EÜ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EGE ÜNİVERSİTESİ

DOKTORA TEZİ

PV-TERMAL KOLEKTÖRLERİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE VERİMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Halil İbrahim DAĞ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Günnur KOÇAR

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 02.11.2015

Bornova-İZMİR
2015

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

PV-TERMAL KOLEKTÖRLERİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE VERİMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Halil İbrahim DAĞ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Günnur KOÇAR

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 02.11.2015

Bornova-İZMİR

2015

Halil İbrahim DAĞ tarafından Doktora tezi olarak sunulan "**PV-Termal Kolektörlerin Tasarımı, Üretimi ve Verimini Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi**" başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 02 / 11 / 2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/~~oy çokluğu~~ ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri :		**İmza**
Jüri Başkanı	**: Prof. Dr. Günnur KOÇAR**	.....
Raportör Üye	**: Yrd. Doç. Ahmet ERYAŞAR**	.....
Üye	**: Prof. Dr. Serdar KARADENİZ**	.....
Üye	**: Doç. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL**	.....
Üye	**: Doç. Dr. Mutlu BOZTEPE**	.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum "PV-Termal Kolektörlerin Tasarımı, Üretimi ve Verimini Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesi" başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

02 / 11 / 2015

Halil İbrahim DAĞ

ÖZET

PV-TERMAL KOLEKTÖRLERİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE VERİMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

DAĞ, Halil İbrahim

Doktora Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Günnur KOÇAR
Kasım 2015, 137 Sayfa

Bu tez çalışmasında, güneş enerjisini hem elektrik hem de termal enerjiye dönüştüren su tipli fotovoltaik/termal (PV/T) modüller incelenmiştir. Bu amaçla, özdeş fotovoltaik (PV) hücrelerin kullanıldığı, fakat farklı soğurucu borusu çaplarında, sayılarında, dizilimlerinde ve farklı tabaka tiplerindeki termal kısım yapılarının kullanıldığı 5 adet PV/T modül üretilmiştir. Termal kısım ile PV modül laminasyon tekniği kullanılarak birleştirilmiştir. Ayrıca, bir PV modül ile PV/T modüllerin elektriksel performanslarının karşılaştırılması amacı ile PV/T modül üretiminde kullanılan PV hücrelerle özdeş özelliklere sahip hücreler kullanılarak 1 adet PV modül üretilmiştir. İlk olarak, hazırlanmış olan 6 adet numunenin Standart Test Koşullarındaki (STC) elektriksel verimleri, güneş simülatöründe yapılan Akım-Voltaj ölçümlerinden belirlenmiştir. STC'deki verim değerleri % 12.56 ile %12.68 arasında bulunmuştur. Daha sonra, dış ortam koşullarında PV modüller üzerinde sıcaklığın etkisinin araştırılması, PV/T modülün hem elektriksel hem de termal veriminin incelenmesi amacı ile kurulan deney düzeneği ile 01.04.2012 - 30.09.2012 tarihleri arasında ölçümler yapılmıştır. Numunelerin verimini hesaplamak için, PV ve PV/T modüllere gelen güneş ışınımı, üretilen voltaj ve akım değeri, PV/T modüle giren ve çıkan su sıcaklıkları ve debisi ve ortam sıcaklığı gibi parametreler ölçülmüştür. PV modülün yüksek çalışma sıcaklıklarında elektriksel dönüşüm veriminin, fotovoltaik hücre akımındaki az artışa karşın voltajındaki daha fazla azalış nedeniyle, önemli bir oranda düştüğü gözlenmiştir. PV/T modüldeki su dolaşımının, hücreleri soğutması sebebi ile elektriksel performanslarının PV modüle göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Dış ortam koşullarında modüllerin en yüksek toplam verim değerleri (elektrik+termal) % 60.68 ile % 67.14 arasında bulunmuştur. Böylece, numuneler arasından en verimli olanı seçilmiştir. PV/T üretiminde laminasyon tekniğinin kullanılması, termal kısım ile PV hücreler arasında iyi bir temas ve buna bağlı olarak iyi bir ısı iletimi sağlaması, elektriksel ve termal verimlerinin yükselmesine sebep olmuştur. Çalışmada, PV/T modüllerin bir biyogaz sisteminde kullanımı ile ilgili olarak da önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, fotovoltaik, fotovoltaik/termal (PV/T), termal kolektör, termal verim, elektriksel verim, biyogaz sistemi.

ABSTRACT

DESIGN, PRODUCTION AND DETERMINATION OF PARAMETERS WHICH EFFECTS EFFICIENCY OF PV-THERMAL MODULES

DAĞ, Halil İbrahim

Ph. D. in Department of Solar Energy
Supervisor: Prof. Dr. Günnur KOÇAR
November 2015, 137 pages

In this study, Photovoltaic/Thermal (PV/T) modules which can convert solar energy both to heat and electrical energy were investigated. Hence, during the production of 5 different PV/T modules, identical photovoltaic (PV) cells were used, however different diameter, quantity and design of absorber pipes and absorber sheets were used. Thermal absorber and PV module were attached each other with lamination method. Additionally 1 unit PV module were produced with identical photovoltaic cells used in PV/T modules due to compare electrical efficiency. As first step, electrical efficiencies of 6 samples were determined from the results of I/V testing in STC (Standard Test Conditions) with solar flash testing unit. In standard test conditions efficiency results were between 12.56% and 12.68%. With the experimental system for investigating both electrical and thermal efficiency of PV and PV/T modules, measurements were performed in between 01.04.2012 – 30.09.2012. Due to calculate efficiencies, some parameters were measured such as sun radiation, output of current & voltage of all samples, input and output temperature of liquid in PV/T modules and its flowrate and ambient temperature. It was figured out that electrical conversion efficiency of PV module under higher working temperatures decreased remarkably because of the decrease rate on solar cell voltage was higher than the increase of solar cell current. It is also seen that PV/T modules' electrical efficiencies were higher than PV module's efficiency with the cooling effect of water flow. Under outdoor conditions, PV/T modules' highest efficiencies (electrical and thermal) were obtained between 60.68% and 67.14%. Overall, the most efficient sample were designated among PV/T samples. The reason of increased efficiencies is lamination method which caused better contact and thermal conductivity between PV cells and thermal absorber. Furthermore, it was proposed the way of using PV/T modules in a biogas system.

Keywords: Solar energy, photovoltaic, photovoltaic/thermal (PV/T), thermal collector, thermal efficiency, electrical efficiency, biogas system.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun seçimi, deneylerin yapılması, sonuçların değerlendirilmesi ve tezin düzenlenmesi hususlarında bana yardımları ile her türlü desteği sağlayan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Günnur KOÇAR'a çok teşekkür ederim. Ayrıca, numunelerin hazırlanmasında desteklerini esirgemeyen Solimpeks Enerji A.Ş.'ye ve çalışanlarına, çalışmalarım sırasında her zaman yol gösterici olan Tez İzleme Komitesi üyeleri Sayın Doç. Dr. Ö. Faruk YÜKSEL'e ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet ERYAŞAR'a şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vii

ABSTRACT ix

ŞEKİLLER DİZİNİ xv

ÇİZELGELER DİZİNİ xxii

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xxiii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÖZETİ 9

2.1 Güneş ve Güneş Açıları 9

2.2 Fotovoltaik Güneş Hücreleri 13

2.2.1 Güneş hücresinin temel yapısı 13

2.2.2 Işıma altında güneş hücresi 18

2.3 Fotovoltaik Modül 25

2.3.1 Fotovoltaik modülün yapısı 25

2.3.2 Fotovoltaik modülün elektriksel karakteristiği 27

2.4 Düzlemsel Güneş Kolektörleri 30

2.4.1 Düzlemsel güneş kolektörlerinin yapısı 30

2.4.2 Düzlemsel güneş kolektörlerinin termal analizi 35

2.5 Fotovoltaik/Termal (PV/T) Modüller 41

2.5.1 Hava tipli PV/T modüller 42

2.5.2 Su tipli PV/T modüller 43

2.6 Biyogaz Sistemleri 44

2.6.1 Biyogaz nedir 44

2.6.2 Biyogaz teknolojisinin avantajları 44

2.6.3 Biyogazın kullanım alanları 45

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.6.4 Biyogaz üretiminde kullanılabilen materyaller 45

2.6.5 Biyogaz oluşum aşamaları 46

2.6.6 Biyogaz oluşumuna etki eden faktörler 46

2.6.7 Biyogaz reaktör tipleri 48

2.7 Tez Konusu İle İlgili Çalışmalar 49

3. MATERYAL VE METOD 57

3.1 Numunelerin Hazırlanması 57

3.2 Deneysel Ölçüm Sistemleri 70

3.2.1 Numunelerin standart test koşullarında (STC) veriminin ölçümü 71

3.2.2 Numunelerin performans ölçümleri 71

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 75

4.1 Standart Test Koşullarındaki Verim Ölçüm Sonuçları 75

4.2 Güneş Işınımı Ölçüm Sonuçları 79

4.3 Elektriksel Performans Ölçüm Sonuçları 84

4.4 Termal Performans Ölçüm Sonuçları 95

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 127

KAYNAKLAR DİZİNİ 129

ÖZGEÇMİŞ 135

EKLER .....

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

1.1. Dünya enerji kullanımının kaynaklara göre dağılımı 1

1.2. Türkiye güneş ışınımı değerlerinin aylara göre değişimi..... 2

1.3. Türkiye güneşlenme sürelerinin aylara göre değişimi 3

1.4. Türkiye güneş haritası..... 3

1.5. Dünya PV toplam kapasitesinin 2004-2014 yılları arasındaki dağılımı 5

1.6. En fazla PV kapasitesine sahip ilk on ülke ve 2014 kapasite artışları 6

1.7. Dünya'da kurulu toplam termal güç kapasitesinin 2004-2014 yılları arasındaki dağılımı..... 6

1.8. Dünya'da kurulu toplam termal güç kapasitesinin ülkelere göre dağılımı 7

2.1. Güneş ışınım spektrumu 9

2.2. Global ışınım bileşenleri..... 10

2.3. Deklinasyon açısı δ, enlem açısı ϕ ve saat açısı ω 11

2.4. a) Bor (B) katkılanmış, b) Fosfor (P) katkılanmış silisyum kristali 14

2.5. a) Homoeklemi oluşturan yarıiletken malzemelerin band yapısı,

b) heteroeklemi oluşturan yarıiletken malzemelerin band yapısı..... 15

2.6. a) pn eklemde boşaltılmış bölge, elektrik alan oluşumu,

b) pn homoeklem enerji band yapısı..... 16

2.7. pn eklem diyodun, a) doğru ve ters beslem durumu, b) doğru ve ters beslem altında eklem potansiyeli, c) doğru ve ters beslem altında enerji band diagramı 17

2.8. Bir pn eklem diyotun ideal I-V karakteristiği..... 18

2.9. Güneş hücresinde elektron-deşik çifti oluşumu..... 19

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

2.10. Bazı yarıiletkenler için foton enerjisinin fonksiyonu olarak soğurma katsayısı 20

2.11. Güneş hücresinin ışıma altında ve karanlıktaki akım-voltaj karakteristiği 21

2.12. Güneş hücresinin eşdeğer devresi 22

2.13. Güneş hücrelerinin yıllara göre verimlilik değerlerinin gelişimi 24

2.14. Güneş hücrelerinin a) seri bağlantı şeması b) paralel bağlantı şeması 25

2.15. PV modül ve katmanlı iç yapısının görünümü 26

2.16. Bir PV modülün elektriksel karakteristiğinde önemli olan parametreler 27

2.17. PV modülün farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği 28

2.18. PV güneş hücresi ve modül verimlilikleri 30

2.19. Düzlemsel güneş kolektörü şeması 31

2.20. Kolektör boru–soğurucu tabaka bağlantı şekilleri 34

2.21. Kolektör borularının dolaştırılma şekilleri 35

2.22. Düzlemsel güneş kolektörünün termal analiz şeması 36

2.23. Güneş kolektörü veriminin işletme noktası parametresine göre tipik değişimleri 39

2.24. Soğurucu tabakanın şematik gösterimi 40

2.25. PV modül, termal kolektör ve PV/T modülün kıyaslanması 42

2.26. Hava tipli PV/T modülün basit modeli 42

2.27. Hava tipli PV/T modülün uygulama örnekleri 43

2.28. Su tipli PV/T modülün basit modeli 44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

2.29. Psikrofilik, mezofilik ve termofilik metan bakterilerinin büyüme oranları 48

3.1. PV hücrelerin stringer makinasında fiziksel kontrolü. 58

3.2. PV hücrelerin seri bağlantılarının stringer makinası ile oluşturulması..... 58

3.3. Cam besleme ve EVA yerleştirme işlemi 59

3.4. PV hücre serilerinin CAM-EVA üzerine yerleştirilmesi 59

3.5. PV hücre serilerinin birleştirilmesi 60

3.6. PV modül laminasyon işlemi 60

3.7. Bakır boru kesme işlemi 61

3.8. Hazırlanan toplayıcı borular 61

3.9. Oksijen kaynağı yapma işlemi 62

3.10. Soğurucu tabaka kesme işlemi 62

3.11. Lazer kaynak işlemi 63

3.12. Bağlantı kutusunun yerleştirilmesi 64

3.13. Alüminyum kasaya izolasyon yerleştirme işlemi 64

3.14. PV/T temel parçasının izolasyonlu kasaya yerleştirme işlemi 65

3.15. PV/T modülün katmanlı iç yapısı ve bileşenleri 65

3.16. PV/T modülünün kesit görünümü 66

3.17. PVT-1 numunesinin termal kısmının iç görünümü 67

3.18. PVT-2 numunesinin termal kısmının iç görünümü 68

3.19. PVT-3 numunesinin termal kısmının iç görünümü 69

3.20. PVT-4 numunesinin termal kısmının iç görünümü 69

3.21. PVT-5 numunesinin termal kısmının iç görünümü 70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

3.22. Solar simülatör cihazı 71

3.23. PV testi için kurulan deney setinin blok diyagramı ve ölçülen parametreler 72

3.24. PV/T testleri için kurulan deney setinin blok diyagramı ve ölçülen parametreler 73

3.25. Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde kurulan deney setlerinin fotoğrafları 73

