanılmaktadır. Çünkü bu uyumlu yayıcıların spektral yayıcılığı seçicidir ve bu yayıcıların spektral yayıcılığı kızılötesine tepki gösteren TPV hücrelerinin kuantum veriminin oldukça verimli olduğu dalga boylarına odaklanmaktadır. Bu uyumlu yayıcılar kobalt-nikel katkılı magnezyum oksit (MgO), kobalt oksit (Co_2O_4) biçiminde kobalt katkılı veya nikel oksit (NiO) biçiminde nikel katkılı MgO'tir [66, 75].

Resim 5.1 ve resim 5.2'de Yb_2O_3 ile kaplanmış SiC bir yayıcı gösterilmektedir. Yaklaşık 100 μm kalınlıktaki kaplama, SiC alt tabakaya iyi bir birleşme sağlayan plazma püskürtme ile yapılmıştır [9].



Resim 5.1. Yb_2O_3 ile kaplanmış SiC yayıcı (yaklaşık 140 mm genişliğindedir)



Resim 5.2. Yb_2O_3 ile kaplanmış SiC yayıcının iç yapı resmi

5.1.3. Filtre

Özellikle geniş-bant ışınım için, yayılan fotonların birçoğu TPV hücresinin bant aralığından daha düşük enerjilere sahiptir ve bu durumda bu enerji TPV hücresi tarafından kullanılamamaktadır. TPV sisteminin yüksek verimini sağlamak ve TPV hücresinin gereksiz

yere ısınmasını önlemek amacıyla bu fotonları yayıcıya geri göndermek, böylece ısıyı korumak ve gerekli ısıtıcı sıcaklığını elde etmek için, daha az yakıt kullanılmasına izin vermek önemlidir. Uygun bir filtre, TPV sisteminin veriminde büyük bir fark yaratmaktadır [5, 7, 8].

Özellikle spektral verim açısından, TPV hücresine yayıcı spektral salınımını eşleştirmek için kullanılan filtreler önemlidir. Spektral verim, filtrenin uygun olarak TPV hücresi bant aralığından daha düşük enerjili tüm fotonları engelleyebilmesi ve daha yüksek enerjiye sahip fotonları geçirebilmesi anlamına gelmektedir [6].

Not edilmelidir ki, devamlı olarak hücrenin sıcaklığının yükselmesine neden olan ve böylece dönüşüm verimini düşüren gereksiz emilimi önlemek için, alt-bant aralıklı fotonların fotovoltaik hücrenin içine girmesini engellemek önemlidir. Yansıtıcı kaplamalar veya filtreler, alt-bant aralık ışınımını yayıcıya geri yansıtmak için kullanılabilir. Bu fotonların bir kısmı yayıcı tarafından emilir ve TPV hücresinin bant aralığı üzerindeki enerjilerle tekrar yayılır [7].

Bu bölümde, TPV sistemlerinde kullanılan çeşitli filtre türleri ele alınmaktadır. Bu filtreler aşağıda incelenmektedir. Bu çalışmada filtre olarak kuvars camı tercih edilmiştir. Çünkü bu cam, 4 μm' den daha uzun dalga boyuna sahip fotonları engelleyen basit bir filtredir [8].

Frekans seçici yüzey filtreler

Frekans seçici yüzey filtreler, genellikle destek için bir dielektrik alt tabaka üzerine basılmış, çok sayıda ince iletken elemandan oluşan dizi yapılardır. Bu filtreler, bant geçişli filtrelerden oluşmaktadır. Bu filtrelere rezonans dizi veya metalik ağ filtrelerde denilmektedir. Frekans seçici yüzey filtreler, milimetre ve mikrometre altı elektromanyetik dalga boyu aralığı ile bilinmektedir. Yani uzun dalga boyu elektromanyetik ışınımını (mikrodalga) yansıtmakta ve kısa dalga boyu ışınımını (ışık) ise iletmektedir [26, 68]. Bu filtrelerde alt tabaka olarak kalsiyum florür (CaF), baryum florür (BaF), itriyum alüminyum garnet (YAG), silikon (Si) gibi malzemeler kullanılmaktadır [76]. Bazı çalışmalarda mikron altı özelliğe sahip bir frekans seçici yüzey filtrenin, TPV sistemlerinde ısıl ışınım için uygun bir filtre olacağı vurgulanmaktadır. Ancak bazı farklı çalışmalar ise, bu filtrelerin spektral performansının tandem filtrelerden önemli ölçüde düşük olduğunu göstermektedir [77].

Saydam iletken oksit filtreler

Saydam iletken oksit filtreler, diğer adıyla plazma filtreler, geniş bant aralığına sahip yüksek katkılı ince yarı iletken filmlerdir. Bu filtrelere; indiyum oksit (In_2O_3), kalay oksit (SnO_2), indiyum kalay oksit (In_2O_3-SnO_2), çinko oksit (ZnO), kadmiyum stanat (Cd_2SnO_4) ve kadmiyum indiyum oksit (CdO – In_2O_3) örnek gösterilebilir. Bunlara ek olarak TPV sistemleri için arsenik, fosfor ve bor katkılı silikona sahip saydam iletken oksit filtrelerde incelenmiştir. Bu filtreler, görünür ışığın iletildiği ve kızılötesi ışınımın yansıtıldığı uygulamalar olan düz-panel ekranlar, mimari ısı yansıtıcı kaplamalar ve PV paneller gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [9, 66, 68]. Bu malzemelerin bant aralığı 3 eV civarında veya üstündedir. Bu değer yaklaşık 0,4 μm' lik bir dalga boyuna karşılık gelmektedir. Bu nedenle, bu malzemeler kızılötesi spektral bölgenin bir bölümünde ve görünür bölgede saydamdır. Yani bu filtreler TPV sistemlerinde yüksek elektrik iletkenliğine yardımcı olmaktadır. Bu da kızılötesi ışınımın plazma frekansının ötesine yansımasına yol açmaktadır [68].

Saydam iletken filtrelerin TPV uygulamalarında kullanılan sıcaklık aralığındaki kararlılıkları, yüksek kaliteli ve düşük maliyetli üretime sahip olmaları gibi avantajları bulunmaktadır [78].

Tam dielektrik filtreler

Düzlem dalgaların bir özelliği, elektromanyetik alanı artırmak veya azaltmak için etkileşime girebilmeleridir. Bunun sonucu olarak tam dielektrik filtreler kullanılarak, spektrumun belirli bir bölgesinde yüksek iletime ve bu bölge dışında kalan kısımda ise yüksek yansımaya sahip optik bant-geçişli filtreler üretmek mümkündür [66]. Bu filtreler farklı kırılma indekslerine sahip birçok ince katmanlı malzemelerden oluşmaktadır. Yüksek ve düşük kırılma indeks oranı en üst düzeye çıkarılabilmektedir. Böylece bu durum daha az katman, toplam malzeme ve dolayısıyla daha az toplam soğurma ve düşük imalat maliyetli bir filtre tasarımına izin vermektedir [68].

Yüksek kırılma indekslerine sahip malzemeler arasında çinko selenid (n_{ZnSe}=2,4), çinko sülfür (n_{ZnS}=2,3) ve silikon bulunmaktadır. Magnezyum florür, (n_{MgF_2}=1,4) indeks değeri düşük olan bir malzemedir. Ancak TPV sistemlerinde bu malzemelerin ısıl kararlılığı çok

iyi değildir. Bundan dolayı bunlardan başka filtre malzemeleri incelenmektedir. Bu malzemelerin yüksek kırılma indeksine sahip olanları antimon sülfür ($n_{Sb_2S_3}$=2,8), galyum tellür (n_{GaTe}=3) ve antimon selenid' dir ($n_{Sb_2Se_3}$=3,4). Ancak antimon selenid' in (Sb_2Se_3) çalışma sıcaklığı en fazla 90 ℃ olduğu unutulmamalıdır. Bu malzemelerin düşük kırılma indeksine sahip olanları ise itriyum florür' dür (n_{YF_3} =1,5) [68].

Düşük emilimlerinden dolayı tam dielektrik filtreleri kullanmak daha uygundur. Ancak bu filtrelerin, daha küçük dalga boyları için en uygun duruma getirilmesi ve çok fazla katman kullanılacaksa yüksek maliyete sahip olması gibi bazı olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bu filtrelerin işleyişini en uygun duruma getirmek için tüm katmanların kalınlığının ayarlanması gerekmektedir [68].

Metal dielektrik filtreler

Bu filtreler her kenarında bir veya daha fazla dielektrik katman arasına sıkıştırılmış ince bir metal tabakadan oluşmaktadır. Bu metaller arasında çinko sülfür (ZnS), çinko selenid (ZnSe), magnezyum florür (MgF_2), çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit (TiO_2) gibi dielektrik malzemelere sahip olan altın ve gümüş bulunmaktadır. Metal filmler, orta ve uzak kızılötesi dalga boyu aralığında yüksek yansıtma özelliğine sahiptirler. Ancak bu filtrelerin en olumsuz yönü, metal tabakada istenmedik emilim yapmasıdır. Tam dielektrik filtrelere benzer şekilde, bu filtrelerin genel işleyişini en uygun duruma getirmek için tüm katmanların kalınlığını ayarlamak gerekmektedir [68].

Birleşik filtreler

Birleşik filtreler, tam dielektrik ve saydam iletken oksit filtrelerin birlikte kullanılmasıdır. Tam dielektrik filtreler bant aralık enerjisinden büyük fotonların yüksek iletimini, bant aralık enerjisinden düşük fotonların yüksek yansımasını ve yüksek iletimden yüksek yansımaya veya bant aralık dalga boyuna keskin bir geçiş sağlamaktadır. Saydam iletken oksit filtreler ise (dalga boyu ~ 6μm'den büyük) bant aralık enerjisinden büyük fotonlar için düşük emilim ve bant aralık enerjisinden düşük fotonlar için yüksek yansıma sağlamaktadır [77].

Saydam iletken oksit filtreler, indiyum fosfit (InP) alt tabaka üzerine eklenmiş yoğun katkılı n-tipi $InP_{0,75}As_{0,25}$ katmandan oluşmaktadır. Bu filtrenin plazma dalga boyu 4,5-5μm'dir.

Tam dielektrik filtre olan Sb_2Se_3 (n=3,4) kırılma malzemesinin yüksek indeksi olarak ve YF_3 (n=1,5) kırılma malzemesinin düşük indeksi olarak kullanılmaktadır [77].

Saydam iletken oksit filtre olarak kullanılan Sb_2Se_3 malzemesi, birleşik filtrenin çalışma sıcaklığını sınırlamaktadır. Sb_2Se_3 tabakası, 145 °C gibi yüksek sıcaklıklarda birkaç dakika içinde şekilsiz bir malzemeden kristalimsi bir malzemeye dönüşmektedir. Bunun sonucu olarak emilimde istenmeyen miktarda artış olmaktadır. Eğer filtrenin çalışma sıcaklığı 80 °C veya daha altında bir sıcaklıkta sabit tutulursa, filtrenin işleyişinde herhangi bir değişiklik olmamaktadır [77].

Birleşik filtrelerde Sb_2Se_3 filtre yerine GaTe ve Sb_2S_3 filtrelerde kullanılabilmektedir. GaTe (n~3,1) malzemesi, Sb_2S_3'ten (n ~ 2,8) daha yüksek bir kırılma indeksine sahip olduğu için daha çok tercih edilmektedir. Buna ek olarak GaTe malzemesinin çalışma sıcaklığı yaklaşık 150 °C'a kadar olması durumunda işleyişinde bir değişiklik olmamaktadır. Ancak GaTe' ün kırılma indeksi, Sb_2Se_3' in kırılma indeksinden daha düşük olduğundan dolayı işleyişi Sb_2Se_3'den daha düşüktür [77].

Diğer filtre türleri

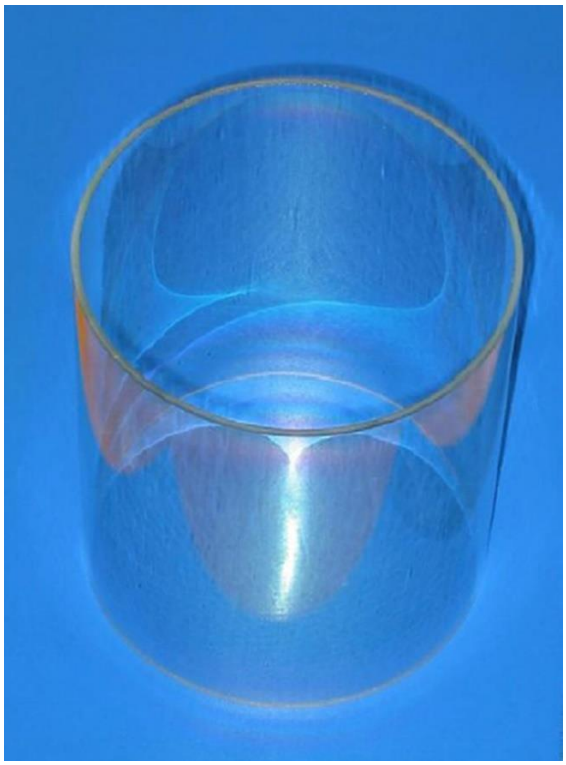
Katlı veya kıvrımlı filtreler (rugate filtre) sürekli değişen kırılma indeksine sahip filtrelerdir. Bu filtreler mükemmel bir seçici filtre olarak kabul edilmektedir. Çünkü bu seçici filtre, TPV hücresinin bant aralığının üzerinde yayılan ışınımın dar spektral bandı için neredeyse %100 geçirgenliğe ve tüm diğer foton enerjileri için ise neredeyse %100 yansıtıcılığa sahiptir. Ancak bu filtrelerin imalat işlemleri karmaşık olduğundan pahalıdırlar [7,9].

İki eş merkezli SiO_2 tüp içerisinde bulunan 5 mm kalınlığında bir su tabakası kullanılması basit bir filtre tipidir. Bu filtre, 1,4 μm üzerindeki dalga boylarını soğurabilmektedir. Buna ek olarak bu filtrenin basitlik, orta ve uzak kızılötesi ışınımını iyi bir şekilde soğurabilmesi ve kombine sistemler için sıcak suyun kullanılması gibi olumlu yanları bulunmaktadır. Ancak bant içi iletimin az ve suda soğurulan ısı nedeniyle elektrik veriminde azalma olması gibi olumsuz yönleri de vardır [68].

Fotonik kristal malzemeler kullanılarak seçici filtreler elde edilebilmektedir. Bunlar belirli frekanslarda yüksek iletimden yüksek yansımaya nispeten keskin geçişler

yapabilmektedirler. 1D fotonik kristal filtreler Si/Si_2, Ag/SiO_2 gibi nispeten ucuz malzemelerden imal edilebilmekte ve bunlar TPV hücresi üzerine uygulanabilmektedir. Bunlara ek olarak 2D ve 3D fotonik kristal filtreler henüz araştırma aşamasındadır ve uygulaması pahalıdır [7, 9, 79-81].

Resim 5.3'te iç yüzeyinde kızılötesi yansıtıcı olan kalay oksit (SnO_2) kaplamalı kuvars tüp bir filtre gösterilmektedir [82].



Resim 5.3. İç yüzeyinde kızılötesi yansıtıcı olan SnO_2 kaplamalı kuvars tüp

5.1.4. Termofotovoltaik hücreler

TPV hücreleri, ısı kaynağından gelen ışınımı elektrik enerjisine dönüştüren malzemelerdir. Elektrik çıkış gücünün ısı giriş gücüne bölünmesi TPV sisteminin verimi olarak tanımlanmaktadır. TPV sisteminin veriminin yüksek olması için yayılan ışınımın TPV hücresinin kuantum verimi ile spektral olarak eşleşmesi gerekmektedir. Bu, seçici bir ışınım kaynağı ve düşük bir bant aralığına sahip yarı iletken bir malzeme kullanarak başarılabilmektedir [82].

Termofotovoltaik hücreler ile ilgili bilinmesi gereken bazı hususlar aşağıda verilmektedir.

I. TPV hücre bant aralığı ve seçici yayıcı yayıcılığının uygunluğu

Wien'in Yer Değiştirme Kanunu kullanılarak karacisim ışınımının basit bir hesaplaması, 1800 K' de karacisim yayıcısı için ışınım zirvesinin yaklaşık 1610 nm' de bulunduğunu, aksine güneş ışınımının yaklaşık 525 nm' de zirveye ulaştığını göstermektedir. Bu açıklamaya göre eğer aynı sıcaklıkta, kayda değer bir şekilde değişen bir ışınım spektrumu sağlayacak olan özel olarak tasarlanmış seçici yayıcılar karacisim yayıcısıyla karşılaştırıldığında, 1120 nm' lik bir bant aralığına sahip Si gibi geleneksel hücreler, TPV sistemlerinde kullanım için uygun olabilmektedir. Gelişmiş optik özelliklere sahip sağlam yayıcıların üretimi oldukça karmaşık ve pahalı olabilmektedir. Bu nedenle, TPV hücrelerin bant aralığı üzerindeki fotonların oranını arttırmak için kullanılan başka bir yöntem, GaSb veya InGaAsSb gibi daha düşük bant aralıklı fotovoltaik hücreleri kullanmaktır [7].

II. Yayıcılığın en yüksek olduğu foton enerjileri aralığındaki minimum yansıma oranı

TPV hücreleri, hem yayıcılığın en yüksek olduğu enerji aralığı üzerinde mümkün olan en yüksek dış kuantum verimini (EQE) sağlamalıdır hem de foton enerjilerinin bu aralığında en az yansıma oranına sahip olmalıdır [7].

III. Yüksek ışınım yoğunluklarında uygun yüksek doluluk oranı

Yayıcı yüzeyinde ≈50W/cm² kadar yüksek ışınım yoğunluğuna sahip ve TPV hücrelerin yayıcıya çok yakın olan yanma TPV sistemleri için, TPV hücrelerde ışıma yoğunluğu güneş ışınımına bağlı olarak 5-100 kat daha yüksek olabilmektedir. Bu kadar yoğunlaştırılmış durumlar altında ve dolayısıyla yüksek akım yoğunluklarının varlığında hücrelerin, uygun yüksek doluluk oranını muhafaza etmesi için yeterince küçük bir seri dirence sahip olmaları gerekmektedir. Aksi halde, bu hücrelerde verim düşüklüğü olmaktadır [7].

IV. TPV hücrelerinin etkin soğutulması için en uygun duruma getirilmiş alt tabaka biçimi

TPV sistemlerinde hücrelerin etkili şekilde soğutulması, hücre verimindeki düşüşü önlemek için önemlidir. Bu nedenle, yüksek ısıl iletkenliğe sahip bir alt tabaka/üst katman kullanmak gerekmektedir. Buna ek olarak eğer hücreler seri halde bağlanacaksa parça alt tabakasında ayrıca yalıtkan bir malzeme olmalıdır [7].

TPV sistemlerinde kullanılan yarı iletken malzemeler aşağıda açıklanmaktadır.

Silisyum (Si)

Yaklaşık 1,1 eV bant aralık enerjisine sahip olan silisyum, aynı ışınımı sağlayan iyi tasarlanmış seçici yayıcılarla birleştirilirse TPV sistemlerinde uygun bir şekilde kullanılabilmektedir. Bununla birlikte örneğin Yb_2O_3 yayıcılar ile silisyumu eşleştirerek %20'lik spektral verim ve bu silisyum hücrelerinin kullanımı ile %1-2'lik bir TPV sistem verimi elde edilebilmektedir. Silisyum hücrelerinin olumlu yönleri; GaSb gibi düşük bant aralığına sahip hücrelere kıyasla oldukça ucuz maliyetli olmaları ve ticari olarak büyük miktarlarda bulunabilmeleridir. Ayrıca GaSb veya bileşik yarı iletken malzemelerden olan bakır, indiyum, galyum ve selenyum hücrelerinin birleştirilmesinden oluşan CIGS hücrelerinin aksine silisyum, zehirleyici olmayan bir malzemedir. TPV sistemlerinde bu çok önemlidir. Çünkü TPV sistemlerinde kullanılan hücreler, genellikle yakıcı-yayıcı sisteme oldukça yakın konumlandırılmaktadır ve soğutma sisteminin arızalanması durumunda hücreler yüksek sıcaklıklarda ısıtılırsa zehirli maddelerin salınmayacağından emin olmak gerekmektedir [7, 9, 14, 83].

Germanyum (Ge)

0,66 eV bant aralık enerjisine sahip olan germanyum, TPV sistemlerinde uygulanması için araştırılan diğer bir yarı iletken malzemedir. Germanyumun 0,66 eV' luk bant aralık enerjisi, 1540 K sıcaklıktaki karacisim yayıcısının en yüksek ışınımına denk gelmektedir. Dolayısıyla Ge, yayıcı sıcaklığının genellikle 1800 K sıcaklık değerinden daha az olan TPV sistemlerinde kullanılabilir. Ayrıca Er_2O_3 yayıcısıyla eşleştirildiğinde Ge hücresi, Si hücresi ile Yb_2O_3 yayıcısının eşleştirilmesiyle elde edilecek spektral verimden daha yüksek spektral verim verebilmektedir. Ancak Ge hücrelerinin verimi Si ve GaSb hücrelerin veriminden çok daha düşüktür [7, 9, 14].

Silisyum germanyum (SiGe)

Bu ikili bileşik, Ge içeriğinin bir fonksiyonu olarak bant aralığının ayarlanmasına, dolayısıyla seçici yayıcı ile daha iyi uyum sağlamaya olanak sağlamaktadır [14]. SiGe, TPV sistemlerinde kullanılan yayıcı ile spektral olarak eşleştirilirse, TPV sistemlerinde umut

verici bir malzeme olarak kullanılabilmektedir. Bu ikili bileşik farklı şekillerde üretilebilmektedir. Bunlardan birincisi, Ge alt tabaka üzerine SiGe epitaksiyel olarak büyütülmesidir. Diğer bir yöntem ise çok kristalli SiGe, külçeler halinde üretilmekte ve daha sonra bu külçeler incecik olarak kesilmektedir. Ancak not edilmelidir ki bu SiGe hücrelerinin TPV sistemlerinde uygulanıp uygulanamayacağı araştırma aşamasındadır [84].

Galyum antimonid (GaSb)

Galyum antimonid 0,72 eV bant aralık enerjisine sahiptir. Işınım yoğunluğu yüksek olan işlemlerde kullanılması uygun olan bu hücrelerin TPV sistemlerinde kullanımı da uygundur. GaSb hücreleri, çinko buhar difüzyon teknolojisi veya epitaksiyel yöntemlerle üretilirler. Ancak galyum antimonid çok yüksek maliyete sahip olması ve yüksek sıcaklıklarda yapısının bozulması nedeniyle zehirli madde yayması, olumsuz yönleri arasındadır. Bu olumsuz yanlarının olmasına karşın bu hücreler, TPV sistemlerinin ilk örneklerinde çoğunlukla kullanılmıştır [7, 14].

Galyum arsenür (GaAs)

GaAs hücreleri uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. Çünkü ışınım hasarına karşı dayanıklıdır. Daha yüksek ışık emiciliğinden ve anlık ışığın çoğunluğunu emmek için sadece birkaç mikron malzemeye ihtiyaç duyduğundan silisyuma karşı bazı olumlu yönleri vardır. Ayrıca GaAs üçlü veya dörtlü bileşiklerde mükemmel esnekliğe sahiptir. Galyum arsenür' ün en büyük olumsuz yönlerinden bir tanesi yüksek maliyete sahip olmasıdır. GaAs bant aralığı 1,43 eV' tur ve bundan dolayı GaAs' ü görünür spektrumda kızılötesine göre çok daha kullanışlı olmasını sağlamaktadır [14].

İndiyum fosfit (InP) ve indiyum arsenür (InAs)

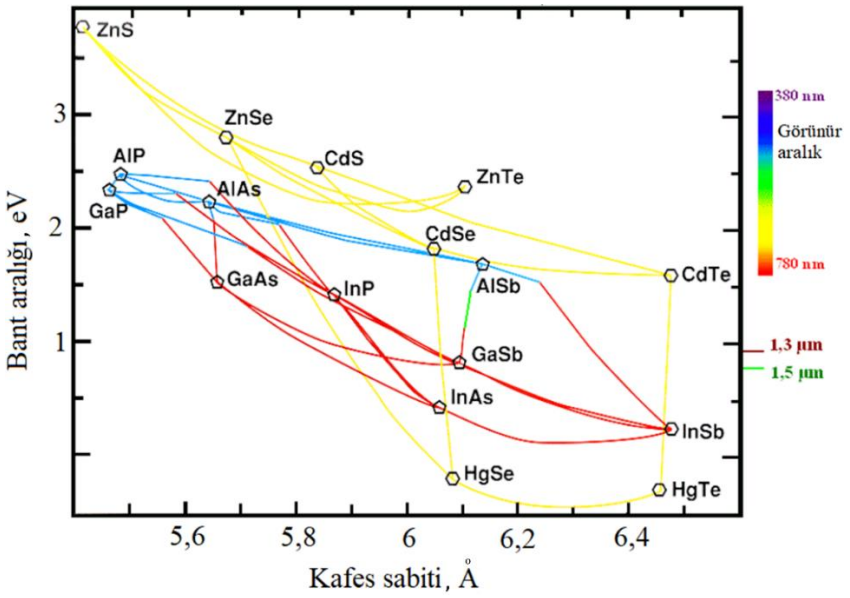
İndiyum fosfit (InP) 1,34 eV, indiyum arsenür (InAs) 0,36 eV bant aralık enerjisine ve bu iki yarı iletken malzeme yüksek bir elektron hareketliliğine sahiptir. Ayrıca bazı üçlü ve dörtlü bileşik yarı iletken malzemelerde de kullanılmaktadır. InP, GaAs' den daha çok ışınım direncine sahiptir, ancak pahalı bir yarı iletken malzemedir. InAs, kızılötesi cihazlar için çok uygundur ve kızılötesi foto detektörlerde kullanılmaktadır [14].

Üçlü ve dörtlü yarı iletkenler

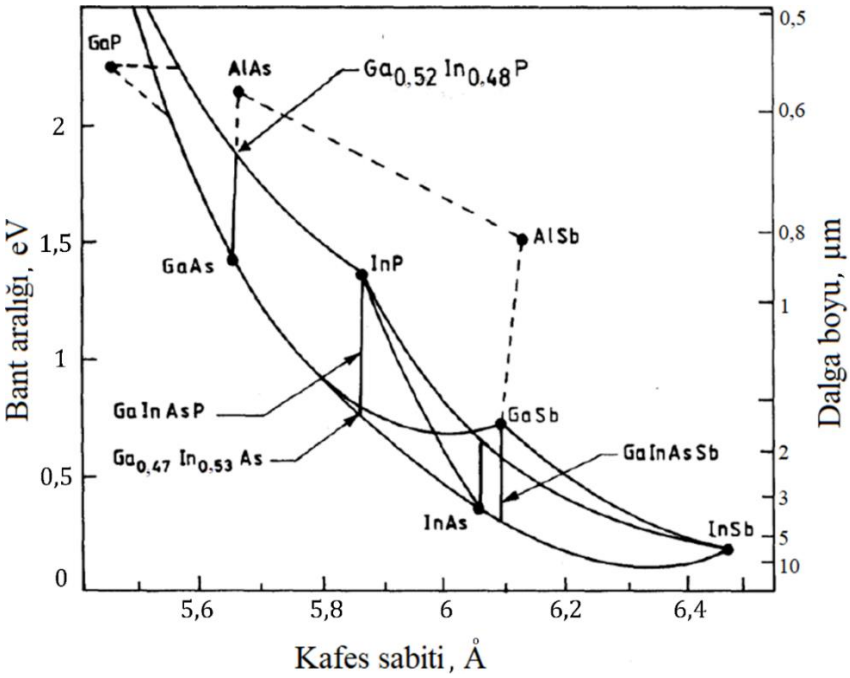
Üçlü ve dörtlü yarı iletken malzemeler güneş uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bu malzemeler, içeriğinde galyum yoksa CIS [bakır (Cu), indiyum (In) ve selenyum (Se)], içeriğinde galyum varsa CIGS ($CuInGaSe_2$) [bakır (Cu), indiyum (In), galyum (Ga) ve selenyum (Se)] diye adlandırılmaktadır. CIS ve CIGS malzemelerin bant aralığı 1-1,7 eV aralığında değişmektedir. CIGS hücreleri, silisyum hücreleri gibi benzer verimle Yb_2O_3 yayıcısı ile kullanılabilmektedirler [9].

TPV sistemlerine uygulanması için araştırılan diğer hücreler InGaAsSb, AlGaAsSb, InAsSb, InGaSb, InGaAs ve InAsSbP'u kapsamaktadır. Bu hücreler çoğunlukla, epitaksiyel yöntemlerle imal edilmektedirler, çünkü alaşımların birleştirilmeleri esnasında dikkatli olmak gerekmektedir. InAsSb, InAsSbP, InGaAsSb ve $In_{0,53}Ga_{0,47}As$'de sırasıyla kullanılan alt tabakalar GaSb, InAs, InAs veya GaSb, InP' tir. Bu bileşiklerin bant aralık enerjileri sırasıyla ile 0,29 eV, 0,35-0,5 eV, 0,3-0,6 eV, 0,74 eV' tur [7, 9, 14].

Şekil 5.10'da TPV uygulamaları için ikili, şekil 5.11'de üçlü ve dörtlü bazı yarı iletken malzemelerin kafes sabiti ile bant aralık ilişkisi verilmektedir. Farklı yarı iletken malzemeleri kıyaslarken kafes sabiti ile bant aralık ilişkisini kullanmak yararlı olmaktadır. Şekil 5.10 kullanılarak farklı malzemelerin ışınımının hangi dalga boylarının elektriğe dönüşebildiği ve hangi malzemelerin aynı kafes sabitine sahip olduğu bulunabilmektedir [14].

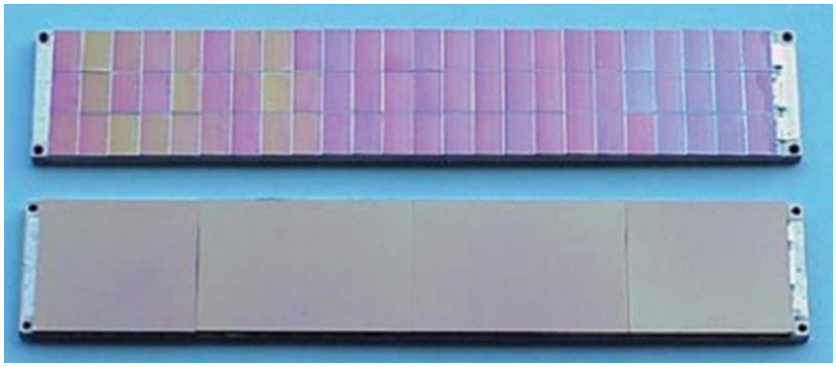


Şekil 5.10. İkili bazı yarı iletken malzemelerin kafes sabiti ile bant aralık ilişkisi



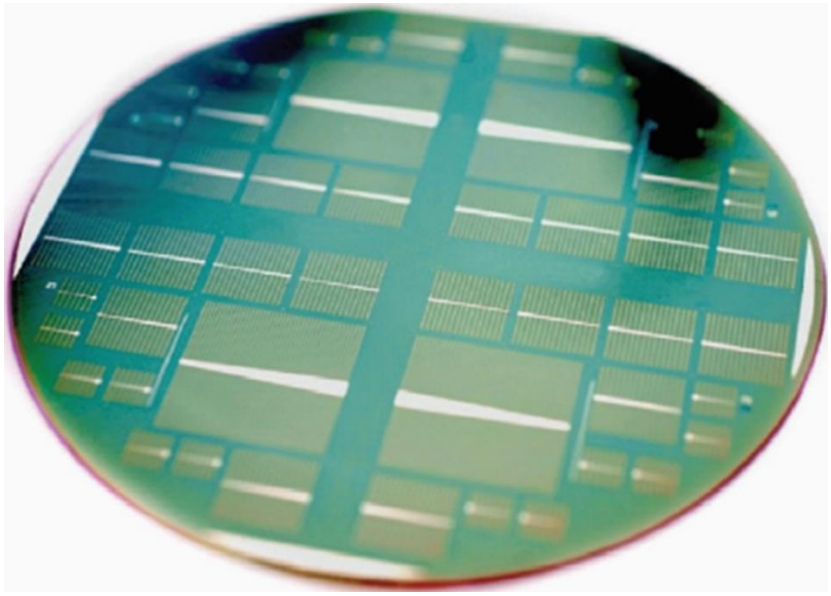
Şekil 5.11. Üçlü ve dörtlü bazı yarı iletken malzemelerin kafes sabiti ile bant aralık ilişkisi

Resim 5.4'te 5 cm x 26 cm ölçülerinde GaSb fotovoltaik bir hücrenin ön ve arka resmi gösterilmektedir [8].



Resim 5.4. GaSb fotovoltaik hücre

Resim 5.5'te özel olarak tasarlanmış ön yüzey yapısına sahip germanyum hücresinin alt tabaka resmi gösterilmektedir. Bu alt tabaka üzerine hücreler uydurularak, TPV hücresinin maliyetinin azaltılması amaçlanmaktadır [8].

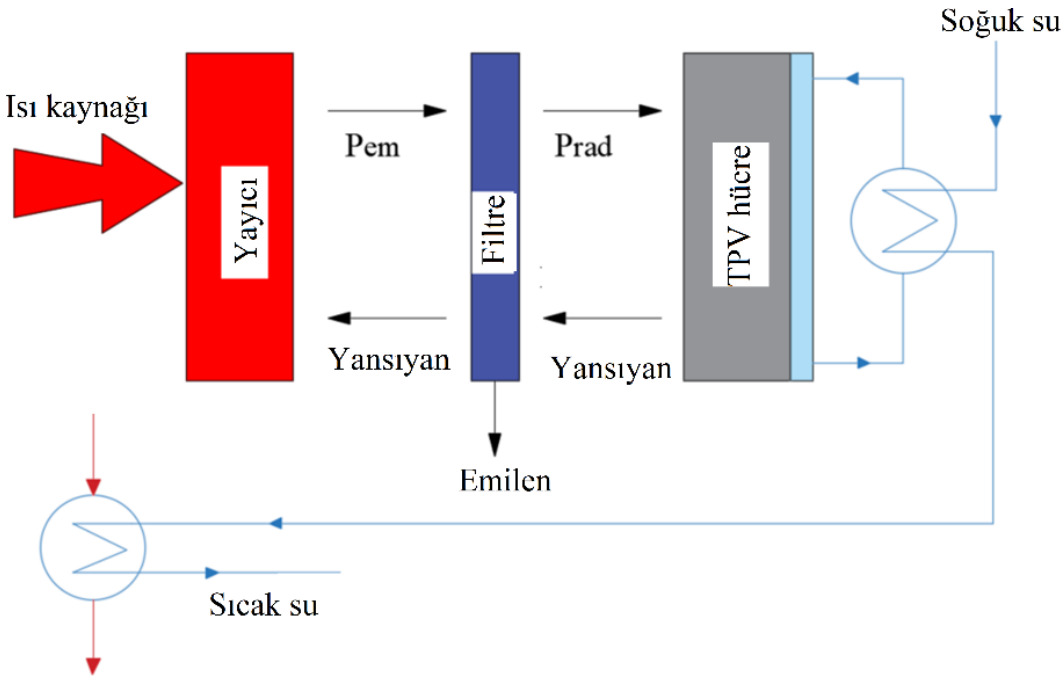


Resim 5.5. Germanyum alt tabaka

5.2. Termofotovoltaik Sistemdeki Hücrelerin Uygun Çalışma Sıcaklığı ve Soğutulması

TPV sistemi çalışır durumda iken yansıtılamayan veya elektrik çıkış gücüne dönüştürülemeyen ışınımın bir kısmı TPV hücreleri tarafından ısı olarak soğurulmaktadır. Sistemin güvenliği ve verimi için bu ısının hücrelerden uzaklaştırılması gerekmektedir [85, 86]. Bu çalışmada TPV hücresinin verim düşüşünü ve ısıl gerilmeleri önlemek için hücre sıcaklığı 475 K'in (yaklaşık olarak 200 °C) altında tutulmaktadır. Hücrelerin soğutulması

için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Hücrelerin soğutulması için bir yöntem şekil 5.12'de gösterilmektedir [6].



Şekil 5.12. TPV hücresinin soğutulması

Ancak, bu soğutma sisteminin kombilerde kullanılması uygun değildir. Çünkü harici bir kaynaktan sürekli soğutma suyu kullanılması ve sistemi uygulamak için mevcut kombilerin yapısının değiştirilmesi gerekeceğinden dolayı bu soğutma sisteminin kombilerde uygulanması ekonomik olmayacaktır. Bölüm 6.2'de bu çalışmada kullanılan kombideki TPV sistemine uygulanan soğutma sistemi ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır.

TPV hücresinin ısısını düşürmek için hücre ile hücrenin temas ettiği alt tabaka arasında iyi bir ısıl temas uygulamak ve hücrelerin seri bağlantısını sağlamak gerekmektedir. Bundan dolayı hücrenin temas ettiği alt tabaka hem yüksek ısıl iletkenliğe sahip hem de hücre geri kontaklarının kısa devre yapmasını önlemek için elektriksel olarak yalıtıcı olması gerekmektedir. Ayrıca bu alt tabaka, mekanik gerilimi önlemek için hücreninkine yakın ısıl genleşme katsayısına da sahip olmalıdır. Alüminyum nitrür (AlN) ve berilyum oksit (BeO), ısı iletim katsayıları sırasıyla 140 W/(m.K) ve 250 W/(m.K), TPV sistemlerinde alt tabaka olarak kullanılmaktadır [85]. Bu çalışmada alt tabak olarak yüksek ısıl iletkenliğinden dolayı berilyum oksit tercih edilmiştir.

Yukarıda belirtildiği gibi TPV hücresinde üretilen ısı hücreden uzaklaştırılmalıdır. Hücrenin ısınmasına neden olan alt bant aralık ışınımı hücre tarafından emilirse ısı kaynağının sıcaklığı 1000 K'in üzerine çıkması durumunda hücre sıcaklığı önemli ölçüde artmaya başlamaktadır. Özellikle ısı kaynağının sıcaklığı 2000 K'i aşması durumunda hücre sıcaklığı 1000 K'i geçmektedir. Böyle bir sıcaklıkta gerçek bir hücrenin bu tür bir ısıl gerilimle başa çıkması zordur [87].

5.3. Termofotovoltaik Sistemin Elektriksel Verimi ve Tüm Sistemin Verimi

TPV sisteminin elektriksel verimliliği Eş. 5.1'de verilmektedir [6, 88].

$$\eta_{\mathrm{EL,TPV}} = \eta_{\mathrm{CC}} \cdot \eta_{\mathrm{RAD}} \cdot \eta_{\mathrm{GAP}} \cdot \eta_{\mathrm{F}} \cdot \eta_{\mathrm{VF}} \cdot \eta_{\mathrm{PV}} \cdot \eta_{\mathrm{DC/AC}} \tag{5.1}$$

Burada $\eta_{\mathrm{EL,TPV}}$ TPV sisteminin elektriksel, η_{CC} yanma, η_{RAD} ışınım, η_{GAP} spektral, η_{F} filtre, η_{VF} görüş faktörü, η_{PV} hücre ve $\eta_{\mathrm{DC/AC}}$ dönüştürücü verimini ifade etmektedir.

Yanma verimi, yanma sonucu yararlanılan ısıl değerin toplam ısıl değere oranı olarak ifade edilmektedir ve Eş. 5.2'de verilmektedir [6].

$$\eta_{\mathrm{CC}} = \frac{P_{yakıt}}{\dot{m}_{yakıt} \cdot LHV} \tag{5.2}$$

Burada $P_{yakıt}$ yararlanılan ısıl güç (kW), $\dot{m}_{yakıt}$ yakıtın debisi (kg/h) ve LHV yakıtın alt ısıl değeridir (kWh).

Işınım verimi, yayıcıdan gelen ışınım gücü ile sistemden yararlanılan güç arasındaki orandır ve Eş. 5.3'te verilmektedir [6].

$$\eta_{\mathrm{RAD}} = \frac{P_{RAD}}{P_{yakıt}} = \frac{p_{RAD} \cdot S_{em}}{\eta_{\mathrm{CC}} \cdot \dot{m}_{yakıt} \cdot LHV} \tag{5.3}$$

Burada P_{RAD} yayıcıdan gelen ışınım gücü (W), p_{RAD} birim alan başına güç yoğunluğu (W/m^2) ve S_{em} yayıcı yüzey alanıdır (m^2).

Spektral verim, yayıcıdan gelen toplam ışınım ile bu ışınımın filtreden geçen kısım arasındaki orandır ve Eş. 5.4'te verilmektedir [6].

$$\eta_{\mathrm{GAP}} = \frac{P'_{GAP}}{P_{RAD}} \tag{5.4}$$

Burada P'_{GAP} filtreden geçen ışınım (W) ve P_{RAD} yayıcıdan gelen toplam ışınımdır (W).

Filtre verimi, iyi tasarlanmış bir filtre ile 1 olarak alınmaktadır [6].

Görüş faktör verimi, TPV hücre üzerine gelen ışınımın yayıcıdan gelen ışınıma oranıdır ve Eş. 5.5'te verilmektedir [6].

$$\eta_{\mathrm{VF}} = \frac{P_U}{P_{GAP}} \tag{5.5}$$

Burada P_U TPV hücresi üzerine gelen ışınım (W) ve P_{GAP} yayıcıdan gelen ışınımdır (W).

TPV hücre verimi, elektrik güç çıkışı ($P_{el,dc}$) (W) ile TPV hücresi üzerine gelen ışınım arasındaki orandır ve Eş. 5.6'da verilmektedir. TPV hücresi tarafından üretilen en yüksek elektrik gücü, kısa devre akımı (J_{SC}) (A) ile açık devre gerilimi (V_{OC}) (V) ve doluluk faktörü (FF) olarak ifade edilmektedir [6,14].

$$\eta_{PV} = \frac{P_{el,DC}}{P_U} = \frac{V_{OC} \cdot J_{SC} \cdot FF}{P_U} \tag{5.6}$$

Dönüştürücü verimi, sistemin nihai elektrik çıkışının hesaplanmasını sağlamaktadır. Dönüştürücü verimi, doğru akım elektrik çıkış gücünün alternatif akım elektrik çıkış gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır ve Eş. 5.7'de verilmektedir [6,14].

$$\eta_{\mathrm{DC/AC}} = \frac{P_{el,DC}}{P_{el,AC}} \tag{5.7}$$

Burada $P_{el,DC}$ doğru akım elektrik çıkış gücü (W) ve $P_{el,AC}$ alternatif akım çıkış gücüdür (W).

TPV sisteminin verimini tanımlamak karmaşık bir olgudur. Çünkü yararlı çıkış ve toplam giriş olarak verimin genel bir tanımı, TPV sistemi için belirsizdir. Toplam giriş, ısı kaynağına bağlı olarak farklı şekillerde ve yararlı çıkış ise elektrik çıkış gücü olarak

tanımlanmaktadır. Kısacası TPV sisteminin verimi, sistem sınırlarının nasıl tanımlandığına bağlıdır [24].

Çalışmada kullanılan model için TPV sisteminin verimi (η_{sys}), TPV hücresi tarafından üretilen elektrik güç yoğunluğunun yayıcıdan yayılan güç akısına oranı olarak tanımlanabilir ve Eş. 5.8'de verilmektedir [89].

$$\eta_{\mathrm{sys}} = \frac{P_{el,net}}{P_{_emit}} \tag{5.8}$$

Burada $P_{el,net}$ TPV hücresi tarafından üretilen elektrik güç yoğunluğunu (W/m^2), $P_{_emit}$ yayıcıdan yayılan güç akısını (W/m^2) ifade etmektedir.

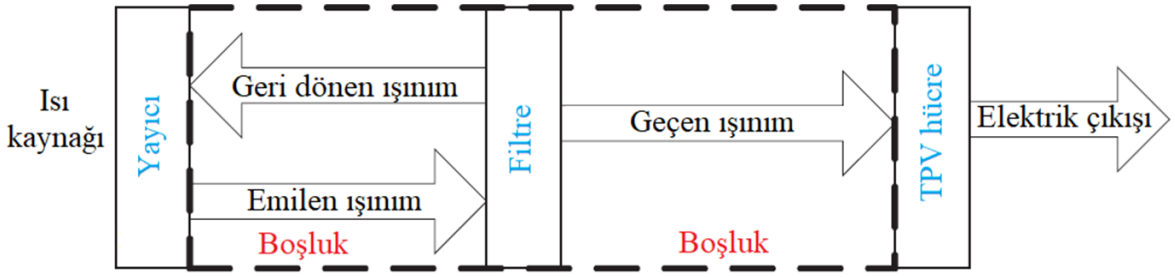
5.4. Termofotovoltaik Sistemdeki Elemanların Boşluk Düzenlemeleri

Filtrenin termofotovoltaik sistemdeki konumu önemlidir. Eğer filtre yayıcıya çok yakın konumlandırılırsa, filtre aşırı ısınacaktır. Bu nedenle filtreyi önce TPV hücresine daha yakın konumlandırmak uygun olacaktır. Ancak kuvars camdan yapılmış bir filtre, TPV sistemlerinde istenen bir yere konumlandırılabilmektedir. Çünkü kuvars cam TPV sistemlerinde meydana gelen sıcaklıklara dayanabilmektedir [68, 90].

Yayıcıdan TPV hücresine boşluktan iletim ve taşınımla olan ısı transferi istenmeyen bir durumdur. Bundan dolayı iletim ve taşınımla olan ısı transferi en aza indirilmesi önemlidir. TPV sistemlerinde verimin ve elektrik çıkış gücünün yüksek bir değere ulaşabilmesi için boşluktaki ışınımla olan ısı transferi, mekânsal, spektral ve açısal ışınım dağılımları en uygun hale getirilmesi gerekmektedir [90].

Yukarıda verilen bilgiler dikkate alındığında TPV sisteminin veriminin ve elektrik çıkış gücünün en uygun duruma getirilmesi isteniyorsa, TPV sistem elemanlarının boyutlarının ve bu elemanların birbiri ile olan mesafelerinin (boşluklarının) en uygun duruma getirilmesi gerekmektedir.

Şekil 5.13'te termofotovoltaik bir sistemin yayıcı ve hücre mesafesinin (boşluk) ayarlanması gösterilmektedir [90].



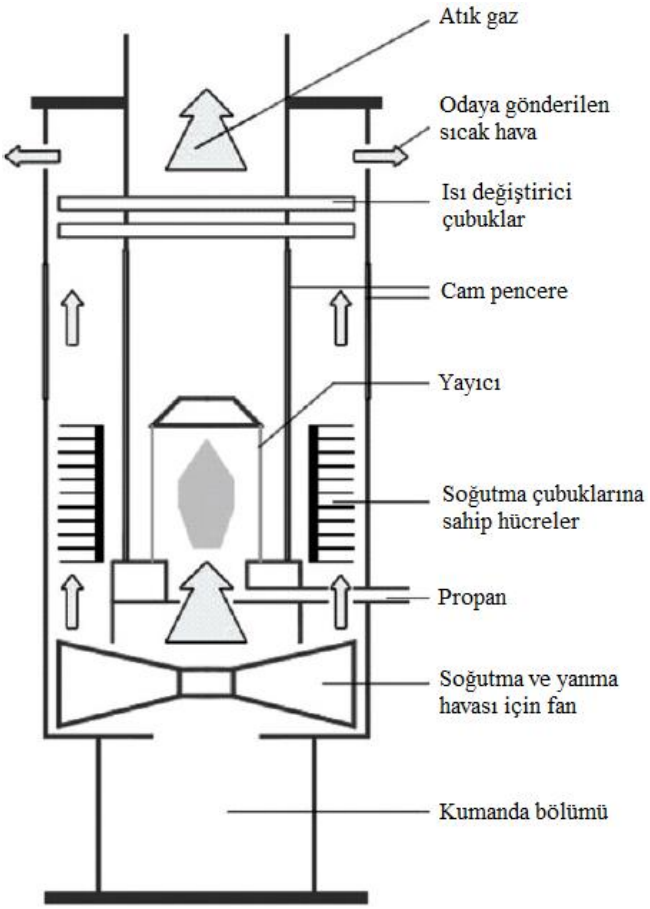
Şekil 5.13. Termofotovoltaik sistemin yayıcı ve hücre mesafesinin (boşluk) ayarlanması (kesik çizgi TPV sistem elemanlarının birbirlerine olan mesafelerini belirtmektedir)

5.5. Termofotovoltaik Sistemin İlk Örnekleri

Yazılı kaynaklarda, TPV sistemi örnekleri bulunmaktadır. *Midnight Sun, JX Crystals* tarafından geliştirilen ilk ticari TPV sistemidir ve 1999'da piyasaya sürülmüştür. Midnight Sun, GaSb TPV hücrelerini kullanan propan yakıtlı bir TPV kapalı ocaktır. Resim 5.6'da sobanın resmi ve şekil 5.14'te sobanın şematik çizimi gösterilmektedir [8].

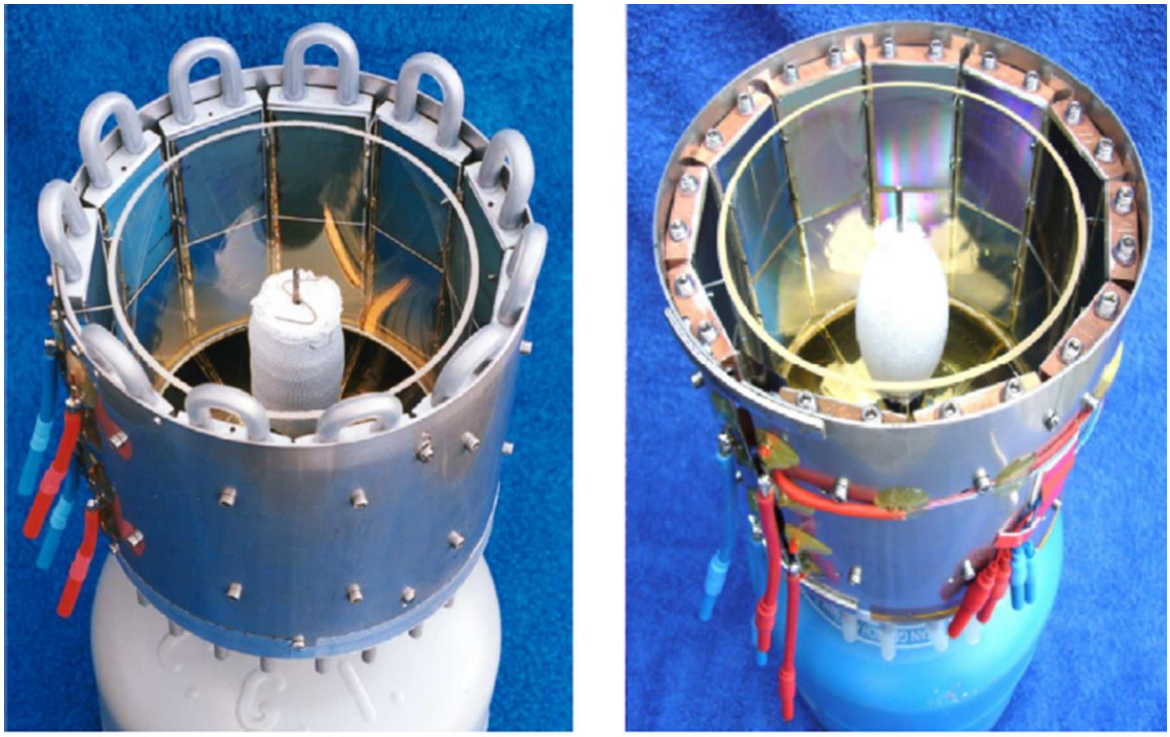


Resim 5.6. JX Crystals tarafından geliştirilen ilk ticari TPV sistemi



Şekil 5.14. JX Crystals tarafından geliştirilen ilk ticari TPV sistemin şematik çizimi

Diğer bir TPV örneği *Paul Scherrer Enstitü*' sü tarafından üretilmiştir. Resim 5.7'de Paul Scherrer Enstitüsü tarafından üretilen TPV sistemi gösterilmektedir. Resim 5.7 (a)'da 56 W elektrik çıkış gücüne ve resim 5.7 (b)'de 50 W elektrik çıkış gücüne sahip TPV sistemi gösterilmektedir [7].



(a) (b)

Resim 5.7. Paul Scherrer Enstitüsü tarafından üretilen TPV sistemi: (a) 56 W elektrik çıkış gücüne sahip TPV sistemi, (b) 50 W elektrik çıkış gücüne sahip TPV sistemi

6. SAYISAL ÇALIŞMA

6.1. Kullanılan Yazılımlar

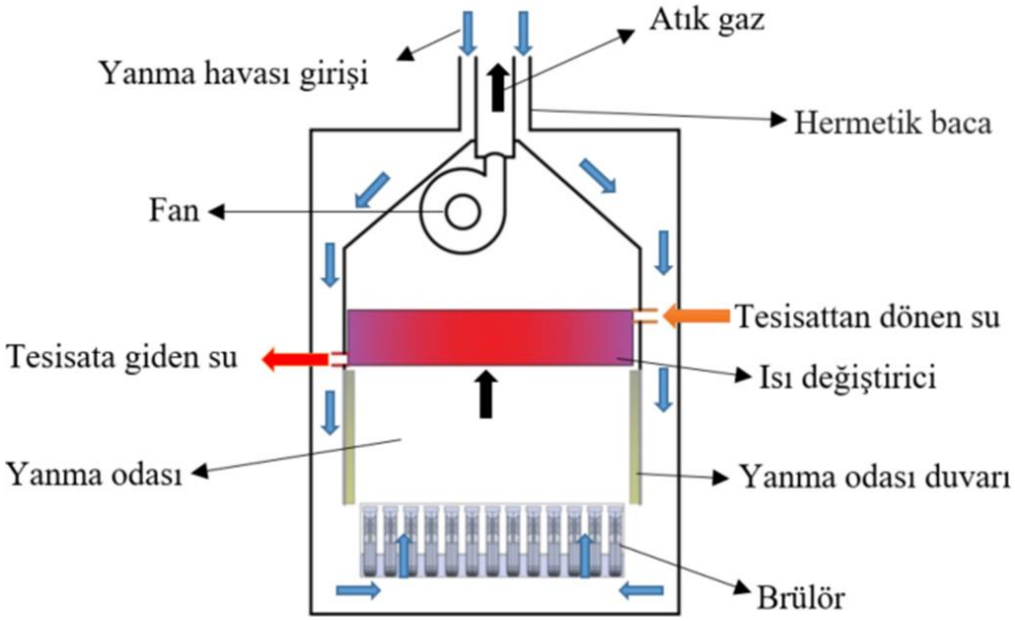
Bu çalışmada *SolidWorks 2018* ve *Comsol Multiphysics 5.4* yazılımları tercih edilmiştir. Yanma odasının modellenmesinde *SolidWorks* ve sayısal modelin çözümlenmesinde *Comsol Multiphysics* yazılımları kullanılmıştır.