4.1. PVT-1 modülünün I-V-P eğrisi 76

4.2. PVT-2 modülünün I-V-P eğrisi 76

4.3. PVT-3 modülünün I-V-P eğrisi 77

4.4. PVT-4 modülünün I-V-P eğrisi 77

4.5. PVT-5 modülünün I-V-P eğrisi 78

4.6. PV modülünün I-V-P eğrisi 78

4.7. Nisan - Eylül ayları arası ortalama güneş ışınım değerleri 80

4.8. Nisan ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği 81

4.9. Mayıs ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği 81

4.10. Haziran ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği 82

4.11. Temmuz ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği 82

4.12. Ağustos ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği 83

4.13. Eylül ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği 83

4.14. PVT-1 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği 84

4.15. PVT-2 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği 85

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

4.16. PVT-3 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği 85

4.17. PVT-4 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği 86

4.18. PVT-5 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği 86

4.19. PV modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği 87

4.20. Temmuz ayı PVT-1 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri 88

4.21. Temmuz ayı PVT-2 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri 89

4.22. Temmuz ayı PVT-3 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri 89

4.23. Temmuz ayı PVT-4 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri 90

4.24. Temmuz ayı PVT-5 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri 90

4.25. Temmuz ayı PV modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri 91

4.26. PVT-1 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi 92

4.27. PVT-2 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi 92

4.28. PVT-3 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi 93

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

4.29. PVT-4 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi 93

4.30. PVT-5 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi 94

4.31. PV modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi 94

4.32. PV/T modüllerin Temmuz ayı ortalama yüzey sıcaklıkları 95

4.33. PV/T modüllerin su giriş-çıkış sıcaklık farklarının değişimi 97

4.34. PVT-1 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi 105

4.35. PVT-2 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi 105

4.36. PVT-3 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi 106

4.37. PVT-4 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi 106

4.38. PVT-5 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi 107

4.39. 0.045 kg/s debide PVT-1 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 108

4.40. 0.07 kg/s debide PVT-1 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 109

4.41. 0.045 kg/s debide PVT-2 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 110

4.42. 0.07 kg/s debide PVT-2 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 111

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

4.43. 0.045 kg/s debide PVT-3 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 112

4.44. 0.07 kg/s debide PVT-3 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 113

4.45. 0.045 kg/s debide PVT-4 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 114

4.46. 0.07 kg/s debide PVT-4 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 115

4.47. 0.045 kg/s debide PVT-5 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 116

4.48. 0.07 kg/s debide PVT-5 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi 117

4.49. PVT-1 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi 119

4.50. PVT-2 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi 120

4.51. PVT-3 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi 120

4.52. PVT-4 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi 121

4.53. PVT-5 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi 121

4.54. PV/T modüller için maksimum elektriksel ve termal verimler 122

4.55. PV/T modüller için toplam maksimum verimler 123

4.56. PV/T modüller için maksimum elektriksel ve termal güç değerleri 124

4.57. PV/T modüller için toplam maksimum güç değerleri 124

5.1. PV/T modüllerin kullanıldığı bir biyogaz sisteminin blok diyagramı 128

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan PV hücre özellikleri 57

4.1. Numunelerin STC'daki elektriksel parametreleri ve verim değerleri..... 79

4.2. PV/T modüllerin Temmuz ayı maksimum yüzey sıcaklıkları 96

4.3. PV/T modüllerin su giriş-çıkış sıcaklık değerleri 97

4.4. PV/T modüllerin aynı koşullardaki termal parametreleri ve verimlilikleri 99

4.5. PVT-1 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri 100

4.6. PVT-2 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri 101

4.7. PVT-3 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri 102

4.8. PVT-4 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri 103

4.9. PVT-5 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri 104

4.10. 0.045 kg/s debide PVT-1 modülü için ısıl verim değerleri..... 108

4.11. 0.07 kg/s debide PVT-1 modülü için ısıl verim değerleri..... 109

4.10. 0.045 kg/s debide PVT-2 modülü için ısıl verim değerleri..... 110

4.13. 0.07 kg/s debide PVT-2 modülü için ısıl verim değerleri..... 111

4.14. 0.045 kg/s debide PVT-3 modülü için ısıl verim değerleri..... 112

4.15. 0.07 kg/s debide PVT-3 modülü için ısıl verim değerleri..... 113

4.16. 0.045 kg/s debide PVT-4 modülü için ısıl verim değerleri..... 114

4.17. 0.07 kg/s debide PVT-4 modülü için ısıl verim değerleri..... 115

4.18. 0.045 kg/s debide PVT-5 modülü için ısıl verim değerleri..... 116

4.19. 0.07 kg/s debide PVT-5 modülü için ısıl verim değerleri..... 117

4.20. PV/T modüllerin termal enerji verimliliği için bulunan denklemler 118

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
G	Global Işınım
G_{sc}	Güneş Sabiti
D	Yayılmış Işınım
B	Direkt Işınım
ρ	Albedo
Z	Zenit Açısı
ϕ	Enlem Açısı
ω	Saat Açısı
δ	Deklinasyon Açısı
AMm	Hava Kütlesi m (Air Mass m)
E_v	Değerlik Bandının Üst Enerji Seviyesi
E_c	İletkenlik Bandının Alt Enerji Seviyesi
E_g	Yasak Enerji Aralığı
E_F	Fermi Enerjisi
E_{Fn}	n-tipi yarıiletken için Fermi Enerjisi
E_{Fp}	p-tipi yarıiletken için Fermi Enerjisi
eV	Elektron Volt
I	Akım
V	Voltaj
n	İdealite Faktörü
I_L	Işınım Altında Akım
I_s	Doyma Akımı
I_{sc}	Kısa Devre Akımı
V_{oc}	Açık Devre Voltajı
I_m	Maksimum Akım
V_m	Maksimum Voltaj
P_m	Maksimum Güç Noktası
FF	Dolum Faktörü
e	Elektronun Yükü
K	Kelvin
η_e	Elektriksel Verim
k	Boltzmann Sabiti

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simge	Açıklama
T	Mutlak Sıcaklık
R_s	Seri Direnç
R_p	Paralel Direnç
P_{in}	Hücre veya Modül Üzerine Düşen Işınım
V_R	Ters Beslem Voltajı
V_{bi}	Termal Dengedeki İç Potansiyel Engeli
$\vec{E}$	İç Elektrik Alan
W	Tüketim Tabakasının Genişliği
$\alpha\ (v)$	Soğurma Katsayısı
L_D	Difüzyon Uzunluğu
N	Seri Bağlı PV Hücre Sayısı
V_T	Termal Voltaj
η_{ref}	PV Modülün Standart Test Koşullarındaki Verimi
T_c	Hücre Sıcaklığı
$T_{c,ref}$	Referans Sıcaklığı (298 K)
$℃$	Santigrat
$\mu_{P,mp}$	Modül Verimliliği Sıcaklık Katsayısı
A_m	Modül Alanı
W	Watt
kW	Kilowatt
GW	Gigawatt
TW	Terawatt
Wh	Watt-saat
kWh	kilowatt-saat
GWh	Gigawatt-saat
TWh	Terawatt-saat
Q_g	Gelen Işınımın Enerjisi
Q_f	Faydalı Termal Enerji
Q_k	Termal Enerji Kaybı
Q_d	Depolanan Termal Enerji

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simge	Açıklama
A_t	Kolektör Yüzey Alanı
T_g	Akışkan Giriş Sıcaklığı
$T_ç$	Akışkan Çıkış Sıcaklığı
$\dot{m}$	Kütlesel Debi
c_p	Akışkanın Özgül Isısı
η_t	Termal Verim
K	Isı Kayıp Katsayısı
K_{alt}	Alt Yüzey Isı Kayıp Katsayısı
$K_{üst}$	Üst Yüzey Isı Kayıp Katsayısı
S	Soğurulan Güneş Enerjisi
U_L	Kolektör Isı Kayıp Katsayısı
$T_{p,m}$	Ortalama Soğurucu Tabaka Sıcaklığı
C_b	Soğurucu Tabaka ile Boru Arasındaki İletkenlik
F	Soğurucu Tabaka Verim Faktörü
D_i	Akışkan Boru Çapı
w	İki Boru Arasındaki Uzaklık
η_T	Toplam Verim
ΔT	Su Çıkış ve Giriş Sıcaklık Farkı
ΔT^*	Su Giriş ve Ortam Sıcaklık Farkı
GS	Gün Saati
V_f	Doğru Beslem Voltajı
V_r	Ters Beslem Voltajı
PV	Fotovoltaik
PV/T	Fotovoltaik/Termal
REN21	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
YEGM	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
NASA	Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
WRC	Dünya Işınım Merkezi
MIT	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
ARC	Yansıtıcı Olmayan Kaplama

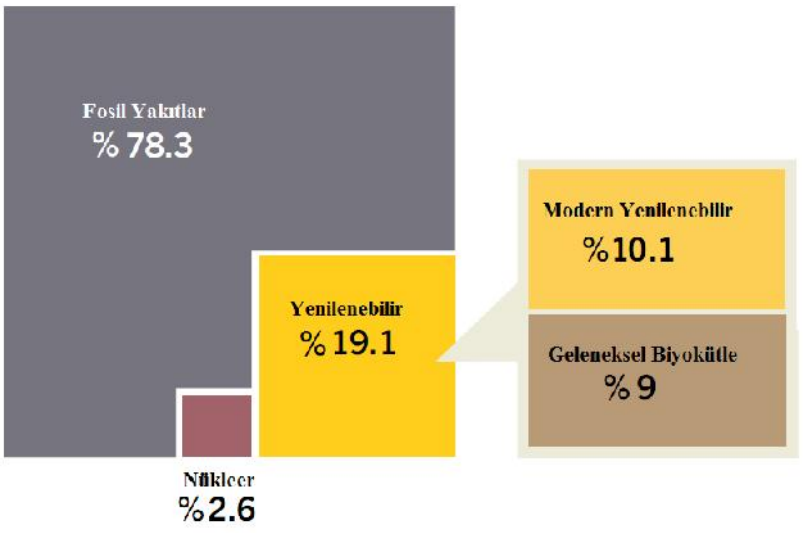
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simge	Açıklama
TS	Dokuma Desenli Yüzeyler
NREL	Amerika Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
EVA	Etil Vinil Asetat
TPT	Tedlar Polyester Tedlar
NOCT	Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
STC	Standart Test Koşulları
STK	Soğutma Tesir Katsayısı

1. GİRİŞ

Günümüzdeki hızlı nüfus artışı ve sanayileşme, ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınma potansiyelini yansıtmakta olan temel gösterge enerjiye olan talebin hızla artmasına sebep olmaktadır. Enerji tüketimiyle sosyal kalkınma arasında doğrusal bir ilişki olup, ekonomik gelişme ve refah artışıyla enerji tüketiminin de arttığı görülmektedir. Günlük yaşamda her aşamada gerekli enerji; kimyasal, nükleer, mekanik (potansiyel ve kinetik), termal (ısıl), jeotermal, hidrolik, güneş, rüzgâr, elektrik enerjisi gibi değişik şekillerde bulunabilmekte ve uygun yöntemlerle birbirine dönüştürülebilmektedir. Yenilenemez enerji kaynakları, kısa bir gelecekte tükenebileceği öngörülen enerji kaynakları olup fosil kaynaklılar ve çekirdek kaynaklılar olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise; oldukça uzun sayılabilecek bir gelecekte tükenmeden kalabilecek, kendisini yenileyebilen kaynakları ifade etmektedir.