SolidWorks bir CAD yazılımıdır. Bu yazılım ürün geliştiren, maliyetleri düşüren, kaliteyi artıran bir yazılımdır. Ayrıca yazılım animasyonlara, elektrikli ürün tasarımlarına ve CAD modellerinin sanal olarak test edilmesine olanak sağlamaktadır [91].

Comsol Multiphysics, her türlü bilimsel ve mühendislik sorunlarını modellemek ve çözmek için kullanılan bir yazılımdır. *Comsol Multiphysics*, geleneksel fizik modellerini ve birleştirilmiş fizik olaylarını çözebilmektedir. Bu yazılımda yerleşik fizik arabirimleri ve malzeme özellikleri için gelişmiş desteği kullanarak, temel eşitlikleri tanımlamak yerine ilgili fiziksel miktarları tanımlayarak modeller oluşturmak mümkündür. Malzeme özellikleri gibi değişkenler, ifadeler veya sayılar, doğrudan katı ve sıvı alanlara, sınırlara, kenarlara ve noktalara uygulanabilmektedir. Comsol daha sonra tüm modeli temsil eden bir dizi eşitlik oluşturmaktadır. Modelleri çözerken Comsol, sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. Yazılım sonlu eleman analizini, uyarlanabilir ağlamayı (adaptive meshing) ve çeşitli sayısal çözücüleri kullanarak hata kontrolü ile birlikte gerçekleştirmektedir. Comsol geometri, ağ (mesh), çalışma-çözücü ayarları ile görselleştirme ve sonuçları kaydetme gibi birçok kademe oluşturmaktadır [92].

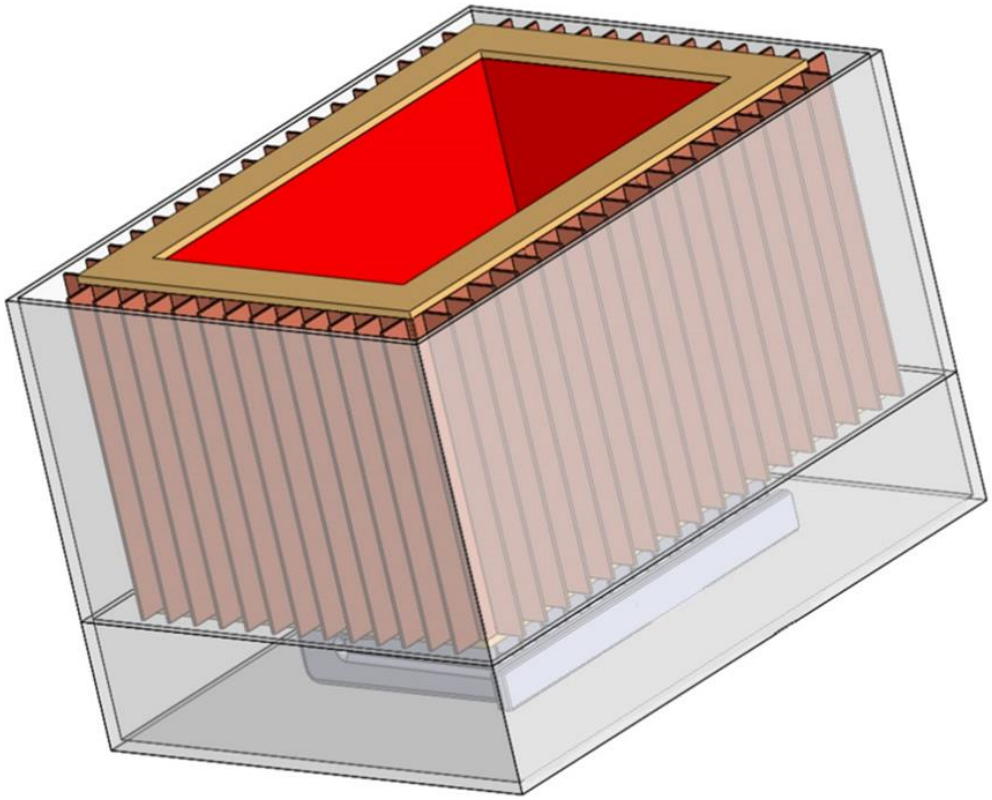
6.2. Geometrik Model ve Hücrelerin Soğutulması

Piyasada birçok gaz yakıtlı kombi ürünü vardır ve bu ürünler farklı ısı gücünde tasarlanmakta ve üretilmektedir. Mevcut kombilerde, yanma odaları silindir veya dikdörtgen prizma olarak tasarlanmaktadır. Şekil 6.1'de çalışmada kullanılan kombinin ayrıntılı çizimi gösterilmektedir. Bu çalışmada örnek olarak kullanılan kombi *Eca Confeo Plus Dco 24 Hm*'dir ve bu kombinin boyutları 750 mm x 454 mm x 340 mm'dir.

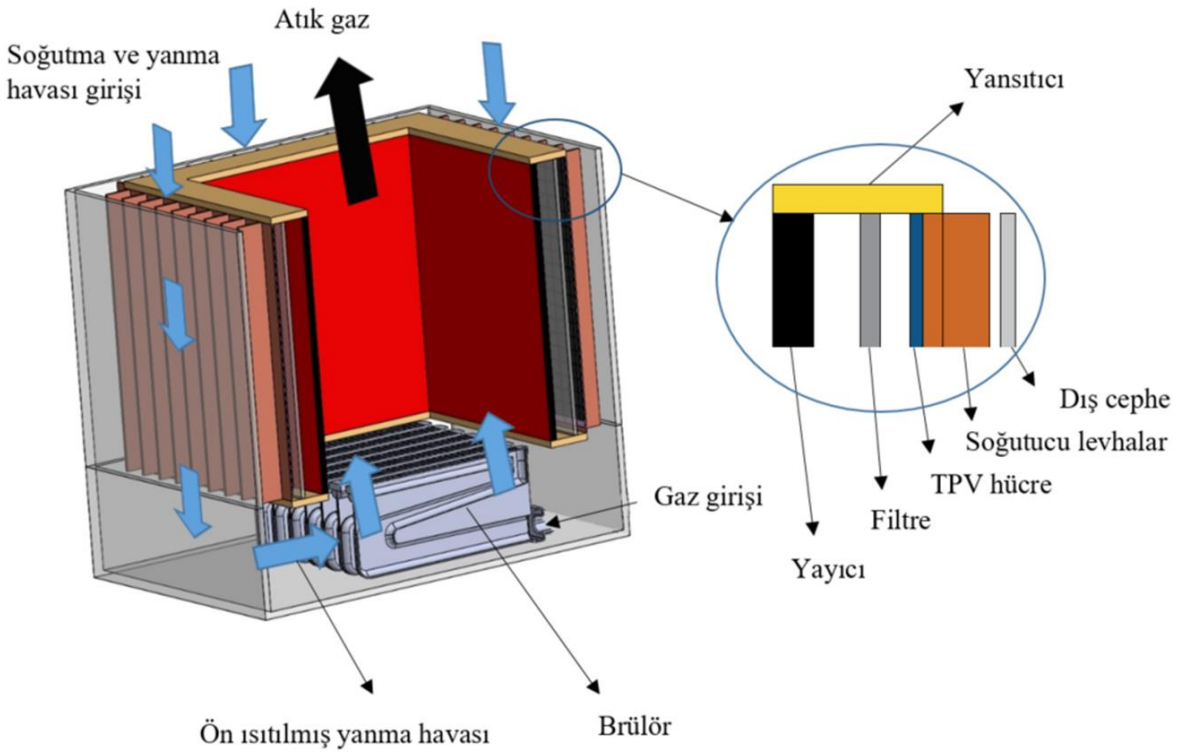


Şekil 6.1. Eca Confeo Plus Dco 24 Hm kombinin çizimi

Çalışmada kullanılan kombinin yanma odası dikdörtgen prizma biçimindedir. Yanma odasının boyutları 294 mm x 192 mm x 200 mm'dir. TPV sistemi, bu boyutlardaki yanma odasına herhangi bir değişiklik yapmadan boyutları en uygun duruma getirilerek dâhil edilebilir. Yanma odasına yerleştirilmiş TPV sisteminin çizimi şekil 6.2'de ve bu sistemin bileşenlerinin ayrıntılarının çizimi şekil 6.3'te gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Eca Confeo Plus Dco 24 Hm kombiye dâhil edilmiş TPV sistemi



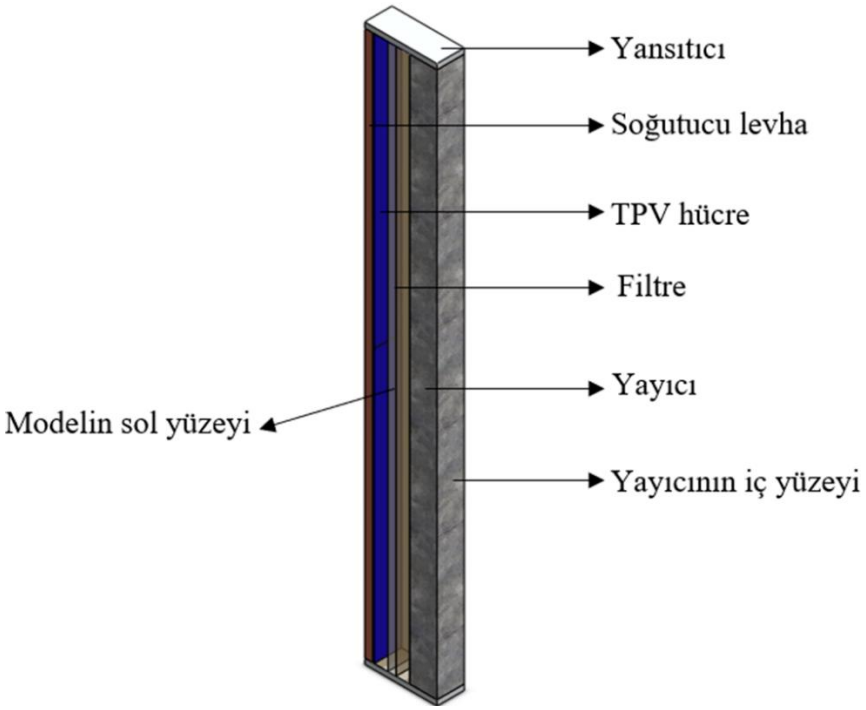
Şekil 6.3. Eca Confeo Plus Dco 24 Hm kombiye dâhil edilmiş TPV sisteminin bileşenleri

TPV sistemi tarafından ne kadar elektrik güç yoğunluğu üretilebileceğini ve TPV sisteminin verimini hesaplamak için bu sistemde kullanılan yayıcı, filtre, TPV hücresi, soğutma plakası (levha) ve yansıtıcı sırasıyla, silisyum karbür (SiC), kuvars cam (SiO_2), silisyum (Si), berilyum oksit (BeO) ve alüminyum oksittir (Al_2O_3). Ayrıca yanma odasına uygulanan TPV sisteminin üst ve alt kısımlarına bir yansıtıcı yerleştirilmektedir. Çünkü yayıcı, filtre ve TPV hücresi arasındaki görüş faktöründen dolayı yansıtıcıların kullanılması daha fazla elektrik güç yoğunluğu üretimi için yararlı olabilmektedir [93].

Şekil 6.2'de ve şekil 6.3'te gösterildiği gibi TPV hücresini soğutmak amacıyla kombiye uygulanan TPV sistemi için bir soğutma sistemi tasarlanmıştır. Hücreler, berilyum oksit levhalar üzerine yerleştirilmekte ve bu levhaların dışına belirli boyutlarda ve mesafelerde kanatçıklar konumlandırılmaktadır. Hermetik bacadan kombiye alınan yanma havası bu berilyum oksit kanatçıklardan geçtiğinde, ısı havaya aktarılmakta ve hücreler soğumaktadır. Bu şekilde sıcaklığı yükselen hava, brülörün alt kısmından yanma odasına gönderilmekte ve böylece yanma işlemi, havanın yakıtla karışmasıyla gerçekleştirilmektedir. Yanma odasına girmeden önce havanın sıcaklığındaki artış, aynı zamanda alevin sıcaklığını da artırmaktadır [94]. Sonuç olarak, yüksek alev sıcaklığı TPV hücreleri tarafından daha yüksek elektrik güç yoğunluğu üretilebileceği anlamına gelmektedir [95].

Yukarıda belirtilen soğutma sisteminin dışında, TPV hücrelerinin sıcaklık artışını önlemek için farklı soğutma yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemlerden birincisi, çalışmada kullanılan filtreden (SiO_2) daha seçici filtreler kullanmaktır. İkincisi ise filtre ile TPV hücresi veya yayıcı ile TPV hücresi arasındaki mesafeyi en uygun duruma getirmektir. Bu yöntemin kullanılması, TPV hücrelerinin sıcaklık artışını önlemek için yararlı olabilmektedir [5, 7, 9].

Hesaplama yükünü azaltmak için sayısal modellemede kullanılmak üzere modellenen TPV sisteminin, 1 mm genişliğinde ve 200 mm uzunluğunda kesiti alınmaktadır. Kesiti alınmış TPV sisteminin bileşenleri şekil 6.4'te gösterilmektedir.



Şekil 6.4. Kesiti alınmış TPV sistemi

6.3. Sayısal Model

Elektrik güç yoğunluğunun hesaplanabilmesi için TPV hücresinin iç sınırlarına bir *sınır ısı kaynağı* belirlenmektedir. Bu sınır ısı kaynağı q'dır ve Eş. 6.1'de gösterilmektedir [96, 97].

$$-q = G.\eta_{TPV} \tag{6.1}$$

Burada G yüzeye gelen ışınım akısı (W/m^2) ve η_{TPV} TPV hücresinin fotovoltaik verimidir.

TPV sisteminin sayısal modelinin çözümünde tüm yüzeyler, yazılım tarafından yönden bağımsız yüzey (diffüz yüzey) olarak kabul edilmektedir. Ayrıca filtre-TPV hücre ve yayıcı-filtre arasındaki boşluğun hava olduğu kabul edilmektedir. *Heat transfer in solids* ve *surface-to-surface radiation* modelleri, kesiti alınmış TPV sisteminin sayısal çözümlemesi için yazılım tarafından birleştirilmektedir. Katı maddelerin ve havanın fiziksel özellikleri (k, ρ, c_p) yazılım tarafından malzemelerin özelliklerinden tanımlanmaktadır. Ancak malzemelerin yayıcılık özelliği kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Çizelge 6.1'de yayıcının *genel tanımlar-değişkenler*'i (*global definitions-parameters*) gösterilmektedir. Çizelge 6.1'de gösterildiği gibi *genel tanımlar-değişkenler* bölümünde yayıcının iç yüzeyi için belli bir sıcaklık olan T_emitter ifadesi belirlenmektedir. Çizelge 6.2'de TPV hücresi

için *bileşen-değişkenler*'i *(component-variables)* gösterilmektedir. Çizelge 6.2'de gösterildiği gibi TPV sisteminin elektrik güç yoğunluğunu, TPV sisteminin verimini ve TPV hücresinin fotovoltaik verimini saptamak için üç değişken, *component-variables* bölümünde belirlenmektedir.

TPV hücresinin fotovoltaik verimi çevre sıcaklığının bir fonksiyonudur. Yapılan modelde sıcaklığa bağlı olarak TPV hücresinin fotovoltaik verimi tanımlanmaktadır. TPV hücresinin fotovoltaik verimi Eş. 6.2'de verilmektedir [96, 97]. Verilen eşitliğe göre sıcaklığın 1600 K'e eşit veya 1600 K'den daha az olması durumunda TPV hücresinin fotovoltaik verimi yazılım tarafından belirlenmekte, ancak sıcaklığın 1600 K'i aşması durumunda TPV hücresinin fotovoltaik verimi yazılım tarafından 0 (sıfır) olarak tanımlanmaktadır. Verilen bu eşitlik, çizelge 6.2'de gösterildiği gibi TPV sisteminin elektrik güç yoğunluğunun hesaplanabilmesi için ifade bölümüne yazılmalıdır.

$$\eta_{TPV} = \begin{cases} 0{,}2.\left[1 - \left(\frac{T}{800} - 1\right)^2\right], T \leq 1600\ K \\ \\ 0 \qquad\qquad\qquad , T > 1600\ K \end{cases} \tag{6.2}$$

Comsol Multiphysics yazılımı sayısal çözümlemeyi gerçekleştirebilmesi için yazı karakterlerinin İngilizce olmasına dikkat edilmelidir.

Çizelge 6.1. Yayıcının genel tanımı

Değişkenin adı	İfade	Değer	Açıklama
T_emitter	1000 [K]	1000 K	Internal surface temperature of the emitter

Çizelge 6.1'de ifade bölümündeki sıcaklık değeri, yayıcı için belirlenen iç yüzey sıcaklığı aralığında olmalıdır (bkz. Bölüm 6.6). Bu çalışmada sıcaklık 1000 K olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.2. TPV hücresi için bileşen-değişkenlerin tanımı

Değişkenin adı	İfade	Birim	Açıklama
TPV	if(T<1600[K],0.2*(1-(T/800[K]-1)^2),0)		Photovoltaic efficiency of the TPV cell
q	rad.Gm*TPV	W/m^2	Electric power density
P_emit	rad.J	W/m^2	Power flux emitted from the emitter

Çizelge 6.2'de görüldüğü gibi TPV hücresinin fotovoltaik verimini belirlemek için Eş. 6.2, elektrik güç yoğunluğunu belirlemek için *rad.Gm* değişkeni ve yayıcıdan yayılan güç akısını belirlemek için *rad.J* değişkeni Comsol Multiphysics' in bileşen altındaki değişkenler düğümüne eklenmektedir.

Katı malzemelerin yayıcılıkları, Comsol Multiphysics yazılımına kullanıcı tarafından girilmelidir. Çizelge 6.3'te katı malzemelerin yayıcılıkları verilmektedir.

Akışkan maddelerin termodinamik ayarlamalarını yaparken (bu çalışmada akışkan madde hava) özgül ısıların oranı (γ) hava gibi iki atomlu gazlar için 1,4 alınması gerektiği unutulmamalıdır.

Çizelge 6.3. Katı malzemelerin yayıcılıkları

	Silisyum karbür [98]	Kuvars cam [98]	Silisyum [99]	Berilyum oksit [100]	Alüminyum oksit [42]
Yayıcılık	0,90	0,92	0,70	0,40	0,69

6.4. Matematiksel Model

Matematiksel model ile ilgili temel eşitlikler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Katı ve sıvı alanlarda ısı transfer eşitlikleri Eş. 6.3 ve Eş. 6.4'te tanımlanmaktadır.

$$\rho . C_p . \frac{\partial T}{\partial t} + \rho . C_p . u . \nabla T + \nabla q = Q \tag{6.3}$$

$$q = -k.\nabla T \tag{6.4}$$

Burada ρ (kg/m^3) yoğunluk, C_p (J/kg.K) sabit basınçta özgül ısı, u (m/s) akışkanın hızı, T (K) sıcaklık, t (s) zaman, q (W/m^2) ısı akısı, Q (W/m^3) ısı kaynağı ve k (W/m.K) ısı iletim katsayısıdır.

Kesiti alınmış TPV sisteminde herhangi bir sınır boyunca ısı akısının olmadığını veren *ısı yalıtım (thermal insulation)* sınır şartı Eş. 6.5'te verilmektedir.

$$-n.q = 0 \tag{6.5}$$

Burada n yüzey normal vektörü ve q (W/m^2) ısı akısıdır.

Kesiti alınmış TPV sisteminde belirlenen sınır boyunca ısı akısı olmadığını veren simetri *(symmetry)* sınır şartı Eş. 6.5 ile aynıdır. Bu sınır koşulu geometrik modelin sağ ve sol yüzeyine uygulanmaktadır (bkz. Şekil 6.4).

Kesiti alınmış TPV sisteminde bir ısı kaynağına veya soğutucu bir plakaya uygulanan *sınır ısı kaynağı (boundary heat source)* eşitliği Eş. 6.6'da verilmektedir.

$$-n.q = Q_b \tag{6.6}$$

Burada n yüzey normal vektörü, q (W/m^2) ısı akısı ve Q_b (W/m^2) ısı kaynağıdır.

Kesiti alınmış TPV sisteminde belirlenen sınırlar boyunca kullanılan *ısı akısı (heat flux)* sınır şartı, Eş. 6.7'de verilmektedir.

$$q_0 = h.(T_{ext} - T) \tag{6.7}$$

Burada q_0 (W/m^2) ısı akısı, h (W/m^2.K) ısı taşınım katsayısı, T_{ext} (K) dış sıcaklık ve T (K) yüzey sıcaklığıdır.

Kesiti alınmış TPV sistemindeki belirli yüzeylere uygulanan yönden bağımsız yüzey *(diffuse surface)* sınır şartı Eş. 6.8'de verilmektedir. Gri ve saydam olmayan bir yüzey için giden ışınım $\varepsilon + \rho_d = 1$ olduğu unutulmamalıdır.

$$J = \varepsilon . e_b(T) + \rho_d . G \tag{6.8}$$

Burada J (W/m^2) giden ışınım, ε yüzeyin yayıcılığı, e_b (W/m^2) tüm dalga boyları için güç, ρ_d yönden bağımsız yüzeyin yansıtıcılığı ve G (W/m^2) yüzeye gelen ışınım akısıdır.

Belirli bir noktada ışınım akısı üç terimin toplamıdır ve Eş. 6.9'da verilmektedir.

$$G = G_m + G_{amb} + G_{ext} \tag{6.9}$$

Burada G_m (W/m^2) karşılıklı ışınım akısı, G_{amb} (W/m^2) çevre ışınım akısı ve G_{ext} (W/m^2) dış ışınım kaynaklarından gelen ışınım akısıdır.

Çevre ışınım akısı, G_{abm}, Eş. 6.10'da verilmektedir.

$$G_{abm} = F_{amb} . e_b(T_{amb}) \tag{6.10}$$

Burada F_{amb} bir ortamın görüş faktörüdür; değeri $0 \leq F_{amb} \leq 1$, e_b (W/m^2) karacisim toplam yayma gücüdür ve T_{amb} (K) ortam sıcaklığıdır. Stefan-Boltzmann yasasına göre e_b, tüm dalga boylarında yayılan güçtür, sıcaklığın dördüncü kuvvetine bağlıdır ve Eş. 6.11'de verilmektedir.

$$e_b(T) = n^2 . \sigma . T^4 \tag{6.11}$$

Burada n saydam ortam kırılma indeksi, σ (W/m^2.K^4) Stefan-Boltzmann sabiti ve T (K) mutlak sıcaklıktır.

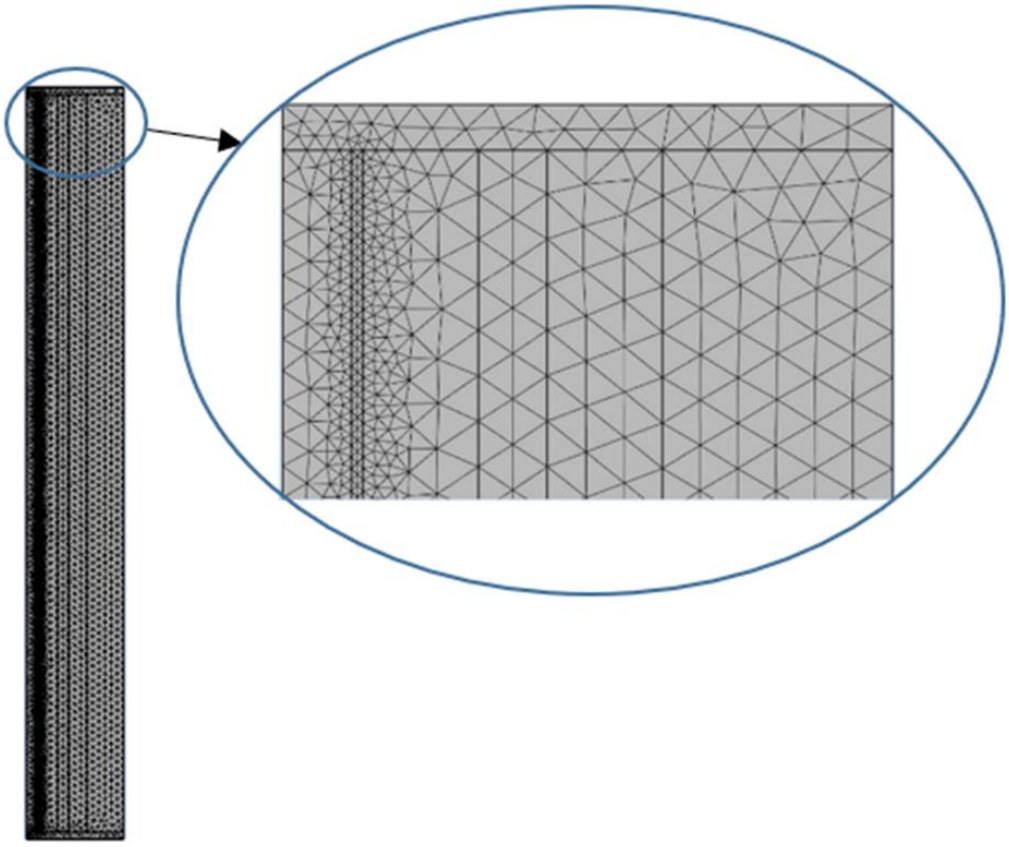
Dış ışınım kaynaklarından gelen ışınım, G_{ext}, Eş. 6.12'de verilmektedir.

$$G_{ext} = \sum F_{ext} . P_s + \sum F_{ext} . q_{0,s} \tag{6.12}$$

Burada P_s (W/m^2) kaynak ısı oranı ve $q_{0,s}$ (W/m^2) kaynak ısı akısıdır. Toplamın ilk terimi bir noktada bulunan ışınım kaynaklarını, ikinci terimi yönlü ışınım kaynaklarını ifade etmektedir.

6.5. Ağ (mesh) Modeli

Kesiti alınmış TPV sisteminin ağ modeli şekil 6.5'te gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kesiti alınmış TPV modelinde yüksek doğruluğa sahip sayısal sonuçlar elde etmek için *Phyiscs-controlled mesh* sekmesi altında *Extremely Fine* ağ modeli tercih edilmiş ve Comsol tarafından üretilmiştir. Bu ağ modelinin istatistiksel verileri her bir sayısal hesaplama için farklılık göstermektedir. Sayısal hesaplamaların tamamı için istatistiksel veriler, çizelge 6.4'te verilmektedir (kalite ölçüleri yazılımdaki adlandırmalarla verilmektedir).



Şekil 6.5. Kesiti alınmış TPV sisteminin ağ modeli

Çizelge 6.4. Kesiti alınmış TPV sistemi için seçilen ağ modellerinin istatistiksel verileri

Kalite ölçüsü	Eleman sayısı	En düşük eleman kalitesi	Ortalama eleman kalitesi
Skewness	87 964-269 418 arası	0,1524-0,2121 arası	0,6290-0,6538 arası
Maximum angle	87 964-269 418 arası	0,2195-0,2523 arası	0,7301-0,7411 arası
Volume versus circumradius	87 964-269 418 arası	0,1578-0,2310 arası	0,6404-0, 6703 arası
Volume versus length	87 964-269 418 arası	0,2269-0,2736 arası	0,7508-0,7663 arası
Condition number	87 964-269 418 arası	0,2670-0,3350 arası	0,8153-0,8279 arası
Growth rate	87 964-269 418 arası	0,3375-0,3631 arası	0,7805-0,9048 arası

6.6. Kombiye Dahil Edilmiş TPV Sisteminin Yanma Odası Sıcaklığının Belirlenmesi

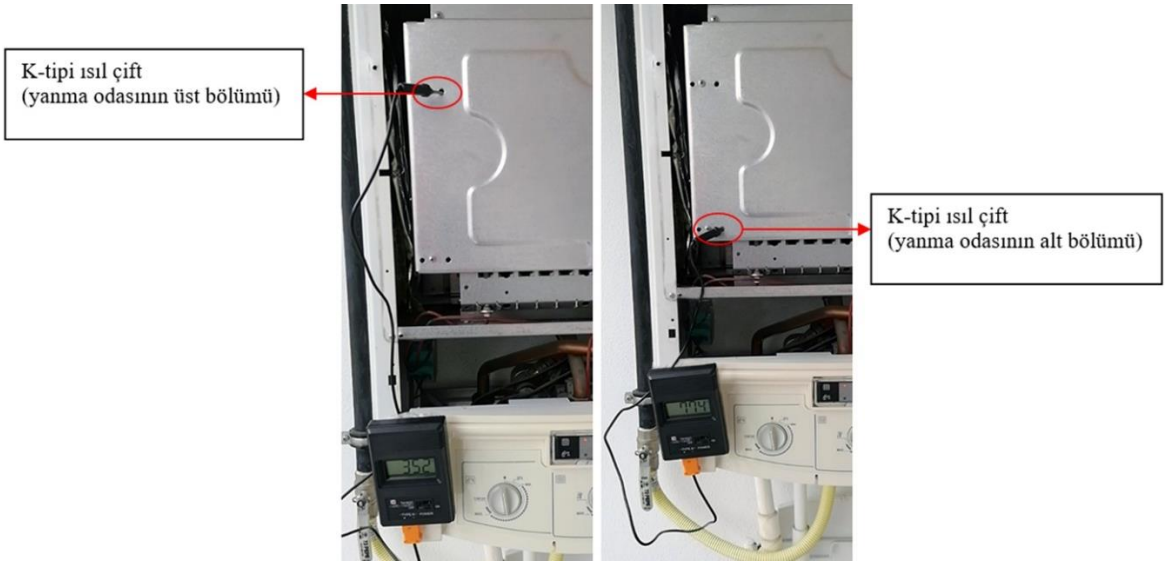
Bölüm 6.3'te belirtildiği gibi yayıcının yüzeyine T_emitter değişken değerinin (yayıcı yüzey sıcaklığının) tanımlanması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada örnek alınan kombinin yanma odasının sıcaklığı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan kombinin teknik özelliklerinin bazıları çizelge 6.5'te verilmektedir [101].

Çizelge 6.5. Eca Confeo Plus Dco 24 Hm kombinin teknik özellikleri

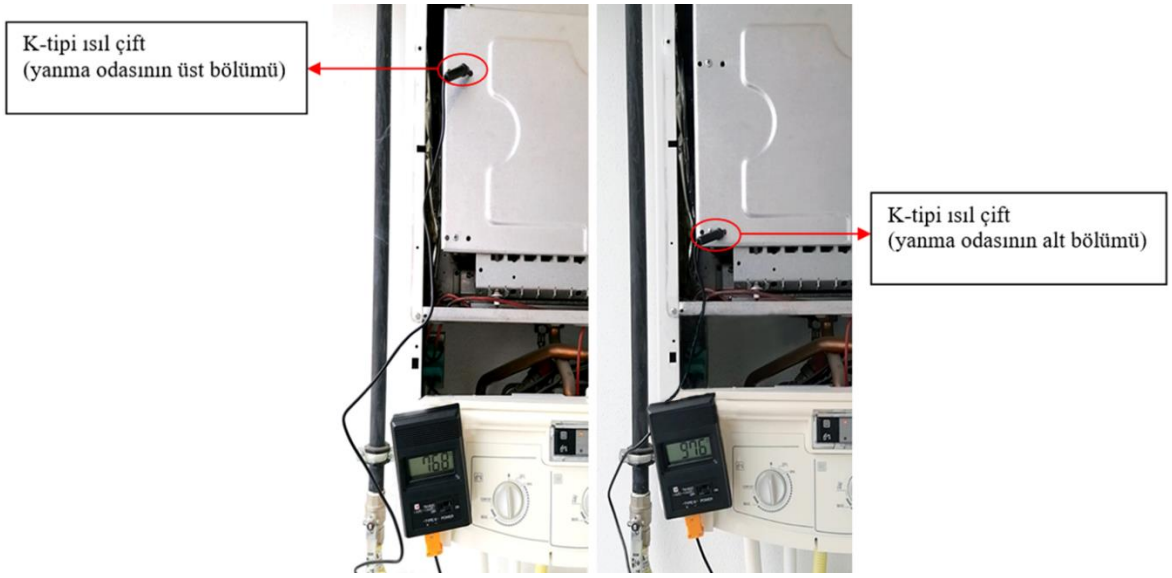
En düşük ısıtma gücü (kW)	En yüksek ısıtma gücü (kW)	En düşük yükte gaz tüketimi (m^3/h)	En yüksek yükte gaz tüketimi (m^3/h)
8,3	23,4	0,96	2,65

Kombinin yanma odası sıcaklığının belirlenebilmesi için K-tipi bir ısıl çift kullanılmıştır. İlk olarak kombi en düşük ısıtma gücünde ve daha sonra en yüksek ısıtma gücünde çalıştırılarak yanma odasının sıcaklıkları belirlenmiştir. Sıcaklığın belirlenmesi için yanma odasının alt ve üst kısımlarında, yanma odası duvarına (bkz. Şekil 6.1) yakın bölgelerde sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sıcaklık ölçümünün bu bölgelerde yapılmasının nedeni, TPV sistemi yanma odası duvarının yerine yerleştirileceği düşünüldüğündendir.

Resim 6.1'de en düşük ısıtma gücünde ve resim 6.2'de en yüksek ısıtma gücünde çalışan kombinin yanma odasının sıcaklıkları gösterilmektedir.



Resim 6.1. Kombinin en düşük ısıtma gücünde çalışması durumunda yanma odasının sıcaklık değerleri



Resim 6.2. Kombinin en yüksek ısıtma gücünde çalışması durumunda yanma odasının sıcaklık değerleri

Resim 6.1'de görüldüğü gibi kombinin en düşük ısıtma gücünde çalışması durumunda yanma odasının üst ve alt noktalarının sıcaklıkları sırasıyla 352 °C (625,15 K) ve 774 °C (1047,15 K)'dir. Resim 6.2'de görüldüğü gibi kombinin en yüksek ısıtma gücünde çalışması

durumunda yanma odasının üst ve alt noktalarının sıcaklıkları sırasıyla 768 ℃ (1041,15 K) ve 976 ℃ (1249,15 K)'dir.

Comsol Multiphysics yazılımında T_emitter değişkeni için yukarıda belirlenen en düşük (625,15 K) ve en yüksek (1249,15 K) sıcaklıklar, *stationary* bölümünde *auxiliary sweep* kısmına eklenmelidir. Bu iki sıcaklık için artış aralığı 104 K olarak belirlenmiştir.

6.7. Sınır Koşulları

Tasarlanan TPV sistem modeli için *Heat transfer in solids* modelinde uygulanan sınır koşulları çizelge 6.6'da ve *surface-to-surface radiation* modelinde uygulanan sınır koşulları çizelge 6.7'de verilmektedir. TPV sistem modeline uygulanan sınırlar ve fizikler, yazılımın ara yüzeyinde İngilizce olduğundan dolayı çizelgede yer alan terimler yazılımdaki gibi verilmektedir.

Çizelge 6.6. *Heat transfer in solids* modelinde uygulanan sınır koşulları

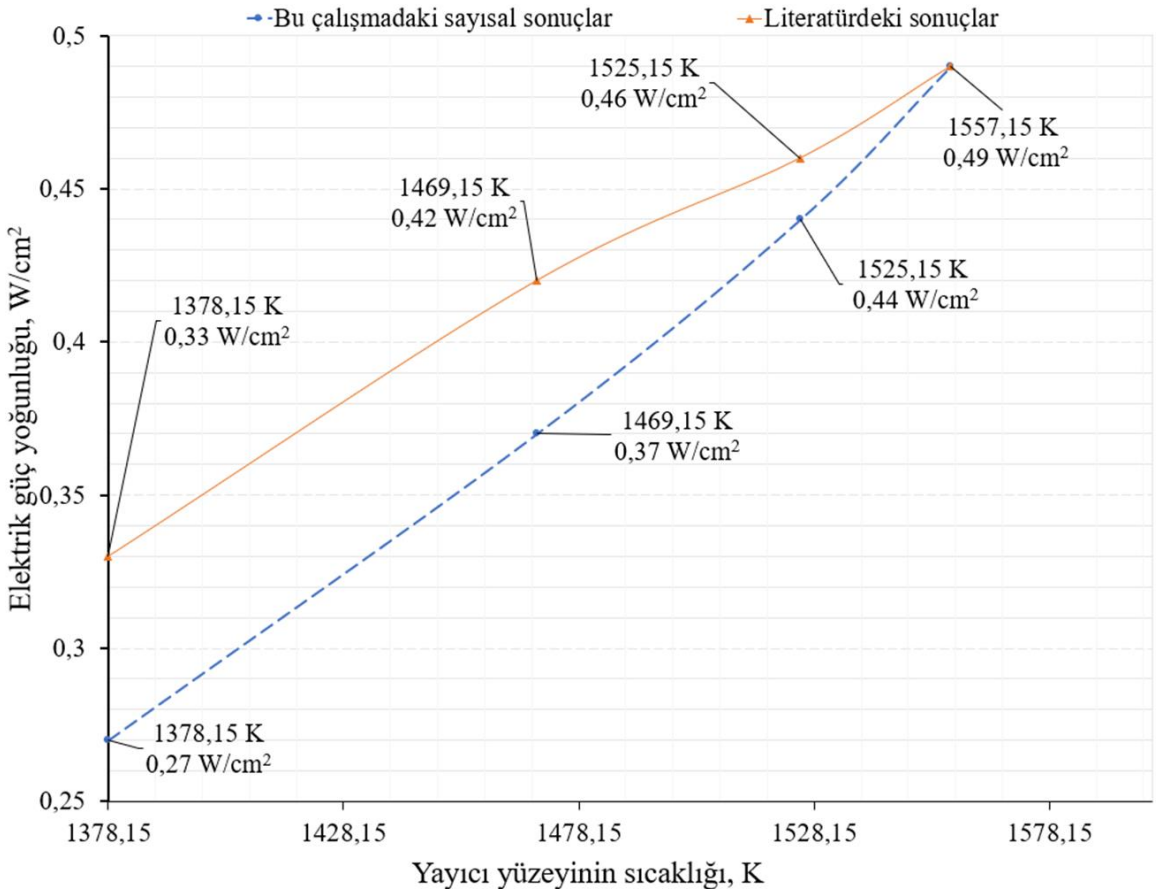
Sınır	Uygulanan fizik	Uygulandığı yer	Sınır koşulu	Değer	Eşitlik
Heat trasfer in solid	Heat trasfer in solid	Tüm model	Sıcaklık	T_{ref}= 293,15 (K)	Eş.6.3 Eş.6.4
Solid	Heat trasfer in solid	Yayıcı, filtre, TPV hücresi, soğutucu levha ve yansıtıcı	Mutlak basınç Isıl iletkenlik Yoğunluk Özgül ısı	P= 1 (atm) k= malzemenin özelliklerinden (W/m.K) ρ= malzemenin özelliklerinden (kg/m^3) c_p= malzemenin özelliklerinden (J/kg.K)	Eş.6.3 Eş.6.4
Initial values	Heat trasfer in solid	Tüm model	Sıcaklık	T= 293,15 (K)	-
Fluid	Heat trasfer in solid	Hava	Mutlak basınç Sıcaklık Isıl iletkenlik Yoğunluk Özgül ısı Özgül ısıların oranı	P= 1 (atm) T= 293,15 (K) k= malzemenin özelliklerinden (W/m.K) ρ= malzemenin özelliklerinden (kg/m^3) c_p= malzemenin özelliklerinden (J/kg.K) γ= 1,4	Eş.6.3 Eş.6.4
Symmetry	Heat trasfer in solid	Modelin sağ ve sol yan yüzeyi	-	-	Eş.6.5
Temperature 1	Heat trasfer in solid	Yayıcının iç yüzeyi	Sıcaklık	T_0= T_emitter (K)	-
Temperature 2	Heat trasfer in solid	Yansıtıcıların üst yüzeyleri	Sıcaklık	T_0= T (K)	-
Boundary heat source 1	Heat trasfer in solid	TPV hücresinin iç yüzeyi	Genel ısı	$Q_b = -q$	Eş.6.6
Boundary heat source 2	Heat trasfer in solid	Yayıcının dış yüzeyi	Genel ısı	$Q_b = \mathrm{P_{emit}}$	Eş.6.6
Heat flux	Heat trasfer in solid	Soğutucu levhanın dış yüzeyi	Isı taşınım katsayısı Sıcaklık	h= 50 (W/m^2.K) T_{ext}= 293,15 (K)	Eş.6.7

Çizelge 6.7. *Surface-to-surface radiation* modelinde uygulanan sınır koşulları

Sınır	Uygulanan fizik	Uygulandığı yer	Sınır koşulu	Değer	Eşitlik
Surface-to-surface radiation	Surface-to-surface radiation	Symmetry sınır koşulunun uygulandığı yüzeyler hariç tüm yüzeyler	Saydam ortam kırılma indeksi	n= 1	Eş.6.8
Diffuse surface 1	Surface-to-surface radiation	Soğutucu levha	Sıcaklık Yüzey yayıcılığı	T_{amb}= T (K) ε= 0,4	Eş.6.8
Initial values	Surface-to-surface radiation	Simetri sınır koşulunun uygulandığı yüzeyler hariç tüm yüzeyler	Sıcaklık	T= 293,15 (K)	-
Diffuse surface 2	Surface-to-surface radiation	Yayıcı yüzeyi	Sıcaklık Yüzey yayıcılığı	T_{amb}= T (K) ε= 0,9	Eş.6.8
Diffuse surface 3	Surface-to-surface radiation	Filtre yüzeyi	Sıcaklık Yüzey yayıcılığı	T_{amb}= T (K) ε= 0,92	Eş.6.8
Diffuse surface 4	Surface-to-surface radiation	TPV hücresinin yüzeyi	Sıcaklık Yüzey yayıcılığı	T_{amb}= T (K) ε= 0,7	Eş.6.8
Diffuse surface 5	Surface-to-surface radiation	Yansıtıcı yüzeyi	Sıcaklık Yüzey yayıcılığı	T_{amb}= T (K) ε= 0,69	Eş.6.8

6.8. Sayısal Modelin Doğrulanması

TPV sisteminin sayısal modelinin güvenilirliğini doğrulamak için, bu çalışmadaki sayısal sonuçlar ile literatürdeki sonuçlar [95], şekil 6.6'da gösterildiği gibi karşılaştırılmaktadır. Sayısal modelin doğrulanması için geometrik modelde yayıcının, filtrenin, TPV hücresinin, soğutma levhasının ve yansıtıcının kalınlığı, sırasıyla 2 mm, 3 mm, 0,5 mm, 3 mm ve 2 mm'dir. Ayrıca, yayıcı-filtre ve filtre-TPV hücre arasındaki mesafe sırasıyla 10 mm ve 1 mm'dir.



Şekil 6.6. TPV sisteminin sayısal modelinin doğrulanması

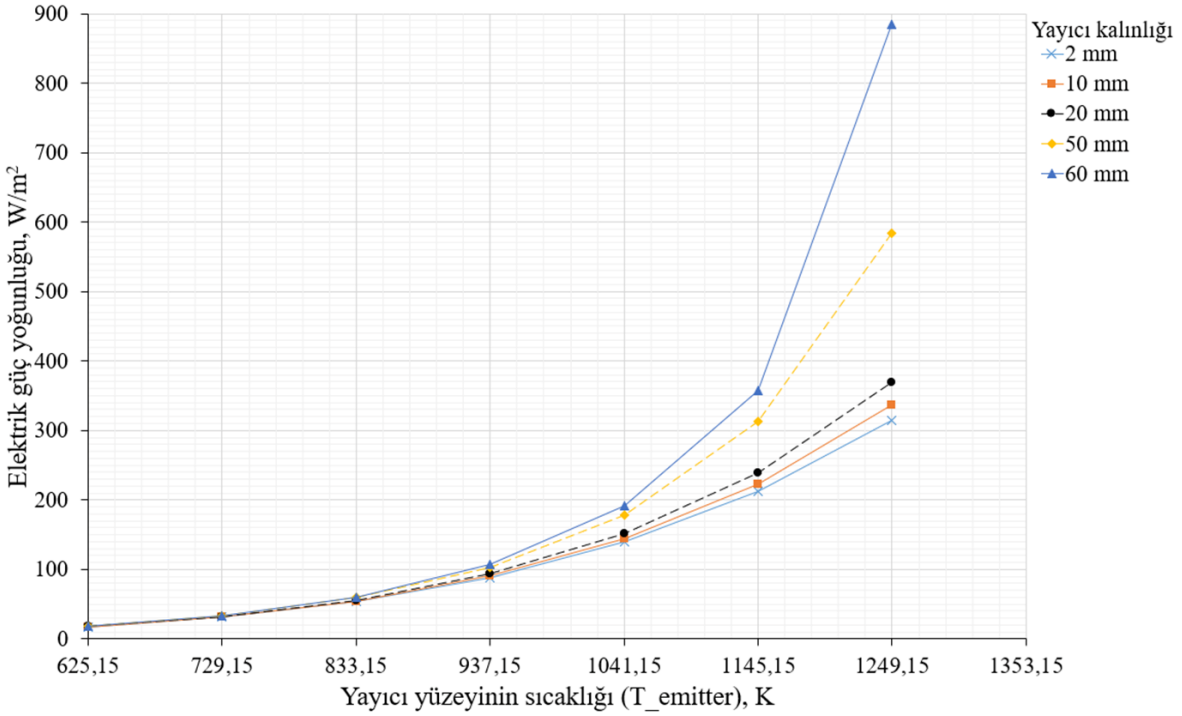
Literatürde kullanılan 1378,15 K - 1469,15 K - 1525,15 K ve 1557,15 K yayıcı sıcaklıkları, sayısal modeli doğrulamak için kullanılmıştır. Literatür çalışmasında [95] TPV hücresi, filtre ve yayıcı için sırasıyla GaSb, optik filtre ve gözenekli silisyum karbür köpük kullanılmıştır. Şekil 6.6'da görüldüğü gibi, her iki çalışmada bu sıcaklıklar için elde edilen elektrik güç yoğunluğu sonuçları örtüşmektedir. Bu sonuçlar, bu çalışmada kullanılan sayısal modelin güvenirliliğini göstermektedir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde yayıcı kalınlığının optimizasyonundaki kalınlık, filtre-TPV hücre arasındaki optimizasyonundaki mesafe, yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafenin optimizasyonundaki mesafe ve filtre kalınlığının optimizasyonundaki kalınlık için bir başlangıç değeri belirlenmektedir. Her optimizasyon için optimum değer belirlendikten sonra sayısal çözümleme tamamlanmaktadır. Sayısal modelin tüm çözümlemelerinde soğutma levhasının, TPV hücresinin ve yansıtıcının kalınlığı sırasıyla 3 mm, 0,5 mm ve 2 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca filtre kalınlığı optimizasyonu gerçekleştirilene kadar yayıcı kalınlığı, filtre-TPV hücre arasındaki ve yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe optimizasyonlarında filtre kalınlığı, 3 mm olarak tercih edilmiştir.

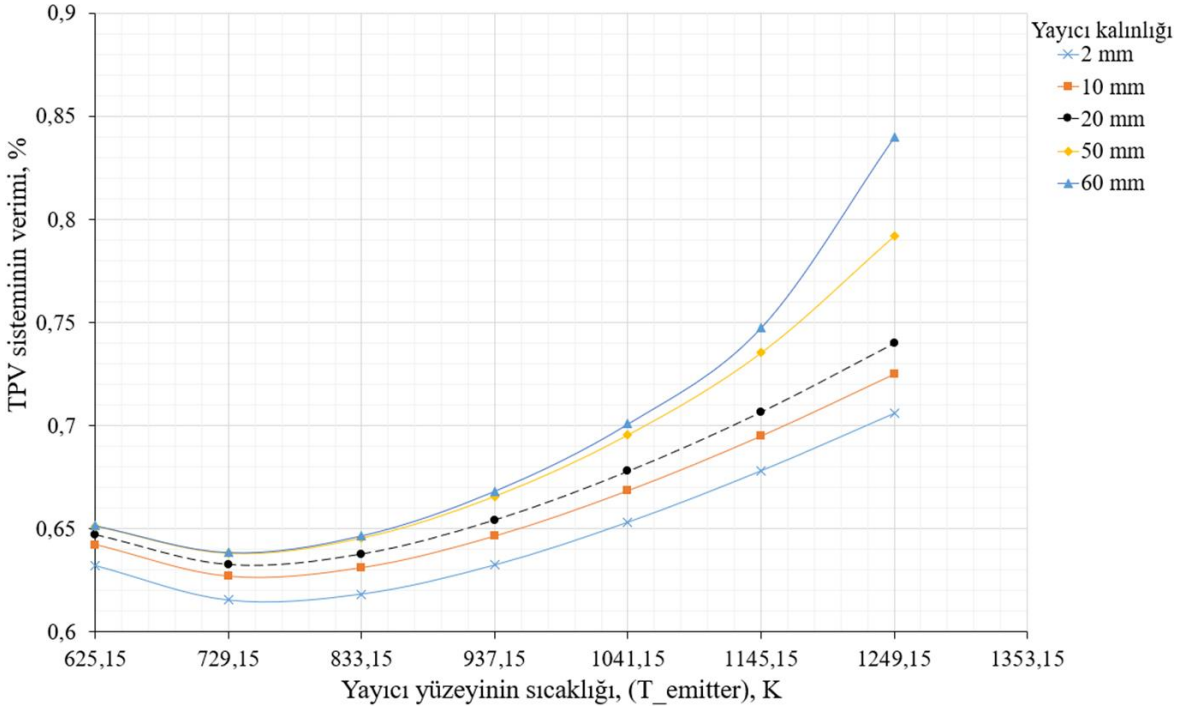
7.1. TPV Sisteminde Yayıcı Kalınlığının Optimizasyonu

Bu sayısal analiz için yayıcı-filtre arasındaki mesafe, filtre kalınlığı ve filtre-TPV hücresi arasındaki mesafe geometrik modelde sabitlenmektedir. Yayıcı-TPV hücre arasındaki, yayıcı-filtre arasındaki ve filtre-TPV hücre arasındaki mesafe sırasıyla 43 mm, 20 mm ve 20 mm olarak tercih edilmiştir. TPV sisteminin elektrik güç yoğunluğunu ve verimini incelemek için yayıcı kalınlığı 2 mm, 10 mm, 20 mm, 50 mm ve 60 mm olarak belirlenmiştir. TPV sisteminin elektrik güç yoğunluğu ve verimi, yayıcı yüzeyinin belirlenen sıcaklıkları için sırasıyla şekil 7.1 ve şekil 7.2'de gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Yayıcı kalınlığı için elektrik güç yoğunluğu

Şekil 7.1'de görüldüğü gibi yayıcı kalınlıklarının tümü için elektrik güç yoğunluğu yayıcı yüzey sıcaklığının artmasıyla artmaktadır. Yayıcı yüzey sıcaklığı 625,15 K-729,15 K ve 833,15 K olduğunda, yayıcı kalınlığının elektrik güç yoğunluğu üzerinde önemli bir etkisi olmamaktadır. Ancak 833,15 K'ni aşan yayıcı yüzey sıcaklıklarında, yayıcı kalınlığının artması ile elektrik güç yoğunluğu değerlerinde önemli bir artış olmaktadır. Diğer yandan, şekil 7.2'de görüldüğü gibi yayıcı yüzey sıcaklığı 729,15 K ve 833,15 K olduğunda TPV sisteminin verimi yayıcı kalınlıkları tamamı için azalmaktadır. Bununla birlikte, yayıcı yüzey sıcaklığı 937,15 K ve üzerinde olduğunda TPV sisteminin verimi tüm yayıcı kalınlıklarında artmaktadır. Ayrıca, her bir yayıcı yüzey sıcaklığı dikkate alındığında kalın yayıcı kullanımı hem elektrik güç yoğunluğunu hem de TPV sisteminin verimini artırmaktadır.



Şekil 7.2. Yayıcı kalınlığı için TPV sisteminin verimi

Yayıcı yüzey sıcaklığına göre yayıcı kalınlığı için elektrik güç yoğunluğu ve TPV sisteminin verim sonuçları, sırasıyla çizelge 7.1 ve çizelge 7.2'de verilmektedir.