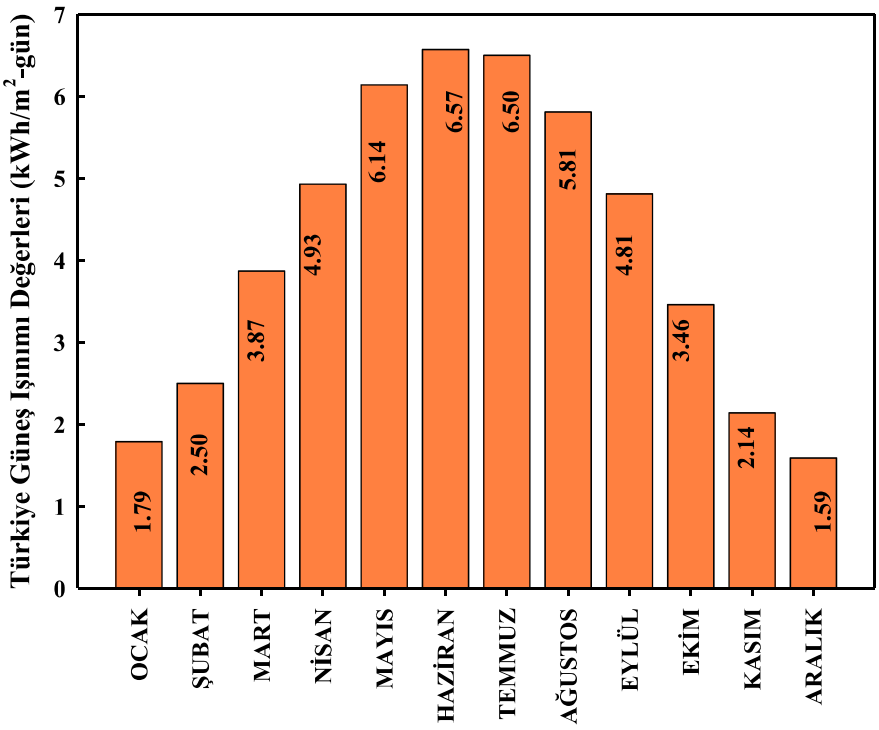
21. Yüzyıl için Yenilenebilir Enerji Politikaları Ağı (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century – REN21)'nın 2015 yılı raporuna göre, Şekil 1.1'de verildiği gibi, 2014 yılı sonu itibarı ile Dünyada kullanılan enerjinin % 78.3'ü fosil yakıtlardan, % 19.1'i yenilenebilir kaynaklardan ve % 2.6'sı ise nükleer yolla elde edilmektedir. Yenilenebilir kaynakları içerisinde Güneş enerjisinin payı yaklaşık % 1 civarındadır.



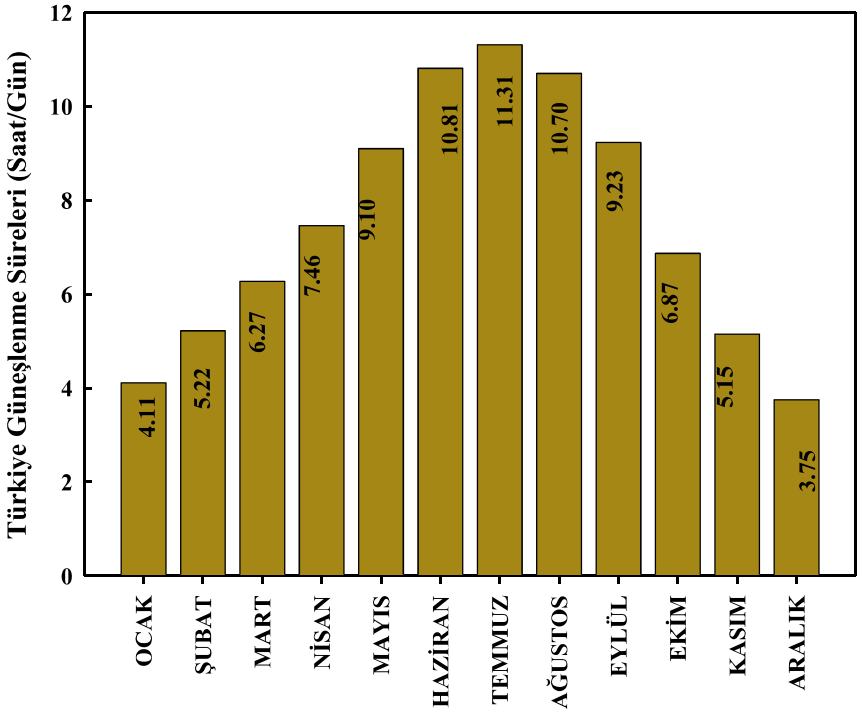
Şekil 1.1. Dünya enerji kullanımının kaynaklara göre dağılımı (REN21, 2015).

Son yıllarda ülkeler, ekonomik gelişimin hayata geçirilmesi (**E**: Ekonomi), enerji harcamalarındaki artış (**E**: Enerji) ve enerjideki artışın çevreye verdiği zarar (**E**: Environment, Çevre) olmak üzere **3E** olarak bilinen üç faktör üzerine odaklanmıştır. Burada önemli olan bu üç şartın hepsinin bir arada sağlanabilmesidir. Eğer petrol ve türevi enerji kaynakları kullanılarak üretilen enerjinin ortaya çıkardığı zehirli gazın düşük seviyelere çekilmesi istenirse, bu da ekonomik olarak gelişimin engellemesi demektir. Bu nedenle, son zamanlarda, ağırlıklı olarak fosil yakıtlar ve nükleer santrallerle enerji üreten gelişmiş ülkelerin büyük kısmı, güneş enerjisinin temiz, sonsuz ve ekonomik bir kaynak olduğunu fark etmiş ve politikalarını ciddi biçimde değiştirmiş durumdadır.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre, Türkiye Güneş ışınımı değerlerinin aylara göre değişimi Şekil 1.2'de, Güneşlenme sürelerinin aylara göre değişimi ise Şekil 1.3'de verilmektedir. Bu verilere göre, Türkiye'nin ortalama toplam ışınım şiddeti 1,527.46 kWh/m²-yıl (günlük ortalama 4.185 kWh/m²), ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2,741.07 saat (günlük ortalama 7.5 saat) olarak tespit edilmiştir (YEGM, 2015).

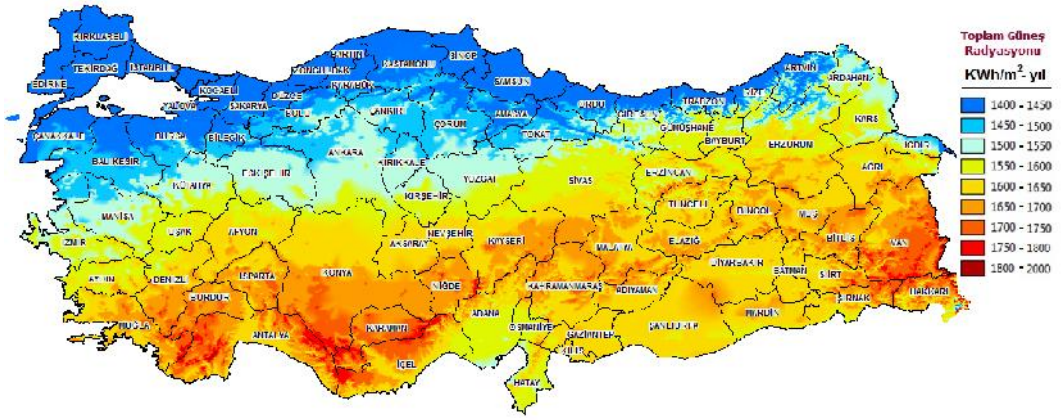


Şekil 1.2. Türkiye güneş ışınımı değerlerinin aylara göre değişimi (YEGM, 2015).



Şekil 1.3. Türkiye güneşlenme sürelerinin aylara göre değişimi (YEGM, 2015).

Şekil 1.4'de Türkiye'nin güneş haritası verilmiştir. Bu haritaya göre Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin en yüksek olduğu bölgeleri, İç Anadolu bölgesinde, Konya'nın güneyi ve Karaman bölgesi; Akdeniz ve Ege bölgelerinde, Antalya'nın batı bölgeleri ile Burdur, Denizli ve Muğla; Doğu ve Güney Doğu Anadolu bölgesinin belli bir parçasıdır. Bu nedenle, Konya'nın Karapınar ilçesi ile Karaman bölgesi güneş enerjisi yatırımları için en uygun bölge olarak seçilmiştir.



Şekil 1.4. Türkiye güneş haritası (YEGM, 2015).

Güneş enerjisi uygulama alanlarını aktif ve pasif olarak iki ana grupta incelemek mümkündür. Aktif uygulamalar güneş enerjisiyle elektrik ve ısı elde etmek için kurulan sistemleri içerirler. Pasif uygulamalar ise genel olarak güneş enerjisinden verimli bir şekilde faydalanmaya yönelik mimari tasarımları kapsar.

Elektrik enerjisi eldesine yönelik aktif uygulamalar;

- Şebekeden bağımsız bina, tesis ve sistemler için elektrik üretilmesi,
- Şebekeye bağımlı bina, tesis ve sistemler için elektrik üretilmesi,
- Çeşitli ulaşım araçları ve uzay uygulamaları için elektrik üretilmesi şeklindedir.

Isı enerjisi eldesine yönelik aktif güneş enerjisi uygulamaları;

- Kullanım sıcak suyu eldesi,
- Binaların ısıtılması ve soğutulması,
- Seraların ısıtılması,
- Yüzme havuzlarının ısıtılması,
- Endüstriyel proseslerdeki akışkanların ısıtılması,
- Endüstriyel amaçlı buhar üretilmesi şeklindedir.

Mimari tasarımları kapsayan pasif uygulamalar;

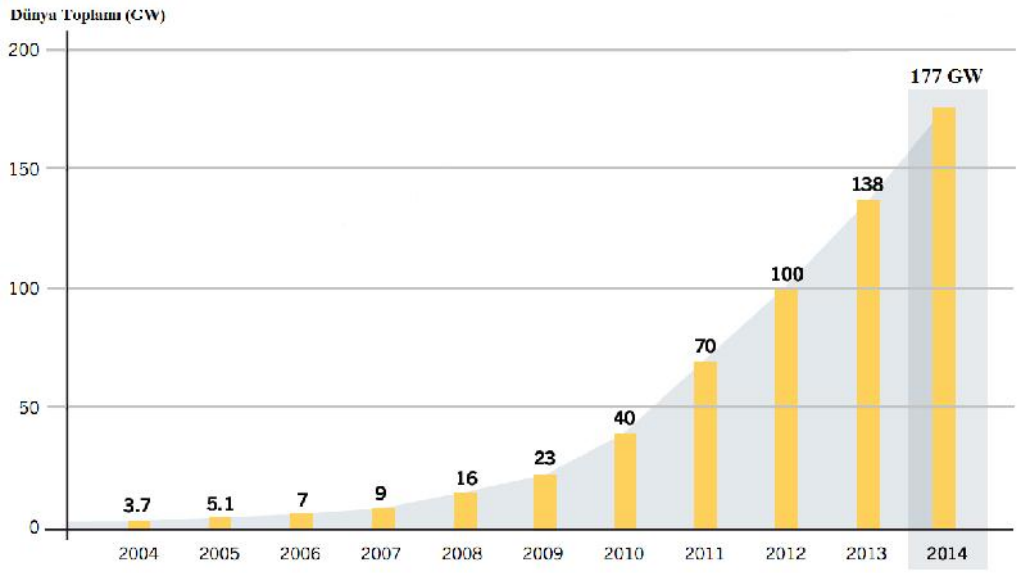
- Güneşle doğal aydınlatma sağlanması,
- Tromp duvar uygulamaları ile ısı kayıplarının azaltılması olarak sıralanabilir.