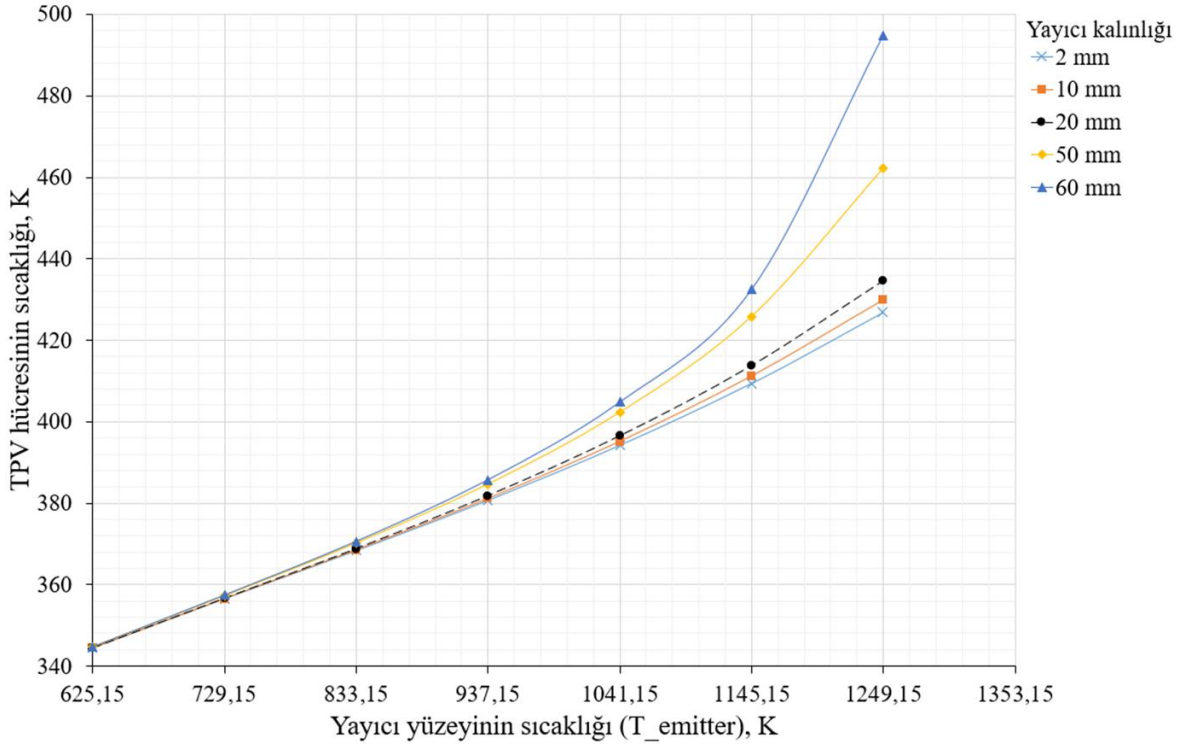
Çizelge 7.1. Yayıcı kalınlığına göre elektrik güç yoğunluğu sonuçları

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Yayıcı kalınlığı, mm				
	2	10	20	50	60
	Elektrik güç yoğunluğu, W/m^2				
625,15	17,43	17,50	17,58	17,85	17,94
729,15	31,35	31,60	31,95	33,02	33,39
833,15	53,69	54,49	55,57	59,11	60,41
937,15	88,08	90,20	93,09	103,39	107,57
1041,15	139,04	144,01	151,00	178,84	191,81
1145,15	212,16	222,87	238,56	312,51	357,02
1249,15	314,30	336,00	369,71	583,98	884,89

Çizelge 7.2. Yayıcı kalınlığına göre TPV sisteminin verim sonuçları

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Yayıcı kalınlığı, mm				
	2	10	20	50	60
	TPV sisteminin verimi, %				
625,15	0,63	0,64	0,65	0,65	0,65
729,15	0,62	0,63	0,63	0,64	0,64
833,15	0,62	0,63	0,64	0,65	0,65
937,15	0,63	0,65	0,65	0,67	0,67
1041,15	0,65	0,67	0,68	0,70	0,70
1145,15	0,68	0,69	0,71	0,74	0,75
1249,15	0,71	0,72	0,74	0,79	0,84

Yayıcı kalınlığına göre yayıcı yüzey sıcaklığı için TPV hücresinin sıcaklığı, şekil 7.3'te gösterilmektedir. Yayıcı kalınlığı için TPV hücresinin sıcaklık değerleri, çizelge 7.3'te verilmektedir. TPV hücresinin sıcaklığı, yayıcı kalınlıklarının tamamı için yayıcı yüzeyinin sıcaklığı arttıkça artmaktadır. Ayrıca 60 mm dışındaki diğer kalınlıklar için TPV hücre sıcaklığı, üst sınır olarak belirlenen 475 K'in altındadır.

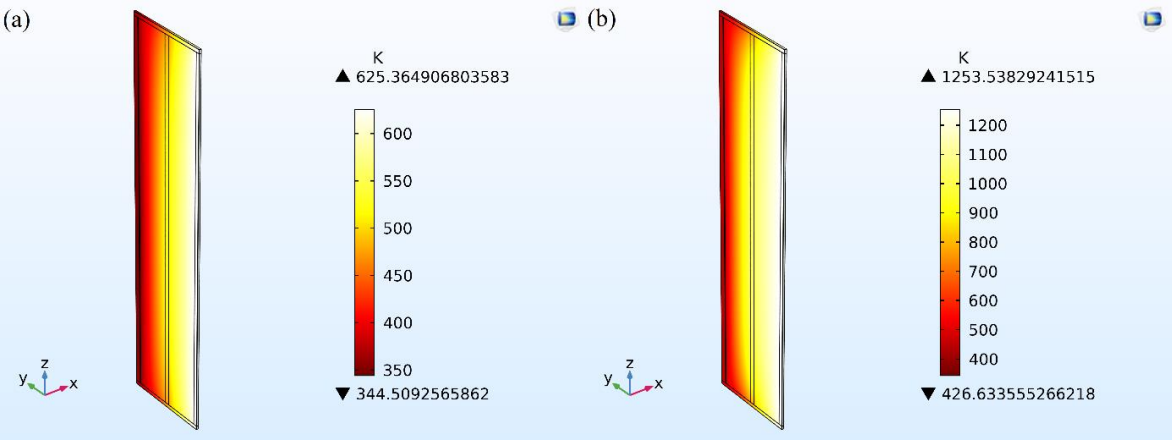


Şekil 7.3. Yayıcı kalınlığı için TPV hücresinin sıcaklığı

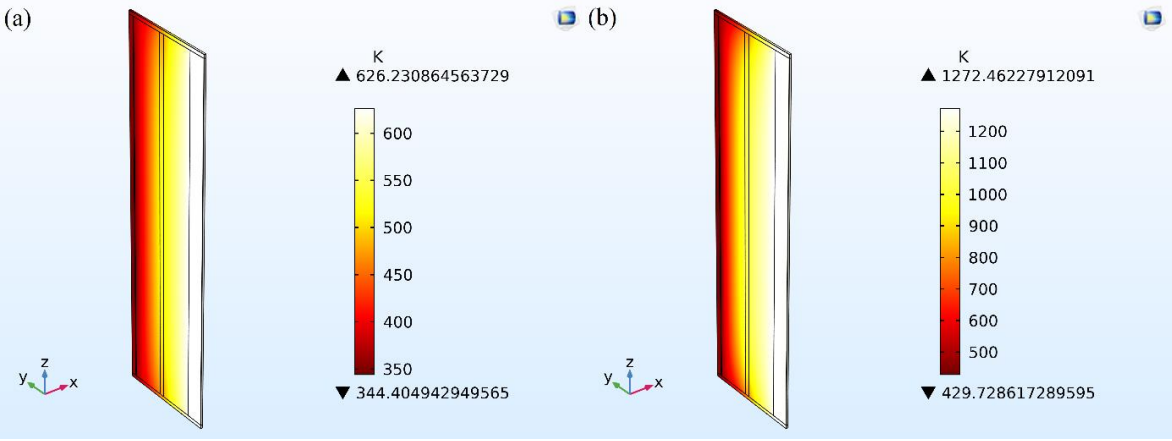
Çizelge 7.3. Yayıcı kalınlığına göre TPV sistemin sıcaklık değerleri

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Yayıcı kalınlığı, mm				
	2	10	20	50	60
	TPV hücresinin sıcaklığı, K				
625,15	344,53	344,43	344,42	344,62	344,71
729,15	356,56	356,54	356,64	357,21	357,43
833,15	368,35	368,50	368,82	370,13	370,63
937,15	380,68	381,12	381,84	384,61	385,73
1041,15	394,16	395,10	396,53	402,25	404,82
1145,15	409,35	411,12	413,77	425,75	432,43
1249,15	426,72	429,82	434,61	462,19	494,87

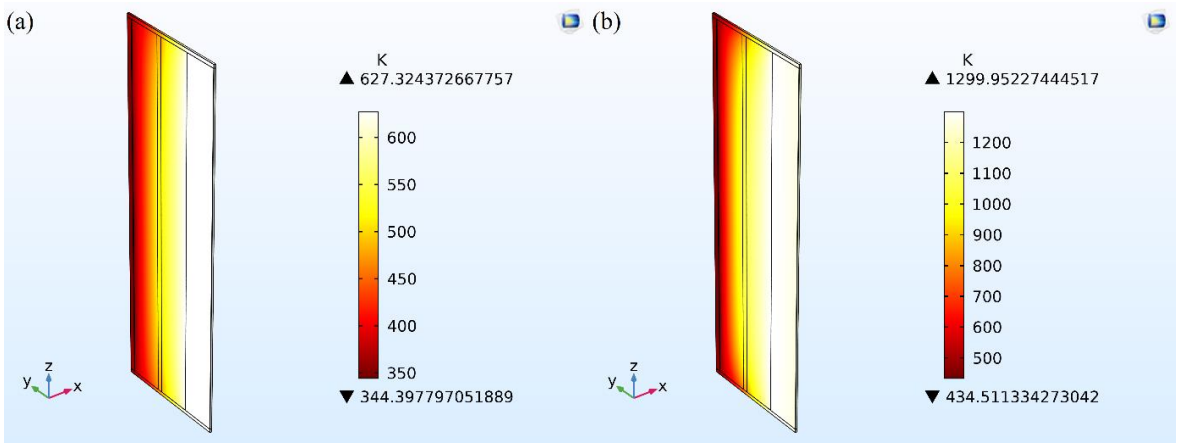
Yayıcı yüzeyinin belirlenen en düşük ve en yüksek sıcaklıklarında yayıcı kalınlığına göre TPV sisteminin sıcaklık alanları şekil 7.4'te, şekil 7.5'te, şekil 7.6'da, şekil 7.7'de ve şekil 7.8'de gösterilmektedir.



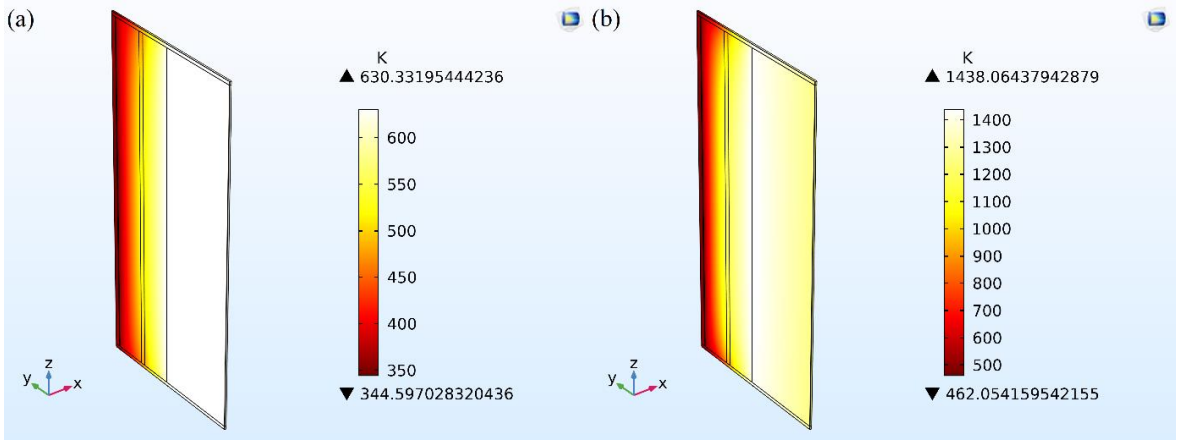
Şekil 7.4. Yayıcı kalınlığı 2 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



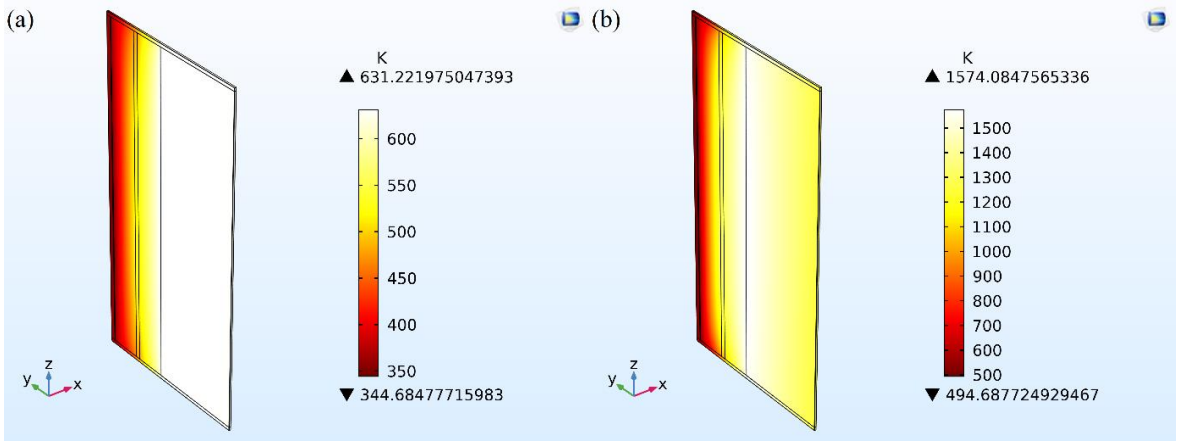
Şekil 7.5. Yayıcı kalınlığı 10 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.6. Yayıcı kalınlığı 20 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.7. Yayıcı kalınlığı 50 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



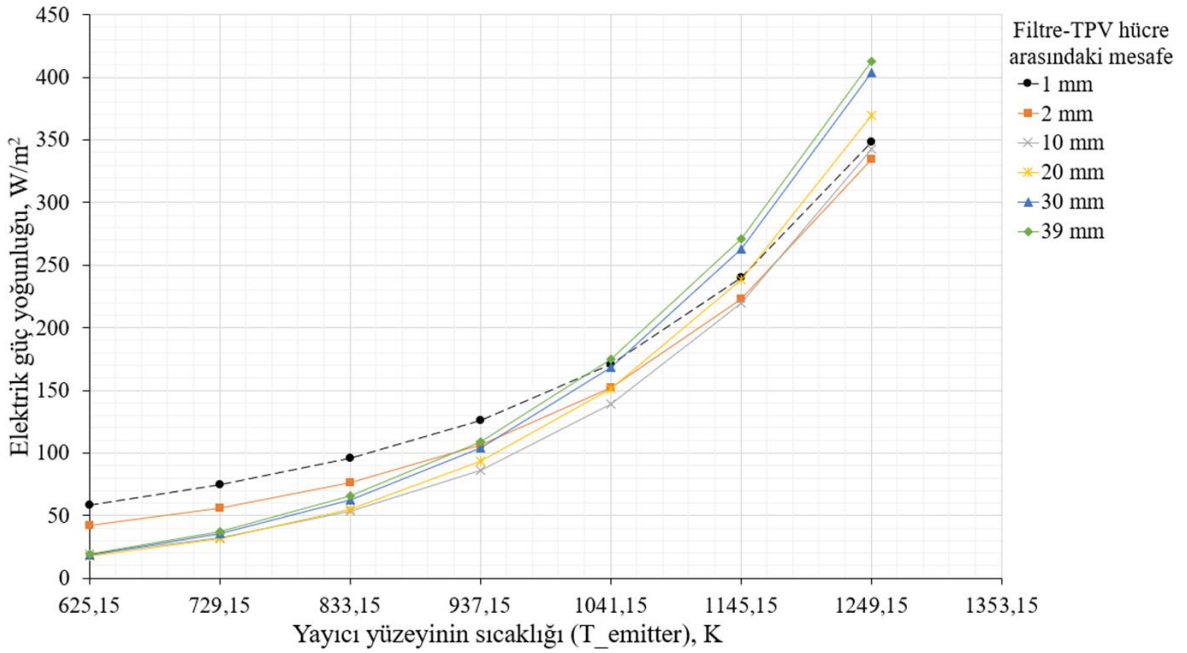
Şekil 7.8. Yayıcı kalınlığı 60 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı

Şekil 7.4'te, şekil 7.5'te, şekil 7.6'da, şekil 7.7'de ve şekil 7.8'de görüldüğü gibi yayıcı yüzey sıcaklığı için belirlenen en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla 625,15 K ve 1249,15 K olmasına rağmen TPV sistem modelinin bazı bölgelerinde sıcaklık değerleri belirlenen bu sıcaklık değerlerinin üzerine çıkmaktadır. Bu sıcaklık artışı yayıcı yüzeyinin dış bölümünde (yayıcının filtreye bakan yüzeyinde) meydana gelmektedir.

Yayıcı kalınlığı arttıkça hem elektrik güç yoğunluğu hem de TPV sisteminin verimi artmaktadır. Ancak, yayıcı kalınlığının aşırı genişliği hem çalışmada kullanılan kombinin boyutlarını değiştirmektedir hem de yayıcı maliyeti için uygun değildir. Bu nedenle, aşağıdaki sayısal çözümlemelerde optimum yayıcı kalınlığı 20 mm olarak belirlenmiştir. Yayıcı kalınlığı 20 mm olduğunda, elektrik güç yoğunluğu 17,58 W/m^2-369,71 W/m^2 arasında değişmektedir. Ayrıca, TPV sisteminin verimi bu kalınlık için %0,63-0,74 aralığındadır.

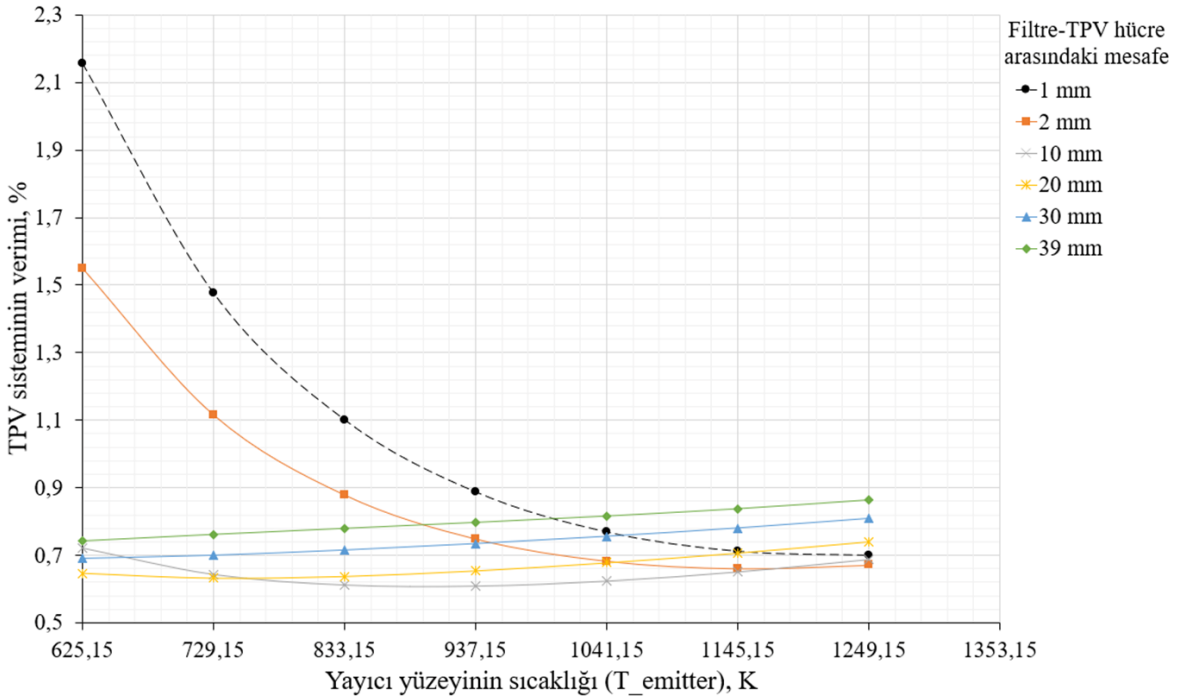
7.2. TPV Sisteminde Filtre-TPV Hücre Arasındaki Mesafenin Optimizasyonu

TPV sistem modelinde filtre-TPV hücre arasındaki mesafenin optimizasyonu için yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe, 43 mm'de sabitlenmektedir. Filtre-TPV hücresi arasındaki mesafe 1 mm, 2 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm ve 39 mm olarak belirlenmiştir. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 39 mm olduğunda yayıcı-filtre arasındaki mesafenin 1 mm olduğu not edilmelidir. Bu mesafeler için TPV sisteminin elektrik güç yoğunluğu ve verimi sırasıyla şekil 7.9 ve şekil 7.10'da gösterilmektedir.



Şekil 7.9. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe için elektrik güç yoğunluğu

Şekil 7.9'da görüldüğü gibi elektrik güç yoğunluğu, her mesafe için yayıcı yüzeyin artan sıcaklığı ile birlikte artmaktadır. En yüksek elektrik güç yoğunluğu, yayıcı yüzeyinin sıcaklığı 625,15 K-937,15 K aralığında olursa, filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 1 mm olduğunda elde edilmektedir. Bununla birlikte, 937,15 K'i aşan yayıcı yüzey sıcaklıklarında bu mesafe için elektrik güç yoğunluğunda diğer mesafelere göre bir azalma meydana gelmektedir. En yüksek elektrik güç yoğunluğu, yayıcı yüzey sıcaklığı 1041,15 K ve üzerinde olursa, filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 39 mm olduğunda elde edilmektedir. Şekil 7.10'da görüldüğü gibi filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 1 mm veya 2 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin artan sıcaklığı ile birlikte TPV sisteminin verimi azalmaktadır. 937,15 K ve daha düşük yayıcı yüzey sıcaklıkları için filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 1 mm olduğu zaman, TPV sistem veriminin diğer mesafelerden daha yüksek olduğuna dikkat edilmelidir. Bu mesafe 30 mm veya 39 mm olduğunda, yayıcı yüzey sıcaklığının artmasıyla TPV sisteminin verimi de artmaktadır. Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı 1041,5 K ve üzerindeyse, TPV sisteminin en yüksek verimi 39 mm'de elde edilmektedir.



Şekil 7.10. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe için TPV sisteminin verimi

Yayıcı yüzey sıcaklığına göre filtre-TPV hücre arasındaki mesafe için elektrik güç yoğunluğu ve TPV sisteminin verim sonuçları, sırasıyla çizelge 7.4 ve çizelge 7.5'te verilmektedir.

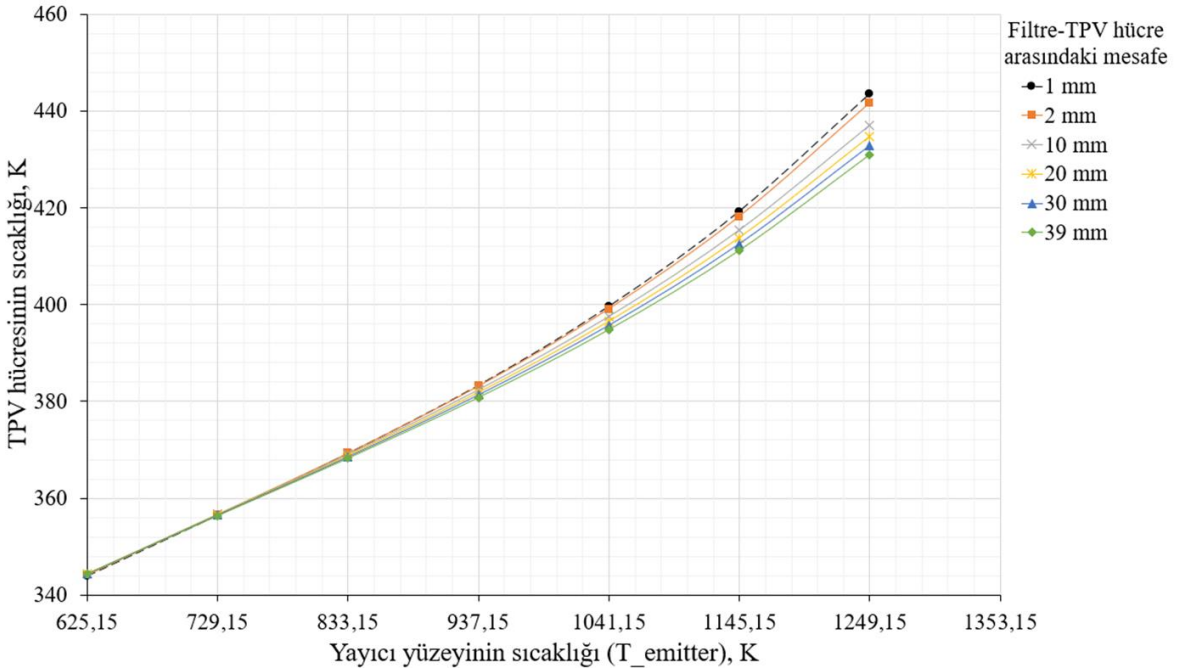
Çizelge 7.4. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafeye göre elektrik güç yoğunluğu sonuçları

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe, mm					
	1	2	10	20	30	39
	Elektrik güç yoğunluğu, W/m^2					
625,15	58,60	42,09	19,63	17,58	18,74	19,50
729,15	74,54	56,35	32,48	31,95	35,30	37,16
833,15	95,86	76,57	53,27	55,57	62,25	65,55
937,15	126,09	106,47	86,49	93,09	104,35	109,28
1041,15	170,90	151,99	138,66	151,00	168,19	174,77
1145,15	239,66	222,70	219,34	238,56	263,15	271,19
1249,15	348,55	334,51	343,02	369,71	403,44	412,54

Çizelge 7.5. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sisteminin verim sonuçları

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe, mm					
	1	2	10	20	30	39
	TPV sisteminin verimi, %					
625,15	2,16	1,55	0,72	0,65	0,69	0,74
729,15	1,48	1,12	0,64	0,63	0,70	0,76
833,15	1,10	0,88	0,61	0,64	0,72	0,78
937,15	0,89	0,75	0,61	0,65	0,73	0,80
1041,15	0,77	0,68	0,62	0,68	0,76	0,82
1145,15	0,71	0,66	0,65	0,71	0,78	0,84
1249,15	0,70	0,67	0,69	0,74	0,81	0,86

Filtre-TPV hücre arasındaki mesafeye göre yayıcı yüzeyinin sıcaklığı için TPV hücresinin sıcaklığı, şekil 7.11'de gösterilmektedir. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe için TPV hücresinin sıcaklık değerleri, çizelge 7.6'da verilmektedir. Şekil 7.11'de ve çizelge 7.6'da görüldüğü gibi TPV hücresinin sıcaklığı, mesafelerin tamamı için yayıcı yüzey sıcaklığının artmasıyla birlikte artmaktadır. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafelerin tamamı için hücre sıcaklıkları, üst sınır olarak belirlenen 475 K'in altındadır.

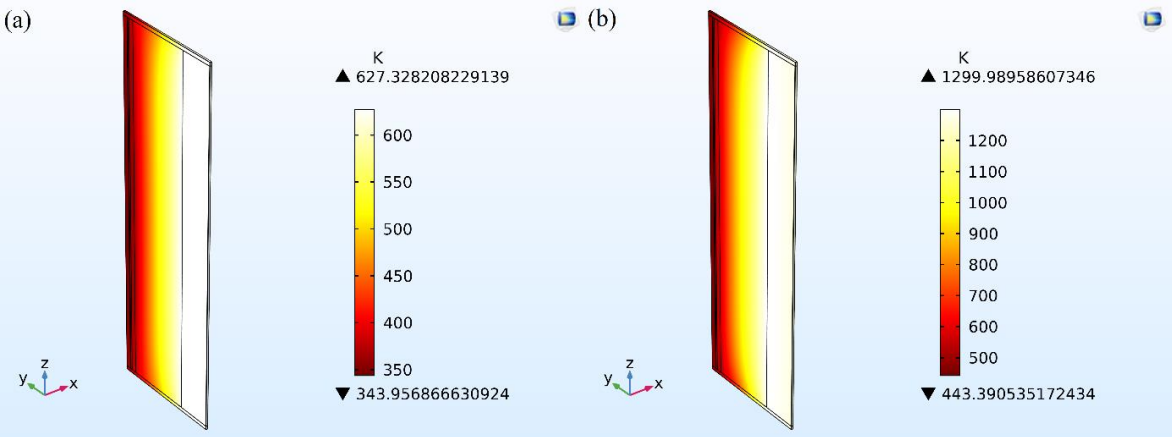


Şekil 7.11. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe için TPV hücresinin sıcaklığı

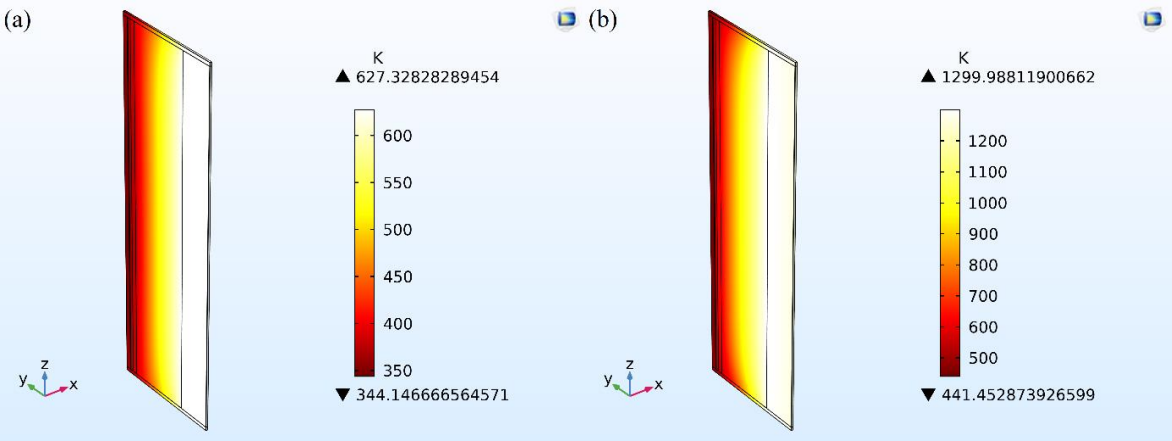
Çizelge 7.6. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sistemin sıcaklık değerleri

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe, mm					
	1	2	10	20	30	39
	TPV hücresinin sıcaklığı, K					
625,15	343,98	344,17	344,43	344,42	344,39	344,34
729,15	356,51	356,65	356,76	356,64	356,52	356,37
833,15	369,30	369,31	369,12	368,82	368,55	368,23
937,15	383,34	383,14	382,43	381,84	381,34	380,76
1041,15	399,64	399,09	397,55	396,53	395,71	394,77
1145,15	419,26	418,16	415,37	413,77	412,51	411,13
1249,15	443,51	441,56	436,99	434,61	432,79	430,88

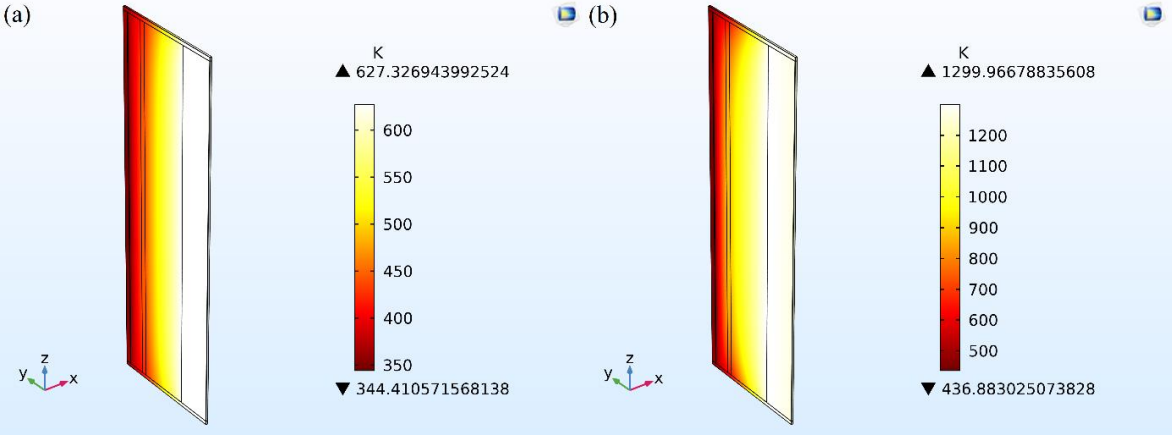
Yayıcı yüzeyinin belirlenen en düşük ve en yüksek sıcaklıklarında filtre-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sisteminin sıcaklık alanları şekil 7.12'de, şekil 7.13'te, şekil 7.14'te, şekil 7.15'te, şekil 7.16'da ve şekil 7.17'de gösterilmektedir.



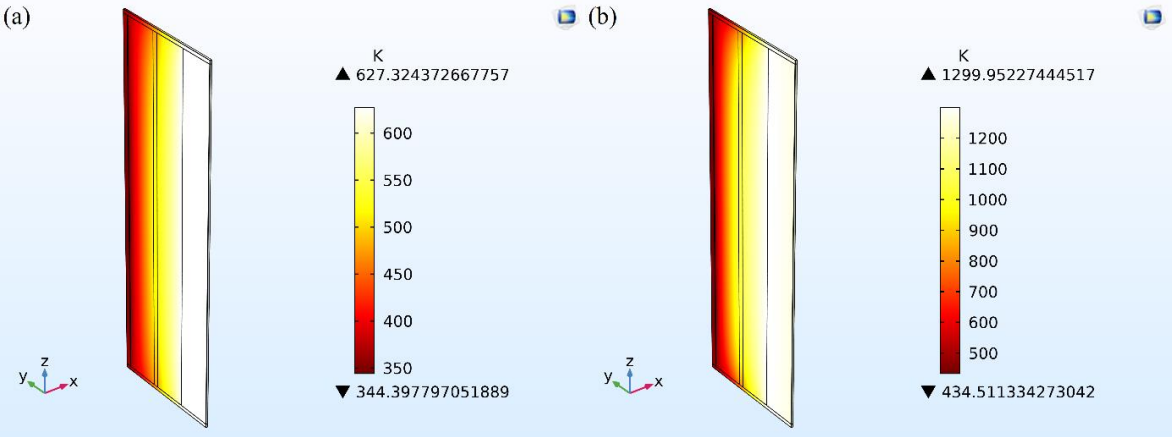
Şekil 7.12. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 1 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



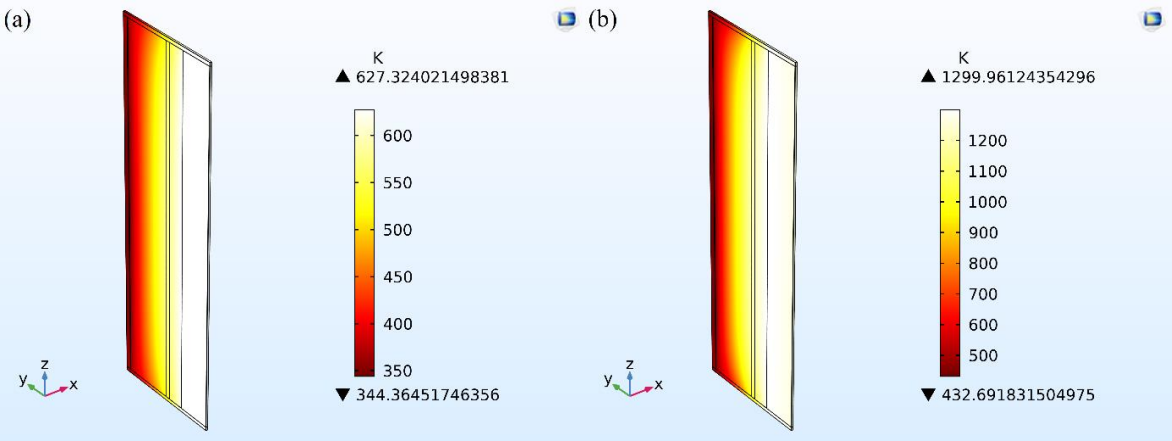
Şekil 7.13. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 2 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



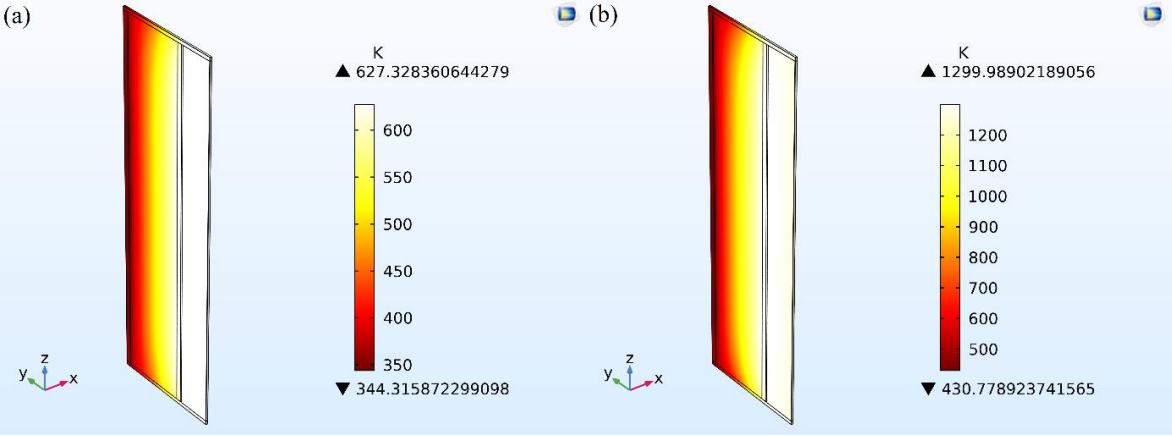
Şekil 7.14. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 10 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.15. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 20 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.16. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 30 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.17. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 39 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı

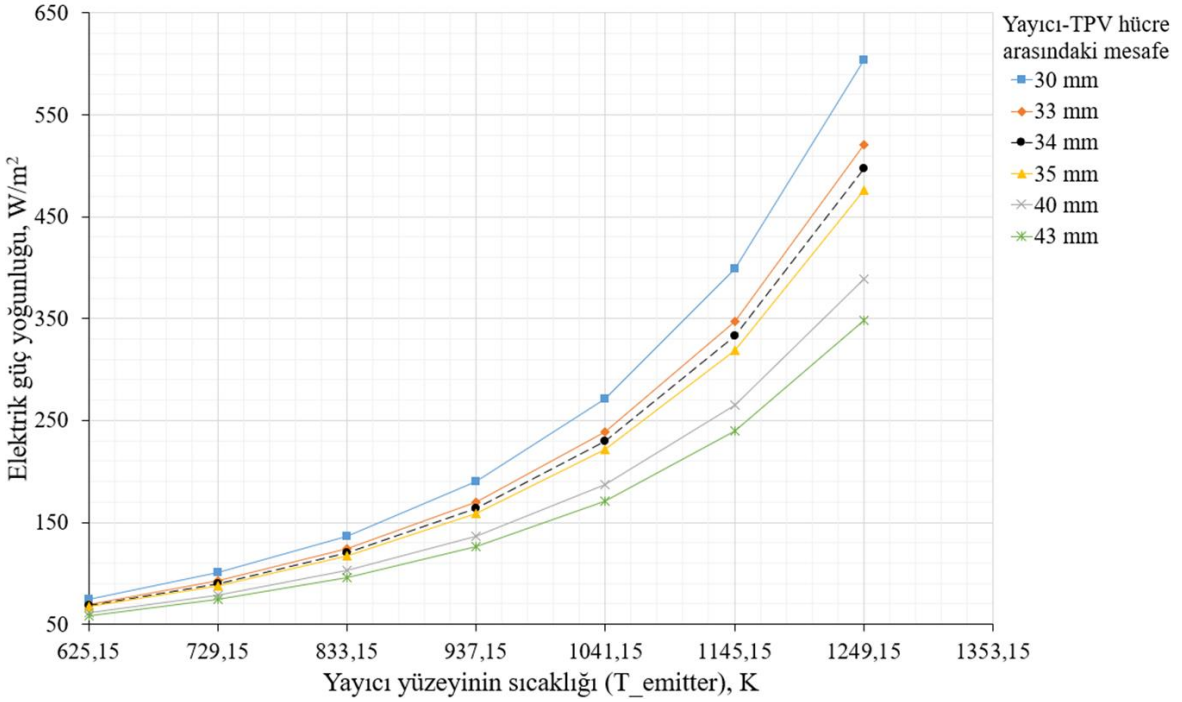
Şekil 7.12'de, şekil 7.13'te, şekil 7.14'te, şekil 7.15'te, şekil 7.16'da ve şekil 7.17'de görüldüğü gibi yayıcı yüzey sıcaklığı için belirlenen en düşük ve en yüksek değerler sırasıyla 625,15 K ve 1249,15 K olmasına rağmen TPV sistem modelinin bazı bölgelerinde sıcaklık değerleri belirlenen bu sıcaklık değerlerinin üzerine çıkmaktadır. Bu sıcaklık artışı yayıcı yüzeyinin dış bölümünde (yayıcının filtreye bakan yüzeyinde) meydana gelmektedir.

En yüksek elektrik güç yoğunluğu ve en yüksek sistem verimi, yayıcı yüzeyinin düşük sıcaklıkları için 1 mm'de ve yayıcı yüzeyinin yüksek sıcaklıkları için 39 mm'de elde edilmektedir. Kombiler genellikle düşük ısıtma gücünde çalıştırılmaktadır. Diğer bir deyişle, kombiler sürekli olarak yüksek ısıtma gücünde çalıştırılmamaktadır. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 1 mm olduğunda, düşük sıcaklıklarda en yüksek elektrik güç yoğunluğu

ve TPV sisteminin en yüksek verimi elde edilmektedir. Bu nedenle, bu çalışma için filtre-TPV hücre arasındaki optimum mesafe 1 mm olarak belirlenmiştir. Filtre-TPV hücre arasındaki bu mesafe sonraki sayısal çözümlemelerde kullanılmaktadır. Filtre-TPV hücre arasındaki mesafe 1 mm olduğunda, elektrik güç yoğunluğu 58,60 W/m^2-348,55 W/m^2 arasında değişmektedir. Ayrıca, TPV sisteminin verimi bu mesafe için %0,70-2,16 aralığındadır.

7.3. TPV Sisteminde Yayıcı-TPV Hücre Arasındaki Mesafenin Optimizasyonu

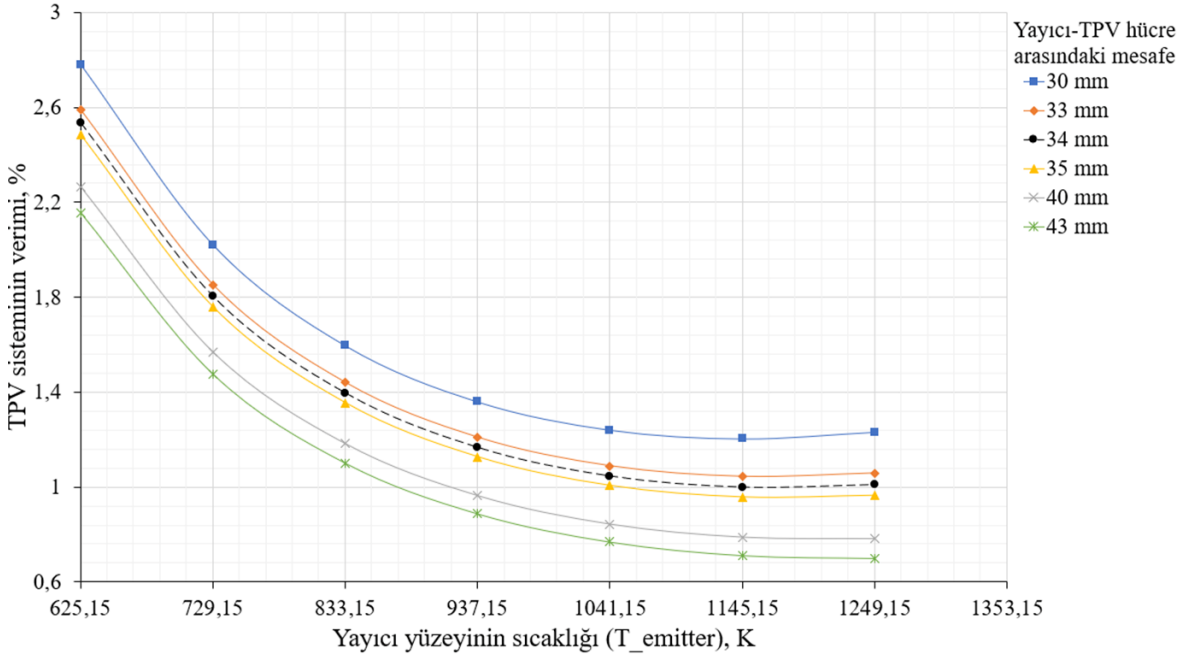
Bu optimizasyon için yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 30 mm, 33 mm, 34 mm, 35 mm, 40 mm ve 43 mm olarak belirlenmiştir. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe için elektrik güç yoğunluğu ve TPV sisteminin verimi, sırasıyla şekil 7.18'de ve şekil 7.19'da gösterilmektedir.



Şekil 7.18. Yaycı-TPV hücre arasındaki mesafe için elektrik güç yoğunluğu

Şekil 7.18'de görüldüğü gibi tüm mesafeler için yayıcı yüzeyinin sıcaklığı arttıkça elektrik güç yoğunluğu artmaktadır. Ayrıca, yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe azaldıkça elektrik güç yoğunluğu artmaktadır. Şekil 7.19'da görüldüğü gibi yayıcı yüzeyinin düşük sıcaklıklarında sistem verimi yüksektir. Bununla birlikte yayıcı yüzeyinin sıcaklığı arttıkça sistemin verimi, mesafelerin tamamı için azalmaktadır. Yayıcı-TPV hücre arasındaki

mesafeyi azaltarak hem daha yüksek elektrik güç yoğunluğu hem de daha yüksek sistem verimi elde edilebildiği not edilmelidir.



Şekil 7.19. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe için TPV sisteminin verimi

Yayıcı yüzey sıcaklığına göre yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe için elektrik güç yoğunluğu ve TPV sisteminin verim sonuçları, sırasıyla çizelge 7.7 ve çizelge 7.8'de verilmektedir.

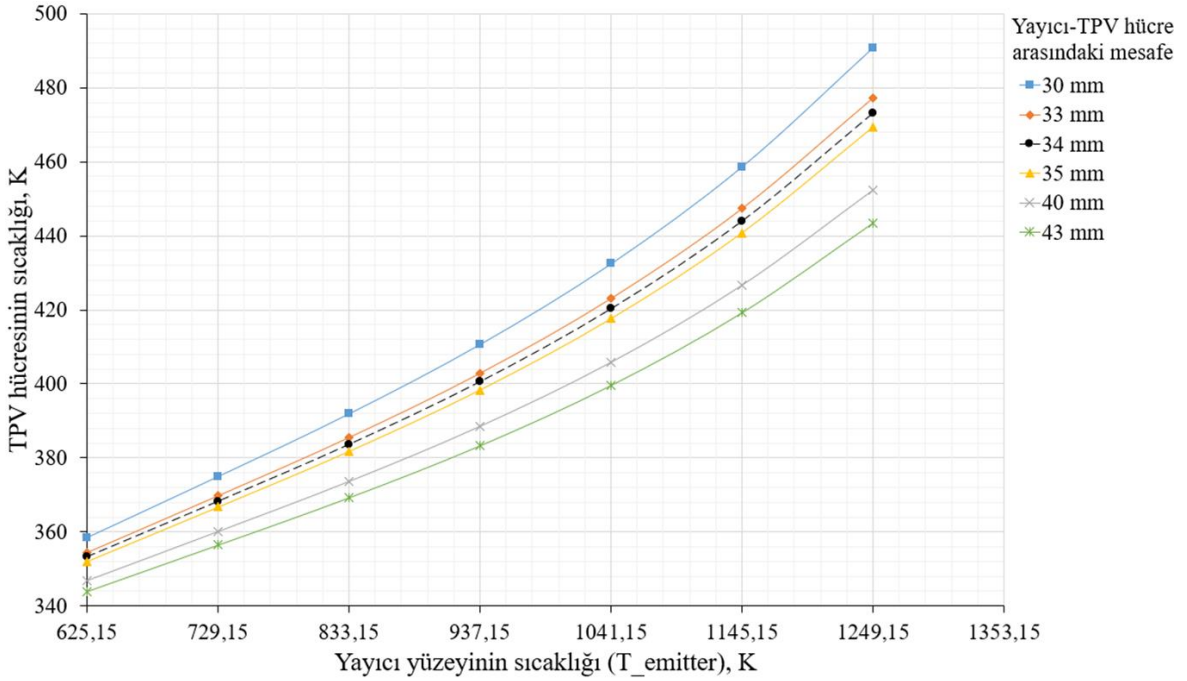
Çizelge 7.7. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafeye göre elektrik güç yoğunluğu sonuçları

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe, mm					
	30	33	34	35	40	43
	Elektrik güç yoğunluğu, W/m^2					
625,15	74,43	69,66	68,26	66,95	61,33	58,60
729,15	100,33	92,41	90,11	87,96	78,89	74,54
833,15	136,53	123,84	120,18	116,77	102,59	95,86
937,15	189,74	169,60	163,83	158,48	136,44	126,09
1041,15	271,02	238,96	229,84	221,37	186,92	170,90
1145,15	398,65	347,28	332,73	319,23	264,78	239,66
1249,15	603,76	520,87	497,45	475,68	388,57	348,55

Çizelge 7.8. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sisteminin verim sonuçları

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe, mm					
	30	33	34	35	40	43
	TPV sisteminin verimi, %					
625,15	2,78	2,59	2,54	2,48	2,26	2,16
729,15	2,02	1,85	1,80	1,76	1,57	1,48
833,15	1,60	1,44	1,40	1,35	1,18	1,10
937,15	1,36	1,21	1,17	1,13	0,96	0,89
1041,15	1,24	1,09	1,05	1,01	0,84	0,77
1145,15	1,20	1,04	1,00	0,96	0,79	0,71
1249,15	1,23	1,06	1,01	0,96	0,78	0,70

Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafeye göre yayıcı yüzeyinin sıcaklığı için TPV hücresinin sıcaklığı, şekil 7.20'de gösterilmektedir. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV hücresinin sıcaklık değerleri, çizelge 7.9'da verilmektedir. Şekil 7.20'de ve çizelge 7.9'da görüldüğü gibi mesafelerin tamamı için yayıcı yüzeyinin sıcaklığı arttıkça TPV hücresinin sıcaklığı artmaktadır. Bununla birlikte yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 30 mm veya 33 mm olduğunda TPV hücresinin sıcaklığı, üst sınır olarak belirlenen 475 K'in üzerine çıkmaktadır.

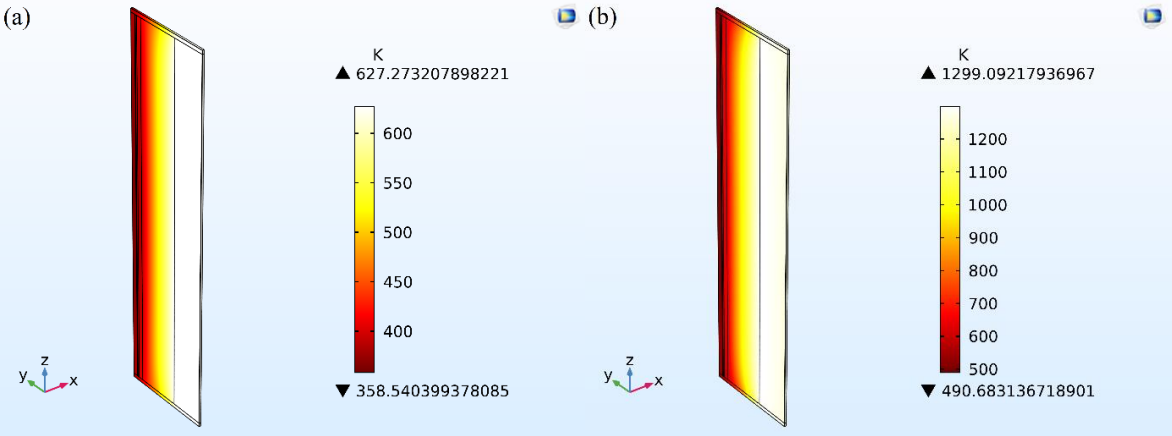


Şekil 7.20. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe için TPV hücresinin sıcaklığı

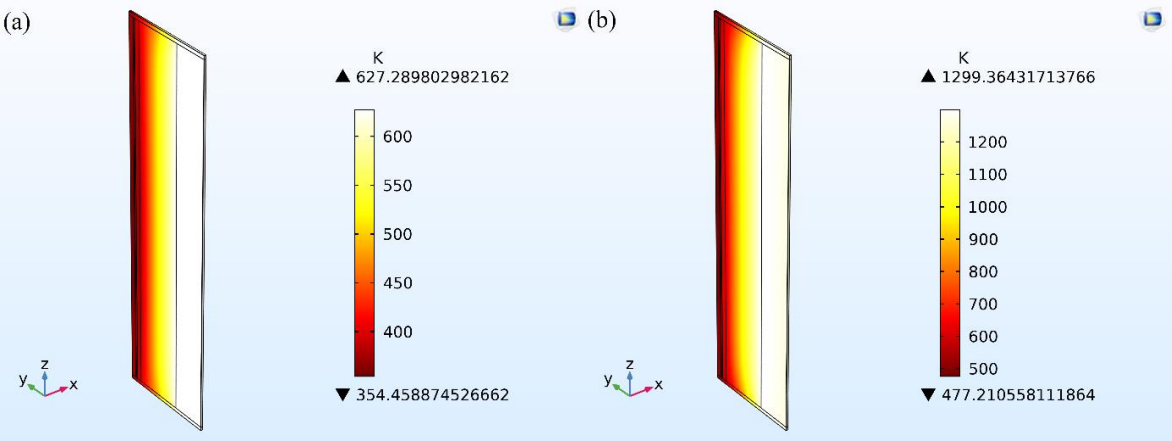
Çizelge 7.9. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sistemin sıcaklık değerleri

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe, mm					
	30	33	34	35	40	43
	TPV hücresinin sıcaklığı, K					
625,15	358,57	354,49	353,24	352,06	346,73	343,98
729,15	375,04	369,83	368,24	366,74	359,99	356,51
833,15	391,98	385,58	383,64	381,79	373,53	369,30
937,15	410,71	402,95	400,60	398,36	388,43	383,34
1041,15	432,49	423,16	420,33	417,63	405,73	399,64
1145,15	458,68	447,46	444,06	440,81	426,55	419,26
1249,15	490,86	477,37	473,28	469,36	452,26	443,51

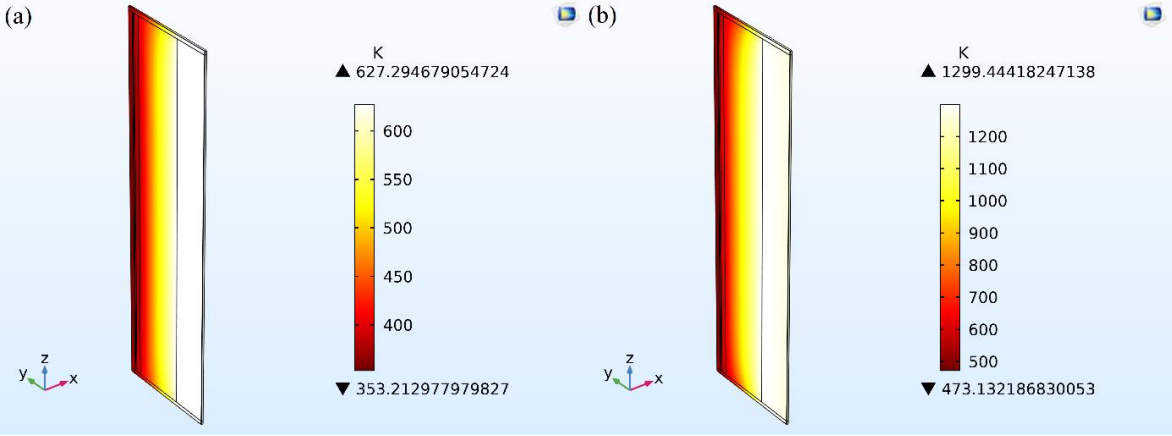
Yayıcı yüzeyinin belirlenen en düşük ve en yüksek sıcaklıklarında yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafeye göre TPV sisteminin sıcaklık alanları şekil 7.21'de, şekil 7.22'de, şekil 7.23'te, şekil 7.24'te, şekil 7.25'te ve şekil 7.26'da gösterilmektedir.