Aktif uygulamalarda elektrik enerjisi fotovoltaik (PV) güneş hücreleri kullanılarak elde edilir. Fotovoltaik güneş hücreleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken aygıtlardır. Dünya'da iklim değişikliği korkularının yoğunlaştığı bir dönemde fotovoltaik güneş hücreleri, çevre kirliliği yaratmayan, doğanın milyonlarca yıllık yaşam dengesiyle uyum içinde sonsuz bir enerji kaynağı olan Güneşin enerjisini elektrik enerjisine doğrudan dönüştürmesi sebebi ile insanlığın gelecek umudu haline gelmiş bulunmaktadır. Ayrıca, atmosferik-coğrafik koşullara bağımlılığın daha az olması, Güneş'in bulutların arkasında olduğu kısmi-ışıklı hallerde dahi elektrik üretebilmeleri, güneş hücrelerinin yakın gelecekte çok yaygın olarak kullanımıyla ilgili umutları artırmaktadır.

Güneş hücrelerinin tarihi 19. yüzyıla uzanmaktadır. 1839'da Alexandre Edmond Becquerel, platin tabakalarla ilk fotovoltaik etkiyi saptamıştır. İlk silisyum Güneş hücresi ise, Bell laboratuvarlarındaki bilim adamları, Pearson

ve Fuller tarafından 1954 yılında keşfedilmiştir. Arkasından silisyum temelli güneş hücreleri ABD tarafından uzay araçlarında, ilki 1958'de Vanguard-I isimli uzay aracında olmak üzere, kullanılmaya başlanmıştır (Perlin, 2013).

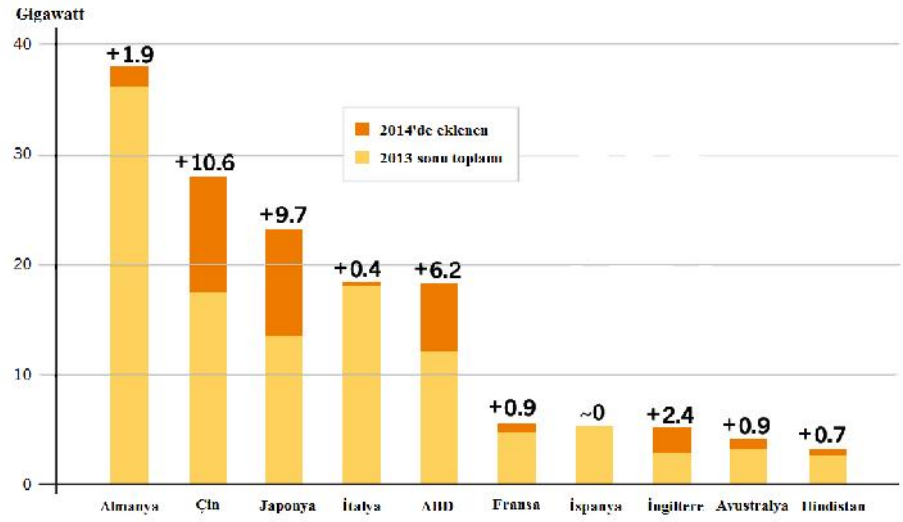
Son yıllarda güneş hücre teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak gerçekleşen çok büyük maliyet düşüşü, bu yöntemle elektrik üretiminin "aşırı pahalı yatırım" olduğu ve bunun için "yüksek devlet desteği" gerektiği gibi dezavantajı ortadan kaldırmıştır. Daha önce yüksek devlet desteği ile gerçekleştirilen yatırımlar, bugün için az bir destekle gerçekleştirilebilir duruma gelmiştir. Dünya PV teknolojileri ile elektrik elde etme toplam kapasitesinin yıllara göre dağılımı Şekil 1.5'de verilmektedir (REN21, 2015). Şekil 1.5'de görüldüğü gibi, PV kapasitesi üstel bir artış göstermiş, bilhassa 2010 yılından sonra çok hızlı bir şekilde artarak, 2014 yılı sonu itibarı ile 177 GW'a ulaşmıştır.



Şekil 1.5. Dünya PV toplam kapasitesinin 2004-2014 yılları arasındaki dağılımı (REN21, 2015).

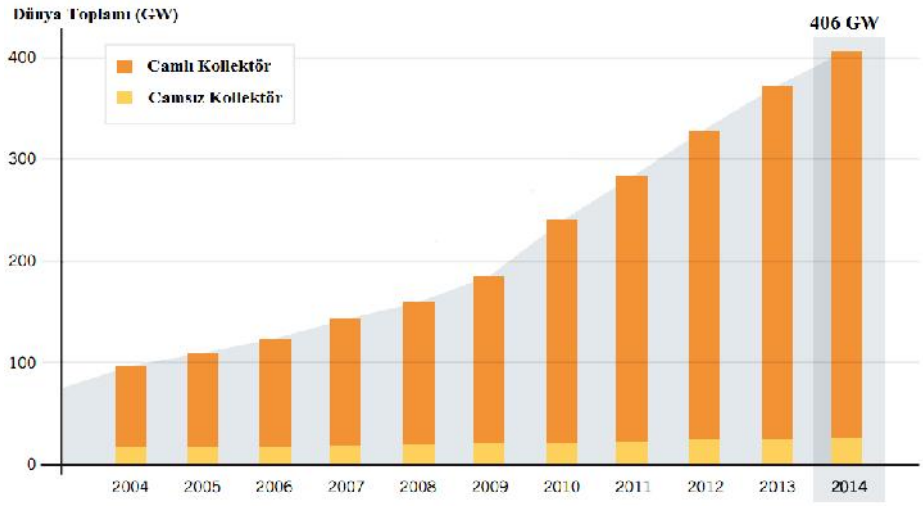
PV kurulu gücü yönünden ülkeler değerlendirildiğinde, 2014 yılı sonu itibarı ile, en fazla kapasiteye sahip ilk beş ülke, 38.2 GW ile Almanya, 28.2 GW ile Çin, 23.3 GW ile Japonya, 18.5 GW ile İtalya ve 18.3 GW ile ABD şeklinde sıralanmaktadır. 2014 yılı içerisinde en fazla yatırım yapan ülkelere bakıldığında, 10.6 GW ile Çin, 9.7 GW ile Japonya ve 6.2 GW ile ABD ilk üç sırayı almaktadır. En fazla PV kapasitesine sahip ilk on ülke ve 2014 kapasite artışları Şekil 1.6'da verilmektedir (REN21, 2015). En büyük kurulu PV kapasitesine sahip olan

Almanya, 2014 yılı içerisinde 33 TWh'lık elektrik enerjisini bu yolla üretmiş ve elektrik enerjisinin yaklaşık % 6-7'sini PV den, % 21'ini yenilenebilir enerjiden sağlamaktadır. Almanya'nın 2050 hedefi ise enerjisinin % 80'ini yenilenebilir kaynaklardan sağlamaktır.



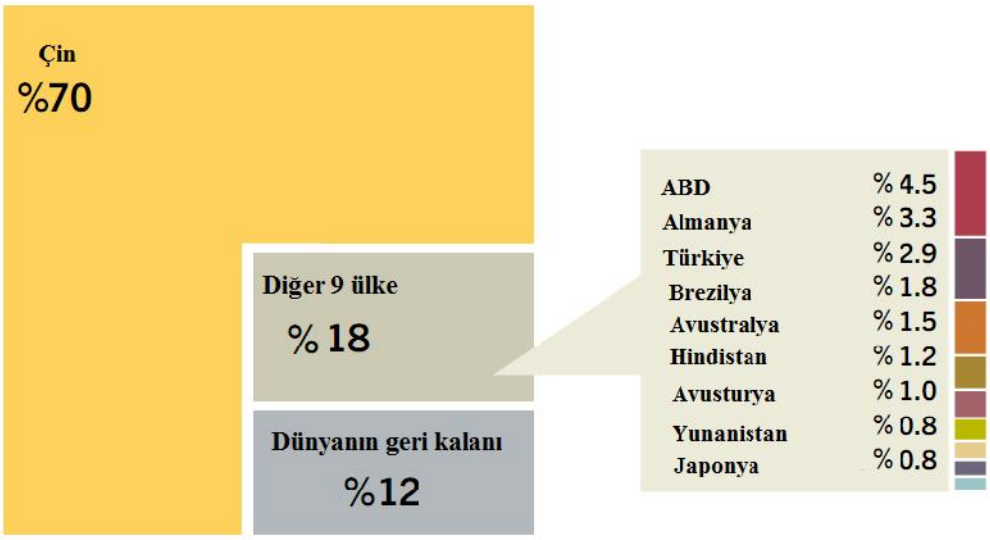
Şekil 1.6. En fazla PV kapasitesine sahip ilk on ülke ve 2014 kapasite artışları (REN21, 2015).

Güneş enerjisinin aktif uygulamalarından birisi de, termal kolektörler yardımı ile suyun ısıtılması ve değişik amaçlar için kullanımının sağlanmasıdır. Dünya kurulu termal güç kapasitesinin 2004-2014 yılları arasındaki değişim grafiği Şekil 1.7'de verilmektedir. 2004 yılında 86 GW olan Dünya termal güç kapasitesi, 10 yıl içerisinde hızlı bir artışla 406 GW'a ulaşmıştır.



Şekil 1.7. Dünya'da kurulu toplam termal güç kapasitesinin 2004-2014 yılları arasındaki dağılımı (REN21, 2015).

Dünya termal güç kapasitesinin ülkelere göre dağılımı Şekil 1.8'de verilmektedir. Şekil 1.8'de görüldüğü gibi, Dünyada en fazla kapasiteye sahip ilk beş ülke, sırasıyla Çin, ABD, Almanya, Türkiye ve Brezilya şeklinde sıralanmaktadır.



Şekil 1.8. Dünya'da kurulu toplam termal güç kapasitesinin ülkelere göre dağılımı (REN21, 2015).

PV güneş hücrelerinin verimi artan sıcaklıkla azalmaktadır (Charalambous et al., 2007; Zondag, 2008). Bu sıcaklık etkisini azaltmak amacıyla, hem PV modülü hem de termal kısmı içeren uygulamalar ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. İlk çalışma, 1973 yılında Delaware Üniversitesinde, K.W. Boer tarafından yapılan hava tipli PV/T uygulamasıdır (Boer and Tamm, 2003). Daha sonra, 1976 yılında, Martin Wolf tarafından su tipli PV/T çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu öncü çalışmalardan sonra, PV/T uygulamaları ile ilgili araştırmalar devam etmiş ve halen devam etmektedir. Yapılan araştırmalardan bazıları ile ilgili bilgilere Literatür Özeti bölümünde yer verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (PV) modüllerin sıcaklıktan olumsuz etkilenerek uğradıkları verim kaybını azaltmak ve belli bir alandan maksimum enerji dönüşümü (elektrik+termal) sağlamak için, güneş enerjisinden ısıl enerji üreten termal kolektörler ile fotovoltaik modüllerin optimum bir şekilde birleştirilmesi ve

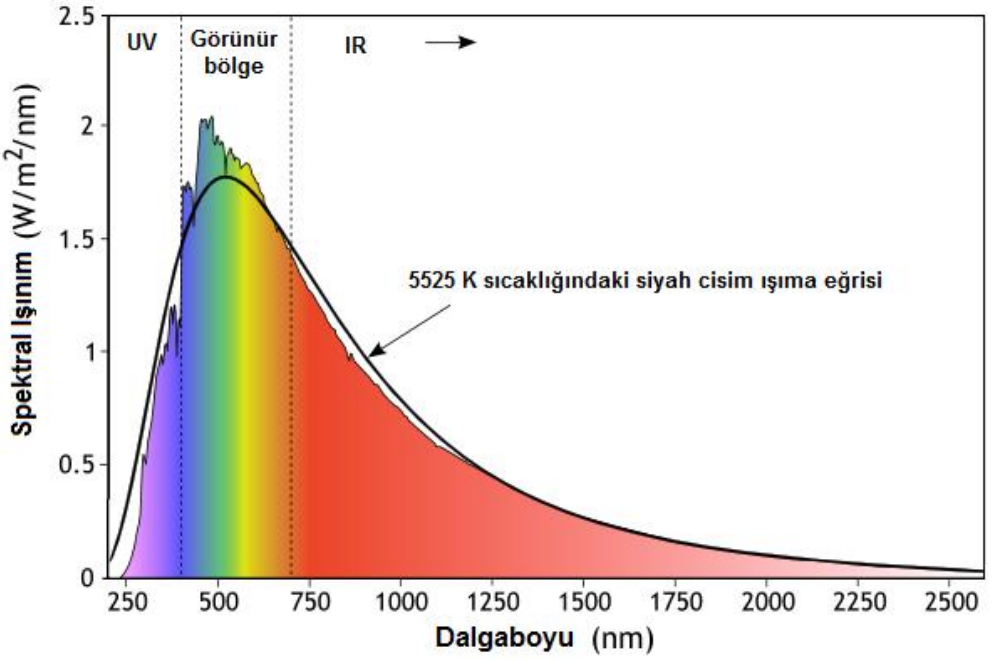
verimleri ile performans analizleri yapılmıştır. Beş farklı termal kolektör kısmına sahip, PV/T modüllerin karşılaştırmalı incelenmesi ve PV/T modül üretiminde, termal kısımla, PV modül kısmının birleştirilmesinde laminasyon tekniğinin kullanılması bu tez çalışmasının özgün yönünü oluşturmaktadır. Ayrıca, çalışmada PV/T modüllerin bir biyogaz sisteminde kullanımı ile ilgili araştırmalar yapılmış ve önerilerde bulunulmuştur. Tezin Giriş bölümünde, güneş enerjisinin önemi, dünyada ve ülkemizde kullanımı ile ülkemizin güneş enerjisi potansiyeli, güneş enerjisinden elektrik ve termal enerji üretimine yönelik dünyada yapılan uygulamaların analizi ve kısaca PV/T modüllerin önemi hakkında bilgiler verilmiştir. Literatür Özeti bölümünde, güneş ve güneş açıları ile ilgili bilgiler, fotovoltaik güneş hücrelerinin yapısı, ışıma altında elektriksel dönüşümü nasıl gerçekleştirdiği, fotovoltaik modüller, termal kolektörlerin yapısı ve fotovoltaik / termal (PV/T) modüller hakkında bilgiler sunulmuş ve her bir yapının verim parametreleri ile verimliliğinin nasıl hesaplandığı hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca, biyogaz ile ilgili temel bilgilere de yer verildikten sonra, tez konusu ile ilgili bir çok araştırma makalesi incelenmiş, yapılan araştırmalar ile ilgili bilgiler, tarihsel gelişim içerisinde bu bölümde sunulmuştur. Materyal ve Metod bölümünde, hazırlanan numunelerin yapısı, hazırlama adımları ve kullanılan malzemeler ile ilgili bilgiler verilmiş, bu numunelerin elektriksel ve termal analizlerinin yapılması amacıyla oluşturulan deney düzenekleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Numunelerin ölçülen parametrelerinin analizi, ayrıntılı olarak Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiş, elde edilen sonuçlar ile ilgili karşılaştırmalar yapılmış ve son olarak biyogaz sistemlerinde PV/T modüllerin kullanımı ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Güneş ve Güneş Açıları

Güneş enerjisi uygulamalarında, uygulamanın yapılacağı bölgenin güneş ışınımı ve güneşlenme süresi değerleri, sistemin kurulumunda önemli parametreleri oluşturmaktadır.

Güneş, 4 protonun 1 helyum çekirdeğine dönüşmesi (füsyon) sonucunda $3{,}826 \times 10^{26}$ J.s^{-1} değerinde elektromanyetik enerji yayınlar. Güneş içerisindeki bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan enerji elektromanyetik dalgalar şeklinde uzayda yayılmaktadır. Güneş spektrumu, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 5525 K sıcaklığındaki siyah cisim ışıma spektrumuna benzerdir (Foukal, 1990).

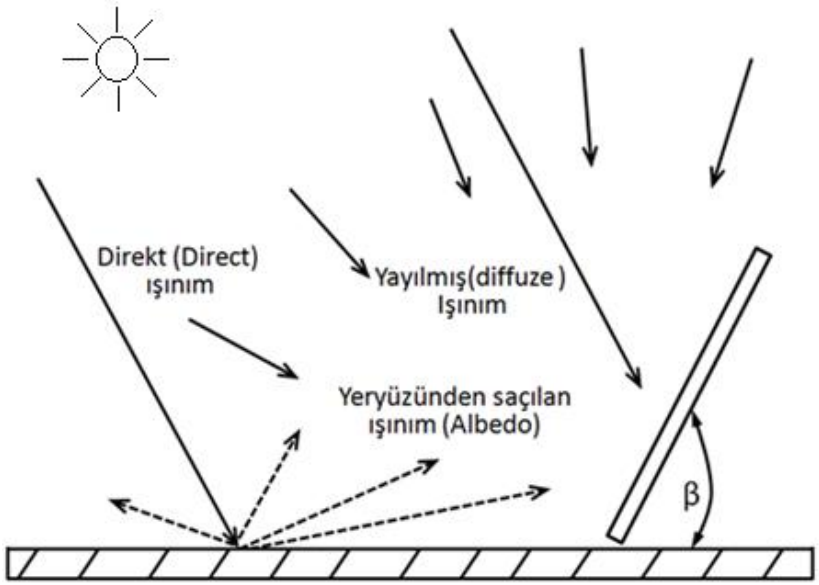


Şekil 2.1. Güneş ışınım spektrumu (PublicLab, 2015).

Dünya üzerindeki bir yüzeye ulaşan ışınımın spektral dağılımı, atmosfer dışı dağılımın ve atmosferik bileşenlerin bir fonksiyonudur. Yeryüzüne ait bu spektral dağılım (terrestrial distribution) yapılacak uygulama sistemleri için önemlidir. Astronomik birimde *güneş sabiti*, G_{sc}, atmosfer dışında birim alana dikey olarak gelen güneş ışınlarının tüm dalga boylarını içeren birim zamandaki toplam güneş ışınım enerjisidir. *NASA* güneş sabiti değerini yaptıkları birçok ölçümden sonra $G_{sc} = 1353\ W/m^2$ olarak tespit etmiştir. Bu değer *NASA* tarafından 1971 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Dünya Işınım Merkezi (*WRC*) güneş sabiti değerini

$G_{sc}=1367\ W/m^2$ olarak kabul etmektedir ve ışınım hesaplamalarında güneş sabiti değeri olarak bu değer kullanılmaktadır (Iqbal, 1983).

Güneş ışınları yeryüzüne ulaşmadan önce atmosferde bulunan moleküller nedeniyle bir kısmının saçılarak yön değiştirmesi ve bir kısmının da soğurulması ile enerjilerini belli oranda kaybederler. Saçılan ışınıma yayılmış (diffuse) ışınım, *D*, adı verilir. Bu ışınımın bir kısmı uzaya doğru geri yansıtılır bir kısmı da yeryüzüne ulaşır. Yeryüzüne güneşten çizilen bir doğru boyunca yön değiştirmeden gelen ışınımlara doğrudan (direct) ışınım, *B*, adı verilir. Bir yüzey üzerine gelen güneş ışınlarının bir kısmı yüzey tarafından soğurulur, bir kısmı yansıtılır bir kısmı da geçirilir. Gelen ışının kaynağı güneş olduğu zaman yeryüzünden yansıyan ışınlara genel adıyla albedo ismi verilir ve ρ ile tanımlanır. ρ belirli bir yüzey üzerinden yansıyan ışınımın, yüzey üzerine düşen toplam ışınım oranı olarak tanımlanır. Güneş enerjisi uygulamaları için albedo önemli bir rol oynamakta ve yüzeyin cinsine bağlı olarak 0,2 ile 0,8 arasında farklı değerler almaktadır. Eğimli bir yüzey üzerindeki toplam (global), *G*, güneş ışınımı Şekil 2.2'de gösterildiği gibi doğrudan, yayılmış ve yansıyan ışınların toplamıdır (Rüther and Klesis, 1996).



Şekil 2.2. Global ışınım bileşenleri (Woyte, 2003)

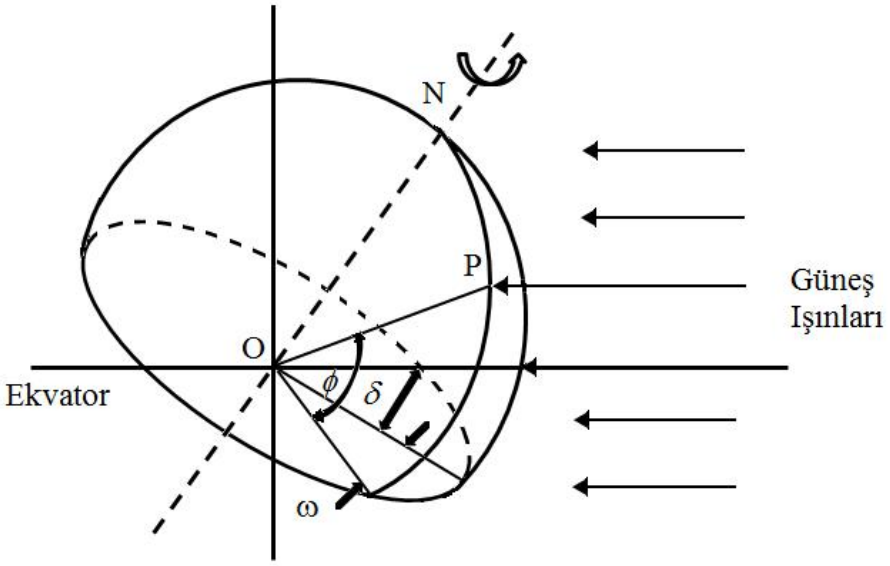
Dünya'nın yüzeyi üzerinde yer alan bir noktaya gelen bir güneş ışınımı için geometrik etkiler, güneşin zenit açısı Z ile özetlenebilir. Z zenit açısı; gün, mevsim, enlem ve boylamın fonksiyonudur ve

$$Cos\ Z = Cos\delta\ Cos\phi\ Cos\ \omega + Sin\delta\ Sin\phi \qquad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada ϕ enlem açısı, ω saat açısı ve δ deklinasyon açısıdır. Şekil 2.3'de dünya yüzeyinde yer alan P noktasına göre temel açılar gösterilmektedir. Bu açılar aşağıdaki şekilde tanımlanır.

Güneş deklinasyon açısı δ; güneş ışınlarının kuzey veya güney yarımküredeki konumları ile ekvator düzlemi arasındaki açısal mesafesidir. Bu açı; güneşin merkezinden dünyanın merkezine çizilen bir doğru ile bu doğrunun ekvator düzlemi üzerindeki iz düşümü arasında oluşan açı ile bulunur. Deklinasyon açısı bir yıl boyunca -23,5^0 ile +23,5^0 arasında değerler almaktadır (Ramsey, 2003). Deklinasyon açısının değişimi 24 saat boyunca 0,5^0 den daha düşük bir derecedir. Bu nedenle 1 gün boyunca deklinasyon açısı sabit kabul edilir (Uyarel ve Öz, 1987). Deklinasyon açısının yıl boyunca değişimi;

$$\delta = 23.45\,^{\circ} Sin\left[\frac{360}{365}(284 + n)\right] \qquad (2.2)$$



Şekil 2.3. Deklinasyon açısı δ, enlem açısı ϕ ve saat açısı ω (Ramsey, 2003).

ile verilir. Deklinasyon açısının birimi derece olup formülde kullanılan n; 1 Ocak tarihinden itibaren 1 yıl boyunca geçen gün sayısıdır.

Enlem açısı ϕ; P noktasının ekvatordan olan açısal uzaklığıdır. Bu terim OP doğrusu ile OP doğrusunun ekvator düzlemindeki izdüşümü arasındaki açıdır. Kuzey enlemleri pozitif ve güney enlemleri negatiftir.

Saat açısı ω; ekvator düzleminde oluşan OP doğrusunun iz düşümü ve güneşin merkezinden dünya'nın merkezine çizilen doğrunun izdüşümü arasındaki açı ile ölçülür. Güneş öğlesinde yani güneş yüksekliğinin maksimum olduğu anda saat açısı sıfırdır. Saat açısı güneş öğlesine bağlı olarak günün zamanlarını belirtmektedir. (1 saatlik hareket=15°, öğle öncesi negatif ve öğle sonrası pozitif değerlidir.) Buna göre saat açısı,

$$\omega=15° \text{ (GS-12)} \tag{2.3}$$

şeklinde tanımlanır. Burada GS gün saatidir (Iqbal, 1983).

Atmosferi geçen ışınların serbest yolu, m eşdeğer bağıl hava kütlesi cinsinden verilir. Herhangi bir Z zenit açısı için serbest yol Z=0 serbest yolu ile Sec Z'nin çarpımına eşittir. Anılan hava kütlesi

$$m = Sec\ Z \tag{2.4}$$

şeklinde tanımlanır. Güneş spektrumları AMm (Air Mass m) şeklinde isimlendirilir. AM0 atmosfer dışındaki güneş spektrumuna karşılık gelir. Dünya yüzeyindeki ortalama güneş spektrumu AM2'ye karşılık gelir.