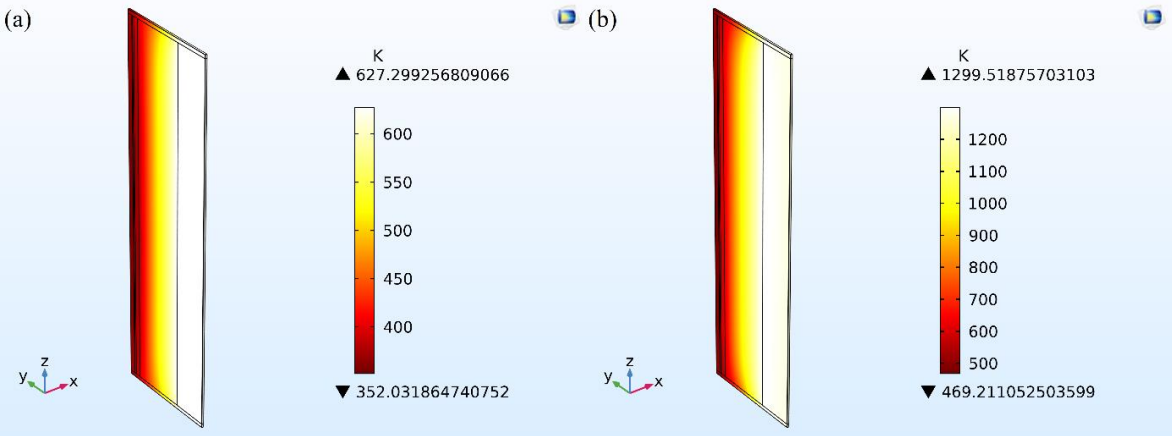
Şekil 7.21. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 30 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



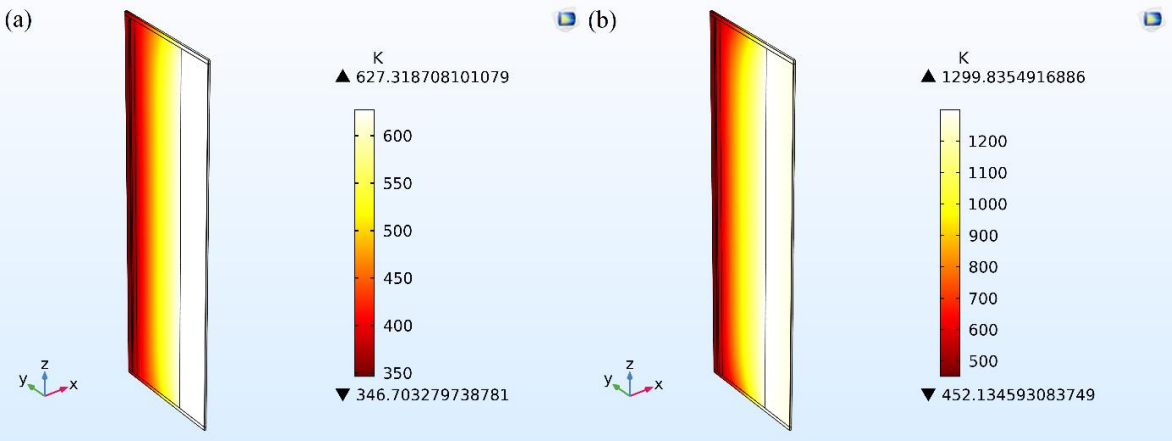
Şekil 7.22. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 33 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



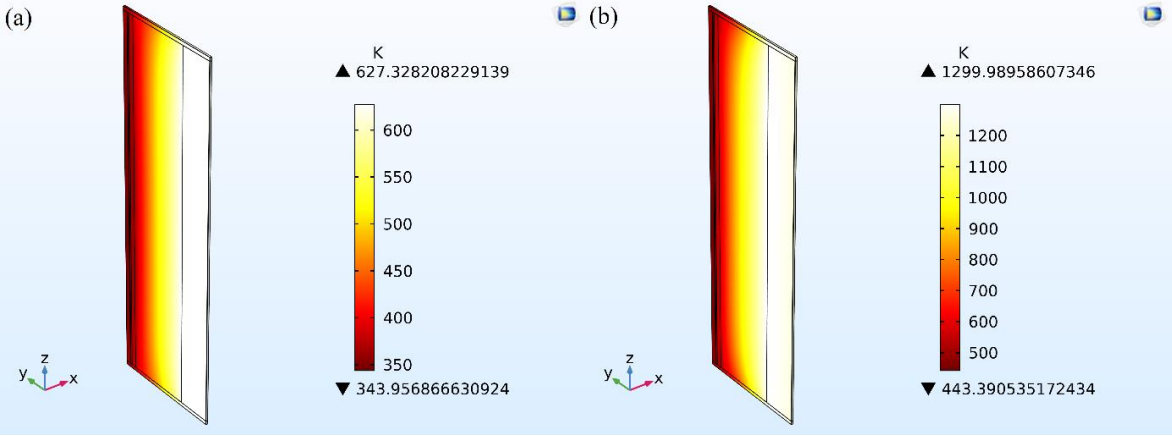
Şekil 7.23. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 34 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.24. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 35 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.25. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 40 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.26. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 43 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı

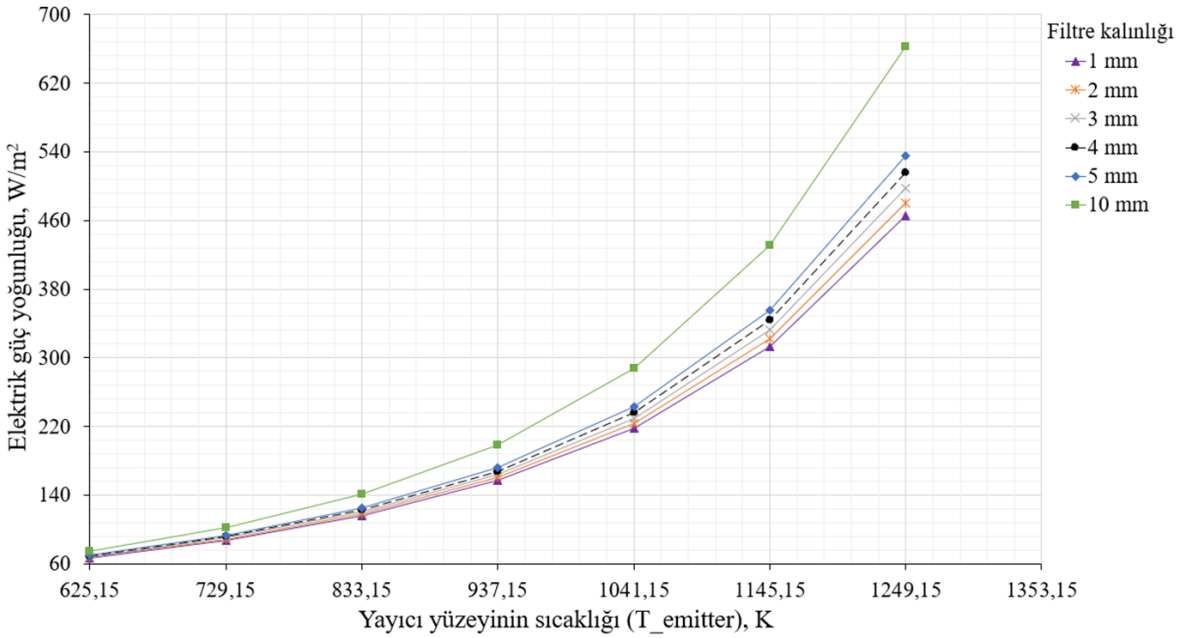
Şekil 7.21'de, şekil 7.22'de, şekil 7.23'te, şekil 7.24'te, şekil 7.25'te ve şekil 7.26'da görüldüğü gibi yayıcı yüzeyinin sıcaklığı için belirlenen en düşük ve en yüksek değerler sırasıyla 625,15 K ve 1249,15 K olmasına rağmen TPV sistem modelinin bazı bölgelerinde sıcaklık değerleri belirlenen bu sıcaklık değerlerin üzerine çıkmaktadır. Bu sıcaklık artışı yayıcı yüzeyinin dış bölümünde (yayıcının filtreye bakan yüzeyinde) meydana gelmektedir.

Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 34 mm olduğunda hem en yüksek elektrik güç yoğunluğu hem de en yüksek TPV sistem verimi, 475 K TPV hücre sıcaklığı aşılmadan elde edilmektedir. Bu nedenle yayıcı-TPV hücre arasındaki optimum mesafe 34 mm'dir ve bu mesafe bir sonraki sayısal çözümlemede kullanılmaktadır. Yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe 34 mm olduğunda elektrik güç yoğunluğu 68,26 W/m^2-497,45 W/m^2 arasında

değişmektedir. Ayrıca bu mesafe için TPV sisteminin verimi, belirlenen yayıcı yüzey sıcaklıklarında %1,01-2,54 aralığındadır.

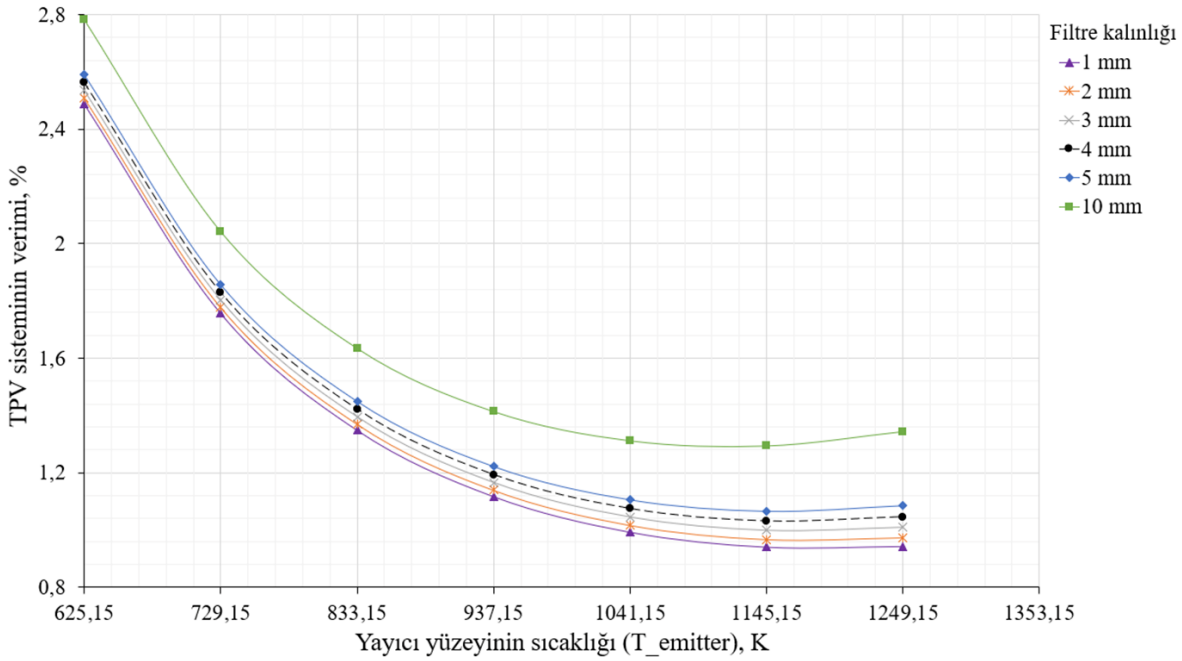
7.4. TPV Sisteminde Filtre Kalınlığının Optimizasyonu

Yayıcı kalınlığı, filtre-TPV hücre arasındaki ve yayıcı-TPV hücre arasındaki mesafe sırasıyla 20 mm, 1 mm ve 34 mm olarak önceki bölümlerde optimize edilmiştir. Bu değerler kullanılarak TPV sisteminde filtre kalınlığının optimizasyonu için filtre kalınlığı 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm ve 10 mm olarak belirlenmiştir. Filtre kalınlığının bu değerleri için TPV sisteminin elektrik güç yoğunluğu ve verimi, yayıcı yüzeyinin belirlenen sıcaklıkları için sırasıyla şekil 7.27 ve şekil 7.28'de gösterilmektedir.



Şekil 7.27. Filtre kalınlığı için elektrik güç yoğunluğu

Şekil 7.27'de görüldüğü gibi filtre kalınlıklarının tamamı için elektrik güç yoğunluğu yayıcı yüzey sıcaklığının artmasıyla artmaktadır. Buna ek olarak filtre kalınlığının artması elektrik güç yoğunluğunu da artırmaktadır. Diğer yandan, şekil 7.28'de görüldüğü gibi yayıcı yüzeyinin sıcaklığı artıkça TPV sisteminin verimi, filtre kalınlıklarının tamamı için azalmaktadır. Ayrıca her bir yayıcı yüzey sıcaklığı dikkate alındığında, kalın filtre kullanımı hem elektrik güç yoğunluğunu hem de TPV sisteminin verimini artırmaktadır.



Şekil 7.28. Fitre kalınlığı için TPV sisteminin verimi

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığına göre filtre kalınlığı için elektrik güç yoğunluğu ve TPV sisteminin verim sonuçları, sırasıyla çizelge 7.10'da ve çizelge 7.11'de verilmektedir.

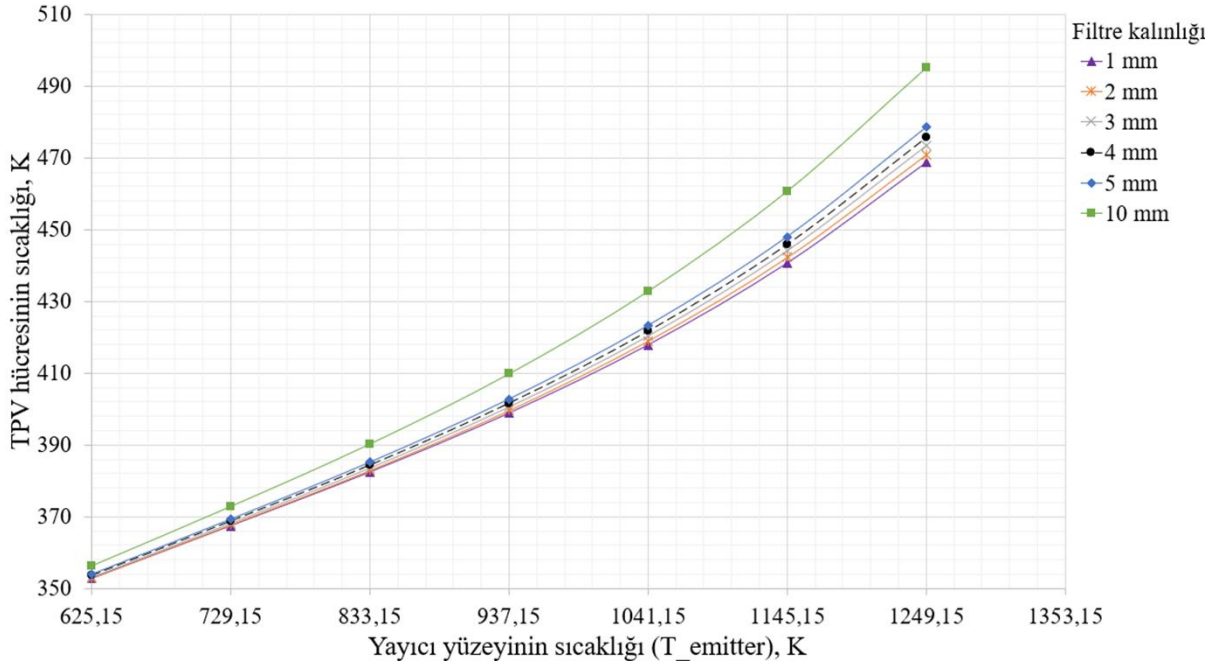
Çizelge 7.10. Filtre kalınlığına göre elektrik güç yoğunluğu sonuçları

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Filtre kalınlığı, mm					
	1	2	3	4	5	10
	Elektrik güç yoğunluğu, W/m^2					
625,15	66,98	67,60	68,26	68,97	69,75	74,75
729,15	87,79	88,91	90,11	91,41	92,82	101,89
833,15	116,15	118,09	120,18	122,43	124,87	140,59
937,15	156,99	160,29	163,83	167,67	171,81	198,52
1041,15	218,32	223,87	229,84	236,30	243,27	288,31
1145,15	313,39	322,71	332,73	343,58	355,29	430,96
1249,15	464,95	480,61	497,45	515,66	535,32	662,18

Çizelge 7.11. Filtre kalınlığına göre TPV sisteminin verim sonuçları

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Filtre kalınlığı, mm					
	1	2	3	4	5	10
	TPV sisteminin verimi, %					
625,15	2,49	2,51	2,54	2,56	2,59	2,78
729,15	1,76	1,78	1,80	1,83	1,86	2,04
833,15	1,35	1,37	1,40	1,42	1,45	1,64
937,15	1,12	1,14	1,17	1,19	1,22	1,41
1041,15	0,99	1,02	1,05	1,07	1,11	1,31
1145,15	0,94	0,97	1,00	1,03	1,07	1,29
1249,15	0,94	0,97	1,01	1,05	1,09	1,34

Filtre kalınlığına göre yayıcı yüzey sıcaklığı için TPV hücresinin sıcaklığı, şekil 7.29'da gösterilmektedir. Filtre kalınlığı için TPV hücresinin sıcaklık değerleri, çizelge 7.12'de verilmektedir. Şekil 7.29'da ve çizelge 7.12'de görüldüğü gibi TPV hücresinin sıcaklığı, filtre kalınlıklarının tamamı için yayıcı yüzeyinin sıcaklığı arttıkça artmaktadır. Filtre kalınlığının 4 mm veya üstünde olması durumunda TPV hücresinin sıcaklığı, üst sınır olarak belirlenen 475 K'in üzerine çıkmaktadır.

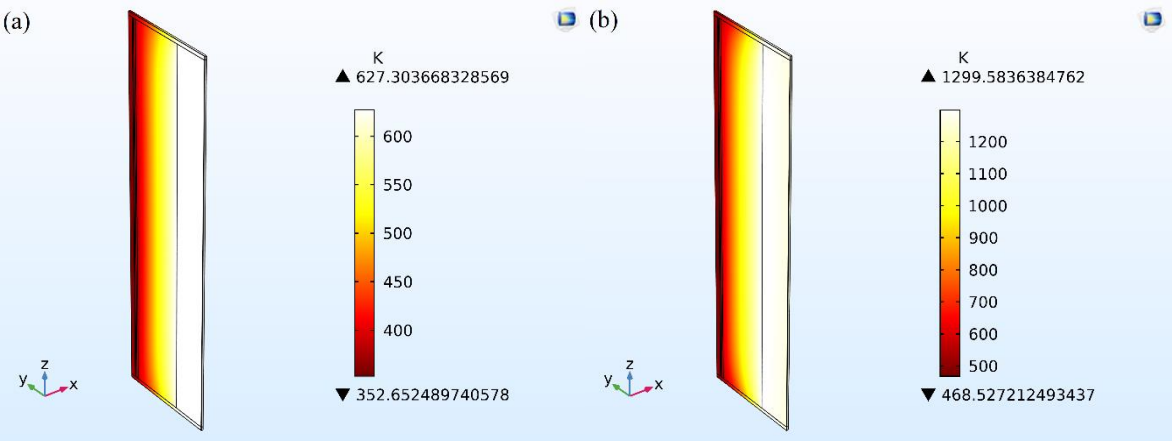


Şekil 7.29. Filtre kalınlığı için TPV hücresinin sıcaklığı

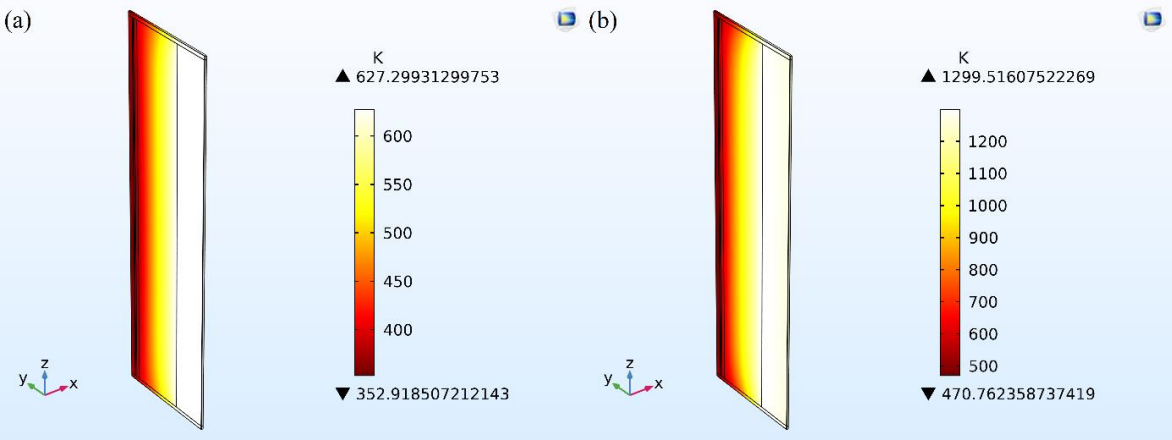
Çizelge 7.12. Filtre kalınlığına göre TPV sistemin sıcaklık değerleri

Yayıcı yüzeyinin sıcaklığı, K	Filtre kalınlığı, mm					
	1	2	3	4	5	10
	TPV hücresinin sıcaklığı, K					
625,15	352,68	352,94	353,24	353,57	353,94	356,36
729,15	367,37	367,79	368,24	368,75	369,31	372,93
833,15	382,35	382,97	383,64	384,37	385,17	390,31
937,15	398,78	399,66	400,60	401,63	402,75	409,85
1041,15	417,80	419,02	420,33	421,75	423,27	432,86
1145,15	440,62	442,28	444,06	445,98	448,03	460,75
1249,15	468,67	470,91	473,28	475,82	478,54	495,17

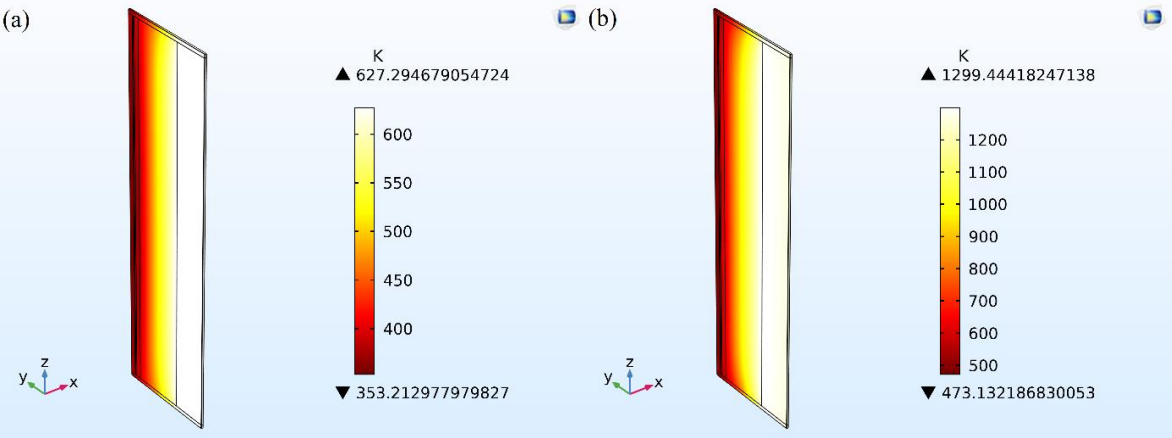
Yayıcı yüzeyinin belirlenen en düşük ve en yüksek sıcaklıklarında filtre kalınlığına göre TPV sisteminin sıcaklık alanları şekil 7.30'da şekil 7.31'de, şekil 7.32'de, şekil 7.33'te, şekil 7.34'te ve şekil 7.35'te gösterilmektedir.