Güneş ışınımı atmosferi geçerken aşağıdaki süreçlerle değişir:

1. Gökyüzünün mavi rekli olmasına neden olan Rayleigh saçılması,
2. Oksijen, nitrojen ve ozon içindeki elektronik soğurma bandları ($\lambda < 0.29$ μm dalgaboylu ışınımın hemen hemen tamamı ozon tabakası tarafından soğurulur),
3. H_2O ve CO_2 içindeki moleküler dönme ve titreşim soğurma bandları ($\lambda > 3.0$ μm dalgaboylu ışınımın tamamı H_2O ve CO_2 tarafından soğurulur),
4. Gelen ışınımın atmosferde çapları ışınımın dalgaboyundan daha büyük olan parçacıklar tarafından saçılması,

5. Kırılma indisinde sıcaklık ve basıncın neden olduğu değişimlerden meydana gelen kırılma ve çalkantı (Bunun etkisi küçüktür),

2.2 Fotovoltaik Güneş Hücreleri

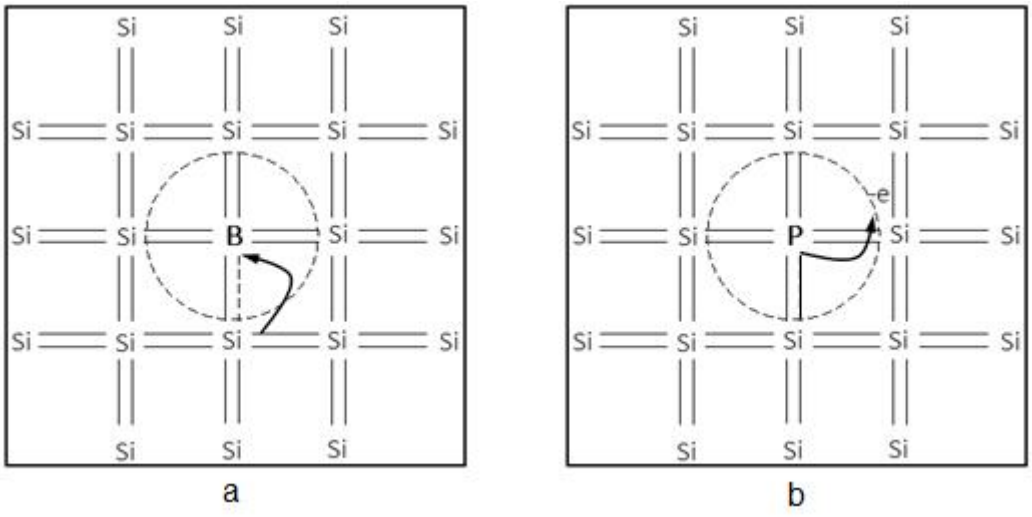
2.2.1 Güneş hücresinin temel yapısı

Fotovoltaik güneş hücreleri güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren optiksel ve elektriksel özellikleri bakımından bu dönüşüme uygun olarak seçilen yarıiletken malzemeden yapılmış aygıtlardır. Bu yarıiletken malzemelere en iyi örneklerden biri elektronik aygıt yapımında yaygın olarak kullanılan IV. Grup elementi silisyum atomlarının oluşturduğu kristal yapıdır. Bu yapı, atomların son yörüngelerinde bulunan dört değerlik (valans) elektronun birbirleriyle yaptıkları *kovalent bağlar* neticesinde ortaya çıkar. Değerlik elektronlarının bulunduğu enerji düzeyleri değerlik bandını oluşturur ve değerlik bandının üst enerji seviyesi, E_v, olarak gösterilir. Değerlik elektronlarının bulunabileceği bir üst enerji bandına iletkenlik bandı adı verilir ve iletkenlik bandının en alt enerji seviyesi, E_c, olarak gösterilir. Bu iki band arasında serbest taşıyıcılarının bulunmasının yasak olduğu yasak enerji aralığı, E_g, bulunmakta ve değerlik ile iletkenlik bandı bu yasak band aralığı tarafından birbirlerinden ayrılmaktadırlar.

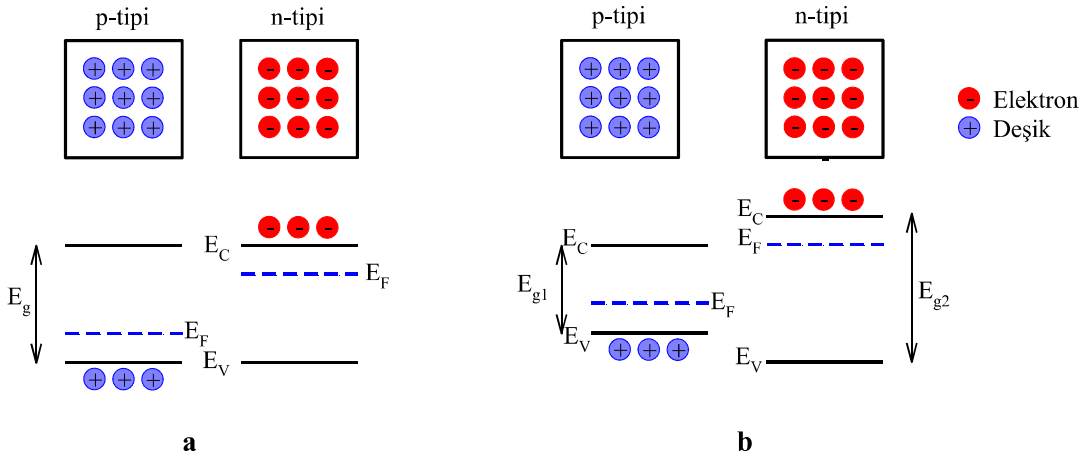
Yarıiletkenlerin en önemli özelliği elektriksel özelliklerinin kolayca değiştirilebilmesidir ve bu işleme *katkılama (doping)* adı verilir. Yarıiletken kristale katkılanan atomlar ya elektron verici *(donör)* ya da elektron kabul edici *(akseptör)* olarak işlev yaparlar. Saf yarıiletkenin, 5. grup elementi olan fosfor, arsenik gibi atomlar ile katkılanması sonucu son yörüngedeki beş elektron Şekil 2.4-a'da gösterildiği gibi yarıiletkeni oluşturan diğer atomun dört valans elektronu ile bağ oluşturacaktır. Katkı atomunun son yörüngesindeki beşinci elektronun zayıf bağ yapmasından dolayı, düşük miktardaki ısı enerjisi ile bir üst izinli band olan iletim andına geçebilecektir. Böylece saf yarıiletken özelliğini kaybederek, fazlalık yük taşıyıcısı olarak elektron içerecektir. Bu tür özellik kazandırılmış yarıiletkenlere *n-tipi yarıiletkenler* adı verilir. Benzer biçimde silisyum kristali içerisine 3. grup elementi olan bor, indiyum gibi atomlar katkılandığında, katkı atomunun son yörüngesindeki üç valans elektronu Şekil 2.4-b'de gösterildiği gibi silisyum atomunun üç elektronu ile bağ yapabilecektir.

Katkı atomu dördüncü bağı yapabilmek için en yakın komşu atomdan bir elektron alarak, geride bir boşluk bırakır. Böylece saf yarıiletken özelliğini yitirerek, fazlalık olarak pozitif yük taşıyıcılarını bulunduracaktır. Bu tür elektriksel özellik kazandırılan yarıiletkenlere *p-tipi yarıiletken* adı verilir (Decher, 1997).

Güneş hücresi difüzyon veya epitaksi ile biçimlendirilen yüzeysel pn ekleminden oluşur. Çoğunluk yük taşıyıcısı elektron olan n-tipi yarıiletken ile çoğunluk yük taşıyıcısı boşluk olan p-tipi yarıiletkenin fiziksel olarak bir araya getirilmesi sonucu oluşan pn eklemler, homoeklem (homojunction) ve heteroeklem (heterojunction) olmak üzere iki gruba ayrılır. Aynı tür yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya homoeklem, farklı türdeki yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya heteroeklem adı verilir (Şekil 2.5). Şekil 2.5-b'de gösterildiği gibi heteroeklem yapılarda kullanılan yarıiletken malzemeler farklı enerji aralıklarına sahip olmasından dolayı eklem ara yüzeyinde süreksizlikler meydana gelir. Homoeklem yapılarda ise bu süreksizlikler, aynı tür yarıiletken malzemelerin kullanılmasından dolayı meydana gelmez (Neamen, 1992).

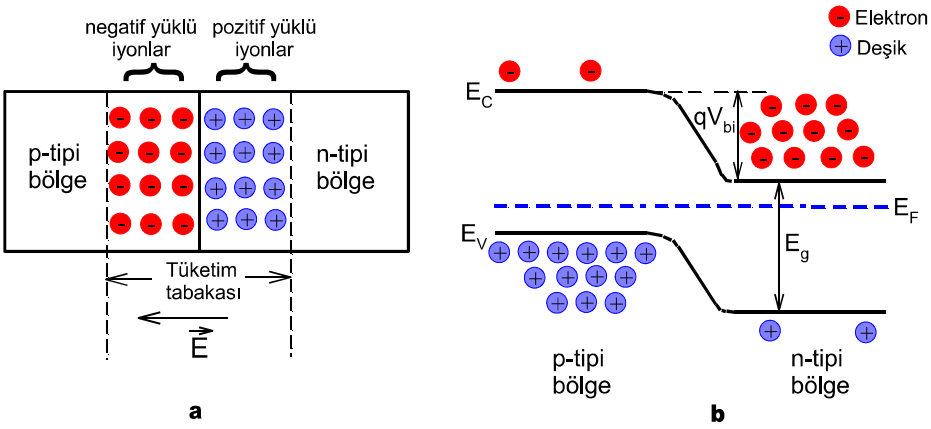


Şekil 2.4. a) Bor (B) katkılanmış, b) Fosfor (P) katkılanmış silisyum kristali.



Şekil 2.5. a) Homoeklemi oluşturan yarıiletken malzemelerin band yapısı,
b) Heteroeklemi oluşturan yarıiletken malzemelerin band yapısı.

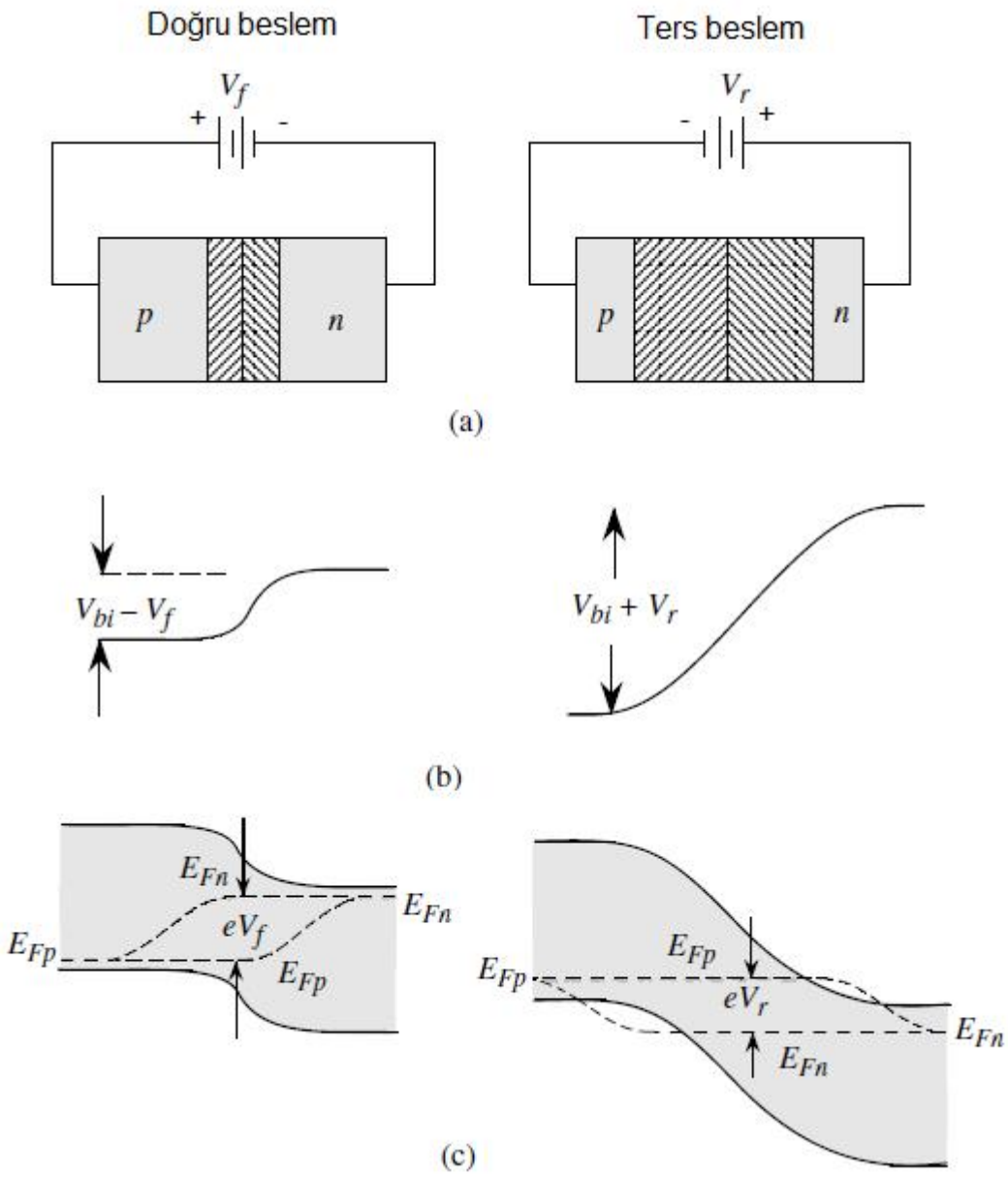
Farklı elektriksel özellik taşıyan yarıiletken malzemelerin fiziksel olarak bir araya getirilmesi sonucunda p-tipi yarıiletkendeki serbest deşikler (holler) n-tipi bölgeye doğru, n-tipi yarıiletkendeki serbest elektronlar p-tipi bölgeye doğru difüzyon yaparlar. Bu geçişler yerel elektrik yük dengesinin bozulmasına neden olur ve elektron ile boşlukların geçişleri sonucunda p tipi bölgede *(-)* yüklü *alıcı (akseptör)*, n tipi bölgede de *(+)* yüklü *verici (donör)* iyonları kalır. Alıcı ve verici iyonlarından oluşan çift yük tabakası nedeniyle n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru oluşan iç elektrik alan serbest taşıyıcıların geçişini engeller. Bu elektrik alan, denge durumunda difüzyon akımına eş değer olan elektronların ve deşiklerin oluşturduğu sürüklenme akımına neden olur. Denge konumunda yani pn ekleme uygulanan gerilimin sıfır olduğu ve sıcaklığın sabit olduğu durumda net akım sıfırdır. Karşıt taraflarda yer alan negatif ve pozitif yüklü iyonlardan oluşan bölgeye *tüketim bölgesi (depletion region)*, *uzay yük bölgesi (space charge region*) veya *geçiş bölgesi (transition region)* adı verilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. a) pn eklemde boşaltılmış bölge, elektrik alan oluşumu,
b) pn homoeklem enerji band yapısı.

n ve p-tipi yarıiletken malzemelerin Fermi enerji seviyeleri arasındaki farktan dolayı tüketim yük bölgesinde bandlar, Şekil 2.6-b'de gösterildiği gibi qV_{bi} enerji miktarı kadar bükülürler ve oluşan potansiyele iç potansiyel (built-in potential) adı verilir (Bhattacharya, 1994). p ve n bölgelerine gerilim uygulanması durumunda sistem boyunca Fermi enerji seviyesi sabit kalmaz. Pozitif gerilimin p-tipi bölgeye, negatif gerilimin n-tipi bölgeye uygulanması durumunda potansiyel engel uygulanan gerilim *(V)* kadar azaltılır . Şekil 2.7-a doğru beslem olarak bilinen bu gerilim altındaki bir pn eklemini göstermektedir. Uygulanan gerilim ile tüketim tabakasında net elektrik alan denge durumundaki değerinin altında bir değere ulaşır ve çoğunluk taşıyıcıların boşaltılmış bölge üzerinden karşı bölgeye geçmesini engelleyen elektrik alan kuvveti azalır. Bu durumda n tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar p-tipi bölgeye ve p-tipi bölgedeki çoğunluk taşıyıcı olan boşluklar n tipi bölgeye sızarlar.

n-tipi bölgeye pozitif, p-tipi bölgeye negatif gerilimin, uygulanması durumunda ters beslem, Şekil 2.7-b'de gösterildiği gibi *n* bölgedeki Fermi seviyesi *p* bölgedeki Fermi seviyesinin altında olacaktır. Bu iki Fermi seviyesi arasındaki fark enerji biriminde uygulanan gerilime eşit olacak ve V_{toplam} olarak gösterilen toplam potansiyel engel uygulanan ters gerilim, V_r, değeri kadar artacaktır. Bu tür besleme ters beslem durumu adı verilir. pn eklemin doğru ve ters beslem tipik I-V grafiği Şekil 2.8'de verilmektedir.

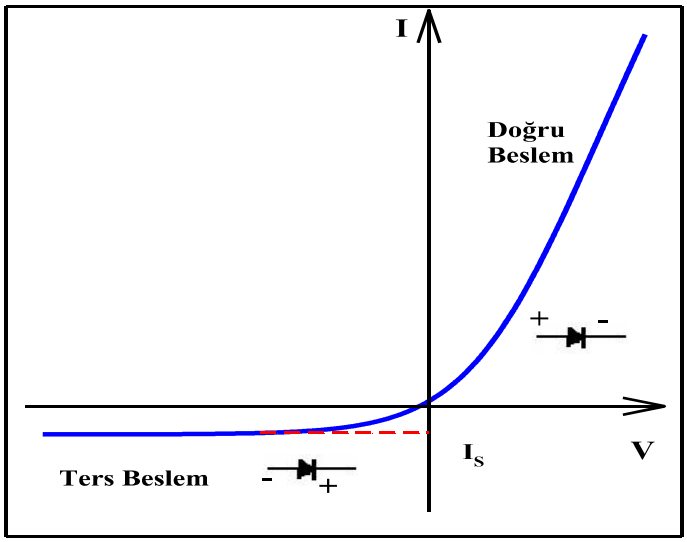


Şekil 2.7. pn eklem diyodun, a) doğru ve ters beslem durumu, b) doğru ve ters beslem altında eklem potansiyeli, c) doğru ve ters beslem altında enerji band diagramı (Mishra and Singh, 2008).

İdeal bir pn ekleminde toplam akım tüketim tabakası boyunca sabit olan elektron ve deşik akımlarının toplamıdır. pn ekleminde toplam akım;

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \tag{2.5}$$

ifadesi ile verilir. Burada V uygulanan ters veya ileri beslem durumundaki voltaj değeridir. I_s ise doyma akımı (reverse-saturation current), e elektron yükü ($1.6\text{x}10^{-19}$ C), k Boltzmann sabiti ($1.38\text{x}10^{-23}$ J/K), T mutlak sıcaklıktır (Neamen, 1992).



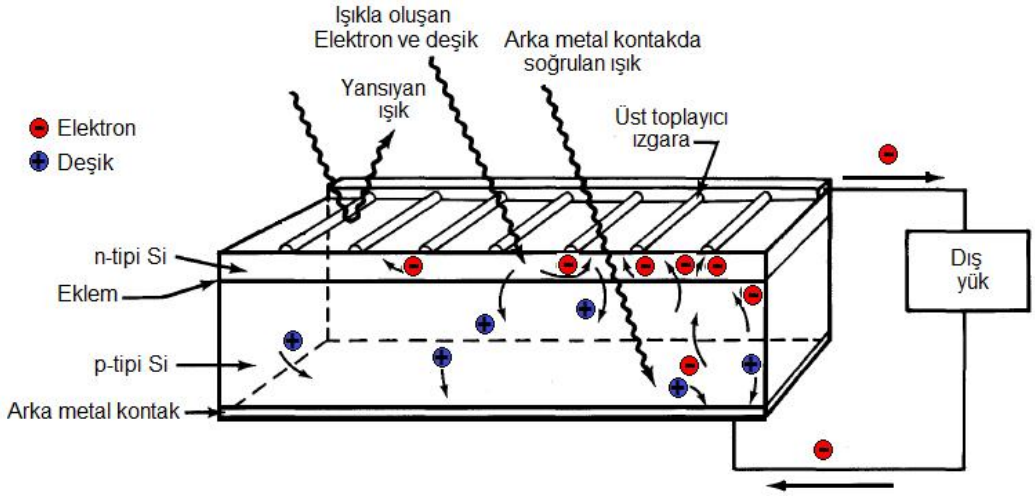
Şekil 2.8. Bir pn eklem diyotun ideal I-V karakteristiği.

2.2.2 Işıma altında güneş hücresi

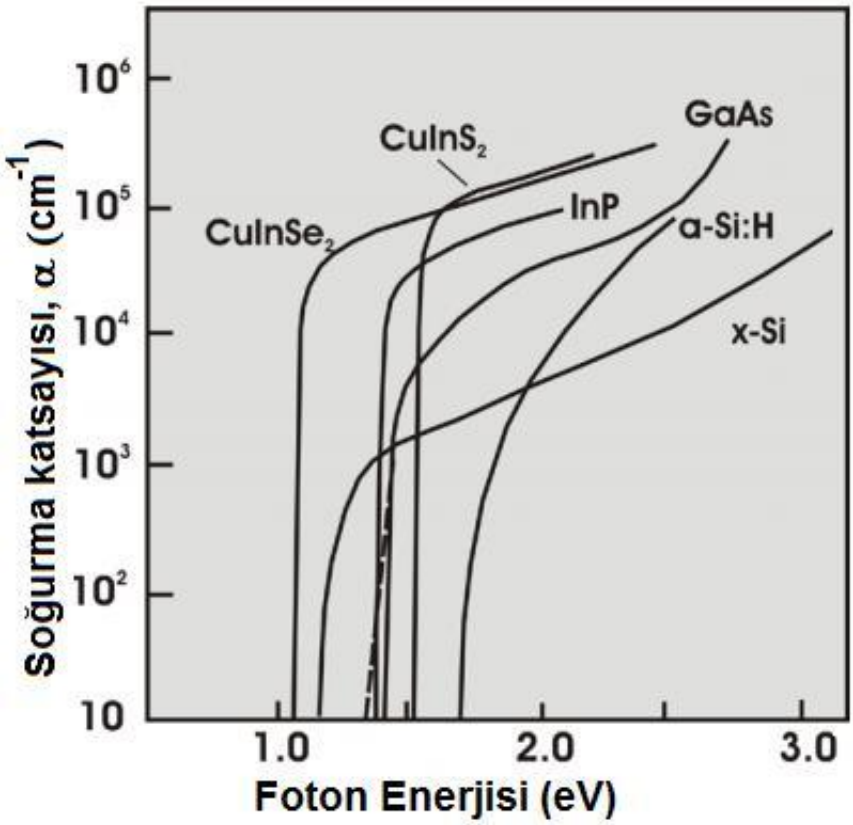
Yaygın olarak kullanılan güneş hücreleri tek bir band aralığına sahip pn eklemlerden oluşmaktadır. Bir güneş hücresi güneş ışınlarına maruz kaldığında, yasak enerji aralığından, E_g, daha düşük enerjili fotonlar, enerji çevirimine katkıda bulunmazlar. E_g enerjisine eşit ve daha yüksek enerjili fotonlar serbest taşıyıcı meydana getirirler ve bir elektrik akımı oluştururlar. Güneş ışınımı altında pn eklem güneş hücresinin enerji band diyagramını düşündüğümüzde, fotonlar yapı içerisinde soğurularak, değerlik bandında bulunan elektronları izinli band olan iletkenlik bandına çıkarırlar. Böylece p ve n tipi bölgelerde elektron-deşik çifti oluşur. Burada azınlık yük taşıyıcıların konsantrasyonlarındaki değişim, çoğunluk yük taşıyıcılarına göre daha fazla olduğundan fotoakımı, baskın olan azınlık yük taşıyıcıları oluşturur. p tipi bölgede foton soğurulması sonucu oluşan fazlalık azınlık yük taşıyıcısı elektron tüketim bölgesinde bulunan yüksek elektrik alan nedeniyle, çoğunluk yük taşıyıcısı olduğu n- tipi bölgeye doğru sürüklenir. Aynı şekilde n-tipi bölgede soğurulan foton sayesinde oluşan azınlık yük taşıyıcısı deşik elektrik alan nedeniyle, çoğunluk yük taşıyıcısı olduğu p-tipi bölgeye doğru sürüklenirler. Dolayısı ile tüketim tabakası civarında bir azınlık yük taşıyıcısı geçişi söz konusudur. Güneş hücresinin n ve p tipi tabakalarına dış kontak yapılması ile foton soğurulması sonucu oluşan azınlık yük taşıyıcıları bu kontaklar

sayesinde Şekil 2.9'da görüldüğü gibi, yapı içerisinden devredeki bir elektriksel yüke taşınırlar (Sze, 1981).