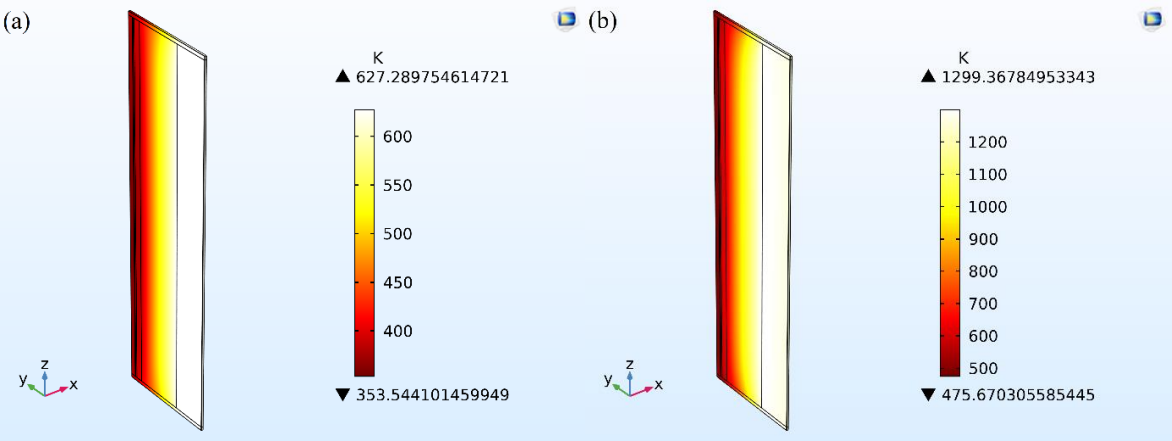
Şekil 7.30. Filtre kalınlığı 1 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



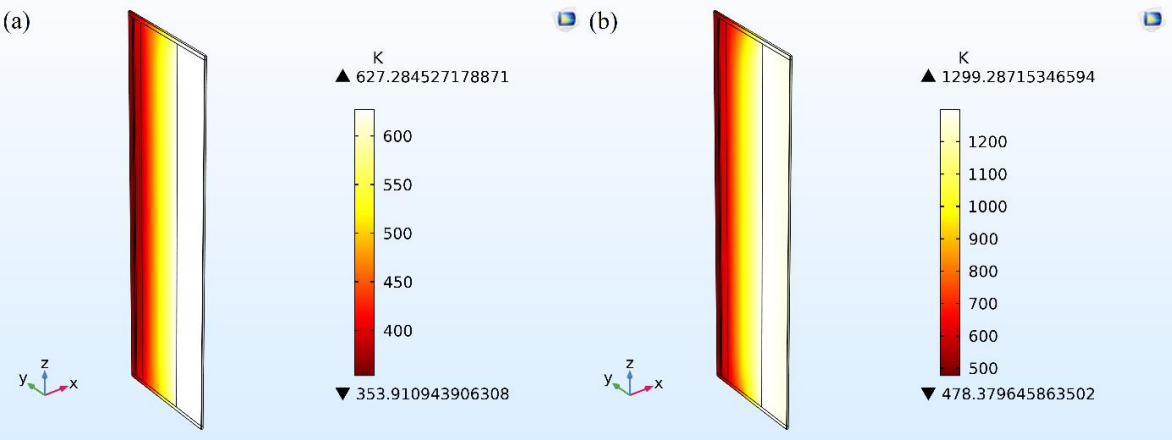
Şekil 7.31. Filtre kalınlığı 2 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



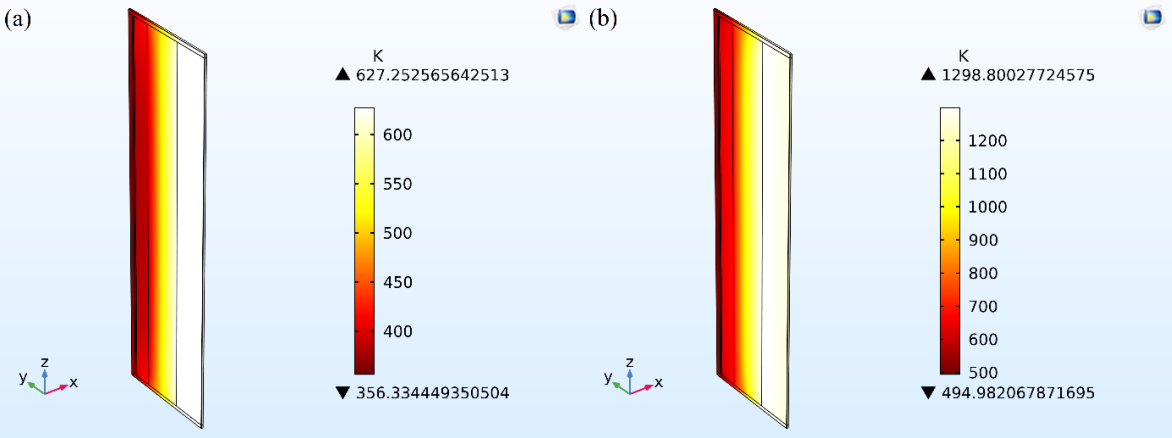
Şekil 7.32. Filtre kalınlığı 3 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.33. Filtre kalınlığı 4 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.34. Filtre kalınlığı 5 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı



Şekil 7.35. Filtre kalınlığı 10 mm olduğunda yayıcı yüzeyinin (a) en düşük (625,15 K) ve (b) en yüksek (1249,15 K) sıcaklığında TPV sisteminin sıcaklık alanı

Şekil 7.30'da şekil 7.31'de, şekil 7.32'de, şekil 7.33'te, şekil 7.34'te ve şekil 7.35'te görüldüğü gibi yayıcı yüzeyinin sıcaklığı için belirlenen en düşük ve en yüksek değerler sırasıyla 625,15 K ve 1249,15 K olmasına rağmen TPV sistem modelinin bazı bölgelerinde sıcaklık değerleri, önceki optimizasyonlarda olduğu gibi belirlenen bu sıcaklık değerlerinin üzerine çıkmaktadır. Bu sıcaklık artışı yayıcı yüzeyinin dış bölümünde (yayıcının filtreye bakan yüzeyinde) meydana gelmektedir.

Filtre kalınlığı 3 mm olduğunda hem en yüksek elektrik güç yoğunluğu hem de en yüksek TPV sistem verimi, 475 K TPV hücre sıcaklığı aşılmadan elde edilmektedir. Filtre kalınlığı 4 mm olması durumunda TPV hücresinin sıcaklığı, yayıcı yüzey sıcaklığı 1249,15 K'de üst sınır olarak belirlenen 475 K'i çok az bir sıcaklık değeri ile (0,82 K) aşmaktadır. Aşılan bu sıcaklık değeri TPV sistemindeki hücre için ihmal edilebilir bir değerdir. Bundan dolayı filtre için optimum kalınlık 4 mm olarak belirlenmiştir. Filtre kalınlığı 4 mm olduğunda elektrik güç yoğunluğu 68,97 W/m^2-515,66 W/m^2 arasında değişmektedir. Ayrıca, bu mesafe için TPV sisteminin verimi belirlenen yayıcı yüzey sıcaklıklarında %1,05-2,56 aralığındadır

8. SONUÇ

Bu çalışmada TPV sisteminin bir kombiye dahil edilmesi önerilmektedir. Çalışmada üç boyutlu bir model kullanılarak yayıcı yüzeyinin belirlenen sıcaklıklarında, tasarlanan TPV sistemi tarafından üretilen elektrik güç yoğunluğu ve tasarlanan bu TPV sisteminin verimi araştırılmaktadır. Çalışmada örnek olarak alınan kombi için bir TPV sistem modeli gerçekleştirilmektedir. Bu TPV sistem modeli, en yüksek güç yoğunluğunu ve sistemin en yüksek verimi elde edebilmesi için optimize edilmektedir. TPV sistem modelini optimize ederek yayıcının optimum kalınlığı, filtre-TPV hücre arasındaki optimum mesafe, yayıcı-TPV hücre arasındaki optimum mesafe ve filtrenin optimum kalınlığı sırasıyla 20 mm, 1 mm, 34 mm ve 4 mm olarak belirlenmektedir. Bu optimizasyon sayesinde TPV sistem modelinin elektrik güç yoğunluğu, yayıcı yüzeyinin belirlenen sıcaklıklarında 68,97 W/m^2-515,66 W/m^2 arasında değişmektedir. Ayrıca bu optimizasyon ile TPV sisteminin verimi, yayıcı yüzeyinin belirlenen sıcaklıklarında %1,05-2,56 aralığındadır.

Optimizasyon sonucunda TPV sisteminde kullanılan hücrenin alanı yaklaşık olarak 0,4 m^2'dir. TPV sistemi bu hücre alanıyla 27,588 W ile 206,264 W aralığında elektrik üretebilmektedir. Bu çalışmada örnek alınan kombinin elektrik tüketimi 123 W'tır. Bunlar dikkate alındığında kombiye yerleştirilen TPV sistemi, yayıcı yüzeyinin belirli sıcaklıklarında kombinin tükettiği elektrik miktarından daha fazla elektrik üretebilmektedir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Enerji bakanlığı ana sayfası. URL: https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik, Son Erişim Tarihi, 04.07.2019.

2. İnternet: Türkiye petrolleri anonim ortaklığı ana sayfası. URL: http://www.tpao.gov.tr/?mod=sektore-dair&contID=43, Son Erişim Tarihi, 13.09.2019.

3. Chubb, D. L., and Good, B. S. (2018). A combined thermophotovoltaic-thermoelectric energy converter. *Solar Energy*, *159*, 760-767.

4. Tang, L., Xu, C., Liu, Z., Lu, Q., Marshall, A., and Krier, A. (2017). Suppression of the surface "dead region" for fabrication of GaInAsSb thermophotovoltaic cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 163, 263-269.

5. Binidra, K., Miloua, R., Khadraoui, M., Kebbab, Z., Bouzidi, A., and Benramdane, N. (2018). Spectral control in thermophotovoltaic systems by optimized one-dimensional photonic crystals. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 156, 879-885.

6. Ferrari, C., Melino, F., Pinelli, M., Spina, P. R., and Venturini, M. (2014). Overview and status of thermophotovoltaic systems. *Energy Procedia*, 45, 160-169.

7. Daneshvar, H., Prinja, R., and Kherani, N. P. (2015). Thermophotovoltaics: Fundamentals, challenges and prospects. *Applied energy*, 159, 560-575.

8. Heide, J. V. D. (2012). *Thermophotovoltaics*. Belgium: Elsevier.

9. Bitnar, B., Durisch, W., and Holzner, R. (2013). Thermophotovoltaics on the move to applications. *Applied energy*, 105, 430-438.

10. Alipoor, A., and Saidi, M. H. (2017). Numerical study of hydrogen-air combustion characteristics in a novel micro-thermophotovoltaic power generator. *Applied Energy*, 199, 382-399.

11. Zhao, B., Chen, K., Buddhiraju, S., Bhatt, G., Lipson, M., and Fan, S. (2017). High-performance near-field thermophotovoltaics for waste heat recovery. *Nano Energy*, 41, 344-350.

12. Sansoni, P., Fontani, D., Francini, F., Jafrancesco, D., Gabetta, G., Casale, M., and Toniato, G. (2017). Evaluation of elliptical optical cavity for a combustion thermophotovoltaic system. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 171, 282-292.

13. Kim, J. M., Park, K. H., Kim, D. S., Hwang, B. Y., Kim, S. K., Chae, H. M., and Kim, Y. S. (2018). Design and fabrication of spectrally selective emitter for thermophotovoltaic system by using nano-imprint lithography. *Applied Surface Science*, 429, 138-143.

14. DeMeo, D. F. (2010). *A cryogenic thermal simulator and computer simulations for testing low temperature thermophotovoltaic cells*. Doctoral dissertation, Tufts University, Medford.

15. Xu, Y. (1998). *A study of thermal exchange in a thermophotovoltaic (TPV) system at moderate* temperature. Doctoral dissertation, University of Nevada, Nevada.

16. Licht, A. S. (2015). *A thermophotovoltaic catalytic flow reactor for portable power generation*. Master of science, Tufts University, Medford.

17. Shemelya, C. M. (2013). *Photonics: Photodiodes and metamaterials for thermophotovoltaics and photodetection* applications. Doctoral dissertation, Tufts University, Medford.

18. Pfiester, N. A. (2015). *Optimization of metamaterial selective emitters for use in thermophotovoltaic applications*. Doctoral dissertation, Tufts University, Medford.

19. Schroeder, K. L. (1998). *Performance optimization of thermophotovoltaic systems*. Doctoral dissertation, Auburn University, Auburn.

20. Shemelya, C. M. (2010). *Thermophotovoltaic enhancement: 2d photonic crystals to increase TPV* efficiencies, Master of science, Tufts University, Medford.

21. Önal, B. S., ve Utlu, Z. (19-22 Nisan 2017). *Endüstriyel sistemlerde yüksek sıcaklıklı atık ısı kazanım amaçlı termofotovoltaik uygulamalarında teorik modelleme*. 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.

22. Aybek, Ü. (2015). *Endüstriyel uygulamalarda atık ısılardan yararlanma yöntemlerinin belirlenmesi ve termofotovoltaik uygulama yapılması*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

23. Bernardi, M. P. (2016). *Numerical and experimental techniques for enhanced power generation in a nanoscale-gap thermophotovoltaic device*. Doctoral dissertation, University of Utah, Utah.

24. Lin, L. (2015). *Analysis of different selective thermal emitter designs for increasing the efficiency of thermophotovoltaic systems*. Master of science, University of Rhode Island, Rhode Island.

25. Saroop, S. (1999). *Recombination processes on low bandgap antimonides for thermophotovoltaic applications*. Doctoral dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, NY United States.

26. Bauer, T. (2006). *Thermophotovoltaic applications in the UK: Critical aspects of system design*. Doctoral dissertation, Northumbria University, Newcastle.

27. Astle, C. J. (2004). *Design and testing of a prototype thermophotovoltaic* system. Master of science, University of Alberta, Alberta.

28. El-Husseini, A. M. (1997). *Numerical modeling of thermophotovoltaic cells and systems*. Doctoral dissertation, Purdue University, West Lafayette.

29. Adair, P. L. (1997). *Design and fabrication of a thermophotovoltaic power generation unit*. Doctoral dissertation, Auburn University, Auburn.

30. Zierak, M. J. (1997). *Characterization and modeling of InGaAs and InGaSb thermophotovoltaic cells and materials*. Doctoral dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, New York.

31. Rahimi, N. (2014). *Design, fabrication and characterization of epitaxial and non-epitaxial thermophotovoltaic cells*. Doctoral dissertation, The University of New Mexico, New Mexico.

32. Anikeev, S. (2006). *Recombination processes in GaInAsSb and InGaAs materials for thermophotovoltaic applications*. Doctoral dissertation, Stony Brook University, New York.

33. Trifon, G. S. (2012). *Erbium doped ceramic nanofiber synthesis for thermophotovoltaic selective emitter applications*. Master of science, Southern Illinois University, Carbondale.

34. Walsh, T. A. (2009). *Metallic photonic crystals for thermophotovoltaic applications*. Doctoral dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, New York.

35. DeMeo, D. F. (2013). *Nanostructures and metaphotonics for thermophotovoltaic generation of electricity*. Doctoral dissertation, Tufts University, Medford.

36. Aljarrah, M. T. (2009). *Modeling and experimental validation of radiative heat transfer in porous nanocomposites as selective emitters for low temperature thermophotovoltaic systems*. Doctoral dissertation, The University of Akron, Ohio.

37. Movahed, H. F. (2016). *Gradient-doped thermophotovoltaic devices based on colloidal quantum dots*. Master of Applied Science, University of Toronto, Toronto.

38. Horner, S. G. (1994). *Spontaneous ordering in III-V semiconductors: optical spectroscopy studies of $GaInP_2$ and proposal for a second generation Ga_2AsSb thermophotovoltaic power generator*. Doctoral dissertation, University of Colorado, Colorado.

39. Notaro, D. S. (2009). *Silicon carbide thin film radiators and gallium antimonide photovoltaic device layers on ceramic substrates for solar-thermophotovoltaic application*. Doctoral dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, New York.

40. Bhusal, L. (2006). *Short period strain balanced gallium arsenide nitride/indium arsenide nitride superlattice lattice matched to indium phosphide for mid-infrared* photovoltaics. Doctoral dissertation, University of Houston, Houston.

41. Efendi, B. K. (2017). *Dar bantlı GaInAsSb termofotovoltaik yapıların elektrik ve optik özelliklerinin* incelenmesi. Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

42 Çengel, Y. A. (2011). *Isı ve kütle transferi: Pratik bir yaklaşım* (Üçüncü baskı). İzmir: İzmir Kitabevi.:

43. Kılıç, M., ve Yiğit, A. (2008). *Isı transferi* (Dördüncü baskı). İstanbul: Alfa Aktüel Yayınları.

44. Callister, W. D., ve Rethwisch D. R. (2015). *Malzeme bilimi ve mühendisliği* (Sekizinci Baskı). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

45. Kocaman, B. (2019). Uzay radyasyonu. *Bilim ve Teknik*, 623: 52-64.

46. Modest, M.M. (1993). *Radiative heat transfer* (Third edition). New York: McGraw-Hill.

47. Siegel, R., and Howell, J. (2001). *Thermal radiation heat transfer* (Fourth edition). Washington: Taylor-Francis.

48. Biter, P. J., Georg, K. A., and Phillips, J. E. (1997). *A TPV system using a gold filter with $CulnSe_2$ solar cells. 3rd NREL Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity,* New York.

49. Modest, M. F. (1999). *The CRC handbook of thermal engineering*. London: CRC Press.

50. Gombert, A. (2003). *An overview of TPV emitter technologies. 5th Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity,* New York.

51. Shackelford, J. F. (2014). *Introduction to materials science for engineers* (Seventh edition). London: Pearson higher education.

52. Erol, A., ve Balkan, N. (2013). *Yarıiletkenler ve optoelektronik uygulamaları* (İkinci baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık.

53. Efendi, B. K. (2017). *Dar bantlı GaInAsSb termofotovoltaik yapıların elektrik ve optik özelliklerinin incelenmesi*. Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

54. Mao, L., and Ye, H. (2010). New development of one-dimensional Si/SiO_2 photonic crystals filter for thermophotovoltaic applications. *Renewable Energy*, 35(1), 249-256.

55. Datas, A., and Vaillon, R. (2019). Thermionic-enhanced near-field thermophotovoltaics. *Nano Energy*, 61, 10-17.

56. Silva-Oelker, G., Jerez-Hanckes, C., and Fay, P. (2019). High-temperature tungsten-hafnia optimized selective thermal emitters for thermophotovoltaic applications. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 231, 61-68.

57. Tuley, R. S., and Nicholas, R. J. (2010). Band gap dependent thermophotovoltaic device performance using the InGaAs and InGaAsP material system. *Journal of Applied Physics*, 108(8), 084516.

58. Weinberg, F. (1996). Heat-recirculating burners: principles and some recent developments. *Combustion science and technology*, 121(1-6), 3-22.

59. Horne, W. E., Morgan, M. D., Sundaram, V. S., and Butcher, T. (2003). 500-watt diesel fueled TPV portable power supply. *In AIP conference proceedings*, 653(1), 91-100.

60. Williams, D. J., and Fraas, L. M. (1996). Demonstration of a candle powered radio using GaSb thermophotovoltaic cells. *In AIP Conference Proceedings*, 358(1), 134-137.

61. Nelson, R. E. (1995). Thermophotovoltaic emitter development. *In AIP Conference Proceedings*, 321(1), 80-96.

62. Nam, Y., Yeng, Y. X., Lenert, A., Bermel, P., Celanovic, I., Soljačić, M., and Wang, E. N. (2014). Solar thermophotovoltaic energy conversion systems with two-dimensional tantalum photonic crystal absorbers and emitters. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 122, 287-296.

63. Guazzoni, G. E. (1972). High-temperature spectral emittance of oxides of erbium, samarium, neodymium and ytterbium. *Applied Spectroscopy*, 26(1), 60-65.

64. Krishna, M. G., Rajendran, M., Pyke, D. R., and Bhattacharya, A. K. (1999). Spectral emissivity of ytterbium oxide-based materials for application as selective emitters in thermophotovoltaic devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 59(4), 337-348.

65. Lu, Q., Zhou, X., Krysa, A., Marshall, A., Carrington, P., Tan, C. H., and Krier, A. (2018). InAs thermophotovoltaic cells with high quantum efficiency for waste heat recovery applications below 1000 °C. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 179, 334-338.

66. Chubb, D. (2007). *Fundamentals of thermophotovoltaic energy conversion* (First edition). Cleveland: Elsevier.

67. Torsello, G., Lomascolo, M., Licciulli, A., Diso, D., Tundo, S., and Mazzer, M. (2004). The origin of highly efficient selective emission in rare-earth oxides for thermophotovoltaic applications. *Nature Materials*, 3(9), 632.

68. Bauer, T. (2011). *Thermophotovoltaics: Basic principles and critical aspects of system design*. Stuttgart: Springer.

69. Licciulli, A., Diso, D., Torsello, G., Tundo, S., Maffezzoli, A., Lomascolo, M., and Mazzer, M. (2003). The challenge of high-performance selective emitters for thermophotovoltaic applications. *Semiconductor Science and Technology*, 18(5), S174.

70. Tobler, W. J., and Durisch, W. (2008). High-performance selective Er-doped YAG emitters for thermophotovoltaics. *Applied Energy*, 85(6), 483-493.

71. Celanovic, I., O'Sullivan, F., Jovanovic, N., Qi, M., and Kassakian, J. G. (2004). 1D and 2D photonic crystals for thermophotovoltaic applications. *In Photonic Crystal Materials and Nanostructures*, 5450, 416-422.

72. Bendelala, F., Cheknane, A., and Hilal, H. (2018). Enhanced low-gap thermophotovoltaic cell efficiency for a wide temperature range based on a selective meta-material emitter. *Solar Energy*, 174, 1053-1057.

73. Zeyghami, M., Stefanakos, E., and Goswami, D. Y. (2017). Development of one-dimensional photonic selective emitters for energy harvesting applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 163, 191-199.

74. Zhao, B., Wang, L., Shuai, Y., and Zhang, Z. M. (2013). Thermophotovoltaic emitters based on a two-dimensional grating/thin-film nanostructure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 637-645.

75. Ferguson, L. G., and Dogan, F. (2001). A highly efficient NiO-Doped MgO matched emitter for thermophotovoltaic energy conversion. *Materials Science and Engineering*, B 83(1-3), 35-41.

76. Kiziltas, G., Volakis, J. L., and Kikuchi, N. (2005). Design of a frequency selective structure with inhomogeneous substrates as a thermophotovoltaic filter. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 53(7), 2282-2289.

77. Fourspring, P. M., and DePoy, D. M. (2007). Spectral Control for Thermophotovoltaic Energy Conversion. *Knolls Atomic Power Laboratory*, Niskayuna, NY.

78. Vigil, O., Ruiz, C. M., Seuret, D., Bermúdez, V., and Diéguez, E. (2005). Transparent conducting oxides as selective filters in thermophotovoltaic devices. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17(41), 6377.

79. Mao, L., and Ye, H. (2010). New development of one-dimensional Si/SiO_2 photonic crystals filter for thermophotovoltaic applications. *Renewable Energy*, 35(1), 249-256.

80. Mostafa, S. I., Rafat, N. H., and El-Naggar, S. A. (2012). One-dimensional metallic-dielectric (Ag/SiO_2) photonic crystals filter for thermophotovoltaic applications. *Renewable Energy*, 45, 245-250.

81. Khosroshahi, F. K., Ertürk, H., and Mengüç, M. P. (2017). Optimization of spectrally selective Si/SiO_2 based filters for thermophotovoltaic devices. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 197, 123-131.

82. Durisch, W., and Bitnar, B. (2010). Novel thin film thermophotovoltaic system. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(6), 960-965.

83. Lal, N. N., and Blakers, A. W. (2009). Sliver cells in thermophotovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(2), 167-175.

84. Bitnar, B. (2003). Silicon, germanium and silicon/germanium photocells for thermophotovoltaics applications. *Semiconductor Science and Technology*, 18(5), S221.

85. Mattarolo, G. (2007). *Development and modelling of a thermophotovoltaic system*. Vol. 8, Germany: Kassel university press GmbH.

86. Royne, A., Dey, C. J., and Mills, D. R. (2005). Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86(4), 451-483.

87. Tedah, I. A. O., Maculewicz, F., Wolf, D. E., and Schmechel, R. (2019). Thermoelectrics versus thermophotovoltaics: two approaches to convert heat fluxes into electricity. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(27), 275501.

88. Ferrari, C., and Melino, F. (2014). Thermo–photo–voltaic generator development. *Energy Procedia*, 45, 150-159.

89. Basu, S., Chen, Y. B., and Zhang, Z. M. (2007). Microscale radiation in thermophotovoltaic devices-a review. *International Journal of Energy Research*, 31(6-7), 689-716.

90. Bauer, T., Forbes, I., Penlington, R., and Pearsall, N. (2005). Heat transfer modelling in thermophotovoltaic cavities using glass media. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 88(3), 257-268.

91. İnternet: SolidWorks ana sayfası. URL: https://discover.solidworks.com/tr / solidworks-products?mktid=7755&gclid=Cj0KCQiAmsrxBRDaARIsANyiD1ppdr7iFp6IMyPTmEKWq0jPjPgVqRsxFsi7HF2LMKbWGaT0E9A0oMEaAnwQEALw_wcB,Son Erişim Tarihi, 30.03.2020.

92. İnternet: Comsol Multiphysics ana sayfası. URL: https://www.comsol.com /documentation, son erişim tarihi, Son Erişim Tarihi 30.03.2020.

93. Kostić, L. T., Pavlović, T. M., and Pavlović, Z. T. (2010). Optimal design of orientation of PV/T collector with reflectors. *Applied Energy*, 87(10), 3023-3029.

94. Wang, G., Tang, P., Li, Y., Xu, J., and Durst, F. (2019). Flame front stability of low calorific fuel gas combustion with preheated air in a porous burner. *Energy*, 170, 1279-1288.

95. Liu, Z., and Qiu, K. (2017). A TPV power system consisting of a composite radiant burner and combined cells. *Energy*, 141, 892-897.

96. Bermel, P., Ghebrebrhan, M., Chan, W., Yeng, Y. X., Araghchini, M., Hamam, R., and Johnson, S. G. (2010). Design and global optimization of high-efficiency thermophotovoltaic systems. *Optics Express*, 18(103), A314-A334.

97. Ionescu, V. (2018). Geometry optimization of a thermophotovoltaic system using the finite element method. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 400, No. 4, p. 042033.

98. Zuo, W., Jiaqiang, E., Han, D., and Jin, Y. (2017). Numerical investigations on thermal performance of double-layer four-channel micro combustors for micro-thermophotovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 150, 343-355

99. Timans, P. J. (1993). Emissivity of silicon at elevated temperatures. *Journal of Applied Physics*, 74(10), 6353-6364.

100. Weber, W. P., Quirk, J. F., Lemmon Jr, A. W., and Filbert Jr, R. B. (1957). *Properties of Beryllium Oxide and Carbides of Beryllium, Molybdenum, Niobium, Tantalum, and Titanium* (Twelfth edition). Ohio: Battelle Memorial Institute.

101. İnternet: ECA'nın ana sayfası. URL: https://www.eca.com.tr / isitma- sogutma / kombiler / konvansiyonel / e-c-a-confeo- plus / confeo-plus-kullanim-kilavuzu.pdf, Son Erişim Tarihi, 13.02.2020.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: İŞYARLAR, Barış
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 07.09.1979, Rize
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (553) 607 67 61
e-posta	: isyarlar@odu.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	Devam Ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğitimi	2007
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğitimi	2003

Yabancı Dil

İngilizce

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009- Halen	Ordu Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yayınlar

1. İşyarlar, B., Menlik, T., and Sözen, A. (2020). Evaluation of applicability of thermophotovoltaic system in combi Boiler. *Journal of Polytechnic*, 23(2), 581-586.

İlgi Alanları

Spor



GAZİ GELECEKTİR...