Elektron-deşik çifti oluşumu, kullanılan yarıiletken malzemenin optiksel özelliklerine bağlıdır. Yarıiletken malzeme içerisine nüfuz eden fotonların birim uzunluk başına soğurulma miktarı olarak tanımlı olan soğurulma katsayısının *(absorption coefficient)*, $\alpha\,(v)$, büyük olması güneş ışınlarının malzeme içerisinde küçük bir uzaklıkta soğurulmasına neden olur. Soğurulma katsayısı yarıiletkenin band yapısına göre değişir. Direkt band aralığına (direct band gap) sahip GaAs gibi yarıiletkenlerde bir fotonun soğurulması, iletim bandının minimum enerji seviyesi ile valans bandının maksimum enerji seviyesinin aynı dalga vektörüne ($\vec{k}$) karşılık gelmesi ile gerçekleşir. Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) gibi doğrudan band aralığına sahip olmayan (indirect band gap) yarıiletkenlerde, iletim bandının minimum enerji seviyesi ile valans bandının maksimum enerji seviyesi farklı dalga vektörlerine karşılık gelir. Şekil 2.10'da çeşitli yarıiletken malzemelerin soğurma katsayıları foton enerjisinin fonksiyonu olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Güneş hücresinde elektron-deşik çifti oluşumu.

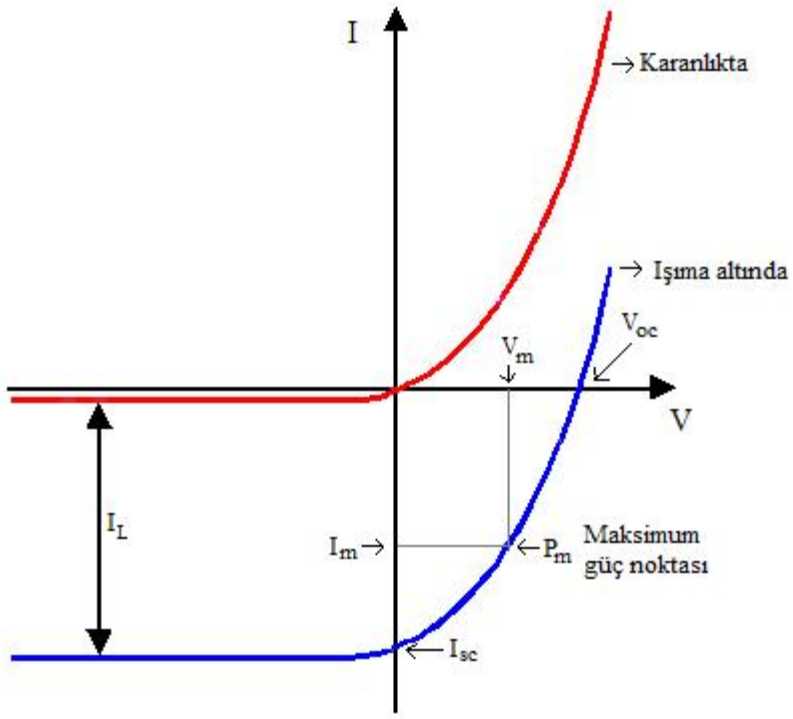


Şekil 2.10. Bazı yarıiletkenler için foton enerjisinin fonksiyonu olarak soğurma katsayısı (Möller, 1993).

Bir güneş hücresinin eşdeğer devresi, elektroniksel olarak pn eklemi temsil eden bir diyod ile fotoakımın ışık tarafından oluşturulmasını temsil eden bir akım kaynağının paralel bağlanmasından oluşmaktadır. Devrenin net akımı, diyod akımı ile fotoakım arasındaki farka

$$I = I_s \left(exp \frac{eV}{nkT} - 1 \right) - I_L \qquad (2.6)$$

eşittir. Burada n idealite faktörü, I_L güneş ışınımı sonucunda fazlalık taşıyıcıların oluşturduğu fotoakımdır *(light generated)*. Bir güneş hücresinin karanlık ve aydınlatma altındaki I-V grafiği, Şekil 2.11'de verilmektedir.



Şekil 2.11. Güneş hücresinin ışıma altında ve karanlıktaki akım-voltaj karakteristiği (Möller, 1993).

Güneş hücresi için önemli parametreler kısa devre akımı, I_{sc}, ve açık devre voltajı, V_{oc}'dir. Kısa devre akımı devre üzerinde hiçbir direncin olmadığı durumda oluşan akımdır, yani devre üzerindeki voltaj sıfır değerine eşittir *(V=0)*. Bu durumda kısa devre akımı foto akıma eşit olur ($I_{sc} = I_L$). Açık devre voltajı ise devre üzerinden akım geçmediği *(I=0)* durumda oluşur. Açık devre voltajı; V_{oc},

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} ln\left(\frac{I_L}{I_s}\right) \qquad (2.7)$$

dir.

Bir güneş hücresinden elde edilebilecek maksimum güç, ışıma altında güneş hücresinin maksimum akım, I_m ve maksimum voltaj V_m değerlerinin çarpımıdır. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi I_mxV_m alanı maksimum güç, P_m değerini vermektedir.

Güneş hücresi için önemli parametrelerinden biri dolum faktörü, FF, *(fill factor)*

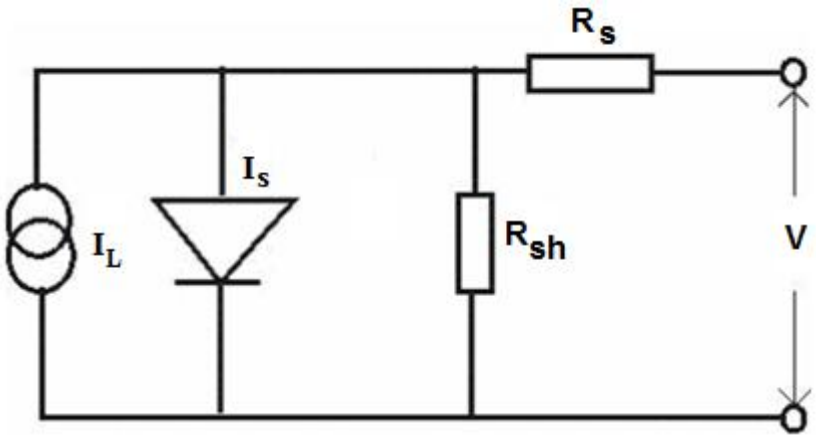
$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \tag{2.8}$$

ifadesi ile tanımlanır. Güneş hücresinin enerji çevirim verimliliği *(energy conversion efficiency)*, η_e, güneş enerjisinin hangi oranda elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü tanımlar. Güneş hücresinin verimliliği;

$$\eta_e = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = FF \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \tag{2.9}$$

ile tanımlanır. Burada P_{in}; güneş hücresi üzerine düşen toplam ışınım gücüdür. Pratik güneş hücreleri için ideal eşdeğer devresi Şekil 2.12'deki gibidir. Burada R_s seri direnci, R_{sh} paralel direnci, I_L fotoakımı ve I_s difüzyon akımını temsil etmektedir. Yarıiletkenin bulk direnci ve kontakların direnç etkisi seri direncin oluşmasındaki temel nedenlerdir. Paralel direnç tüketim tabakasında örgü kusurları tarafından ortaya çıkartılmaktadır. Güneş hücresinden maksimum verim elde edebilmek için paralel direnç $R_{sh}=\infty$, seri direnç $R_s=0$ olmalıdır (Möller, 1993).

Güneş hücresinin verimliliği, üzerine düşen ışınım ile orantılıdır. Güneş hücresi üzerine düşen ışınım değerindeki azalmayı önlemek amacıyla, aygıtın üst yüzeyine kaplanan yansıtıcı olmayan tabaka *(antireflection coating ARC)* ve eğimli kristaliografik yapıya sahip dokuma desenli yüzeyler *(texturing surface TS)* kullanılır.

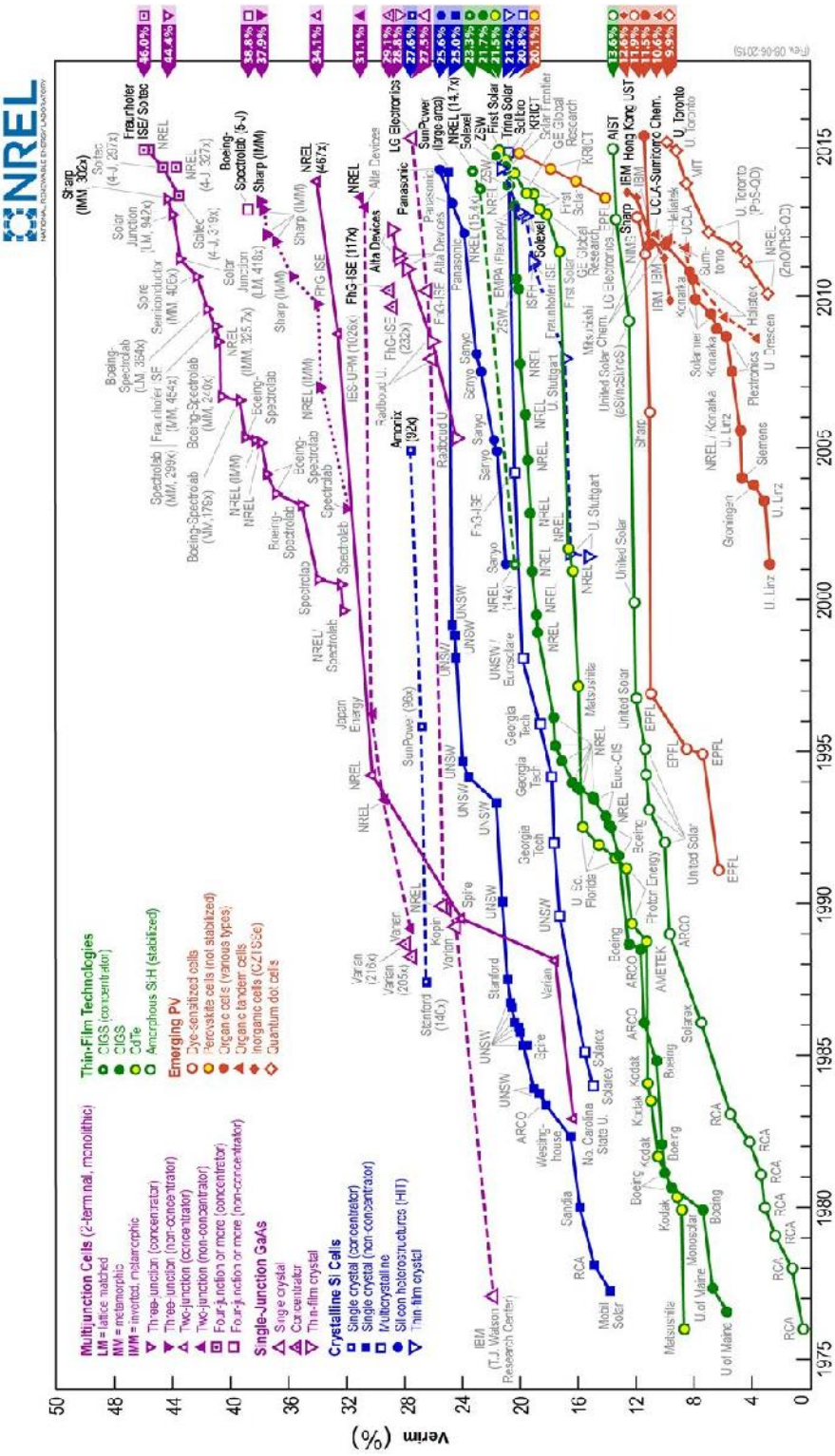


Şekil 2.12. Güneş hücresinin eşdeğer devresi.

Verimli bir güneş hücresi için; tüketim bölge alanı elektron deşik çiftinin oluşumu ve birbirinden ayrılabilmesi için heteroeklemler haricinde ön yüzeye mümkün olduğu kadar yakın olmalı ve üst yüzeyin altındaki yarıiletken yüksek enerji aralığına sahip olmalıdır. Işıma altında oluşan yük taşıyıcılarının güneş hücresinin alt ve üst kontaklarına ulaşabilmesi için difüzyon uzunlukları soğurma katsayısının tersi ile karşılaştırıldığında büyük olmalıdır ($L_D \gg \frac{1}{\alpha(v)}$).

Seçilen yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralıkları güneş spektrumu ile uyumlu olmalıdır. Güneş spektrumuna bağlı olarak güneş enerjisinin çevirimi için 1,1-1,5 eV değerlikli bir yarıiletken, güneş hücresi için uygun olmaktadır (Bucher, 1986).

Fotovoltaik pazarda silisyum elementinin kristal ve amorf ince film yapıdaki güneş hücreleri, pazar payının % 99'nu oluşturmaktadır. Silisyum tabanlı güneş hücresi teknolojisinin oldukça gelişmiş olması ve band aralığının (1,1 eV) güneş spektrumuna uygun olması, bu oranın ortaya çıkmasında önemli bir faktördür. Fotovoltaik enerji çeviriminde dünya üzerindeki araştırma ve geliştirme laboratuarlarında yapılan çalışmalar, bu yolla üretilen enerjinin maliyetini azaltmak yönündedir. Bu amaçla geliştirilen ince film teknolojisi ile güneş hücresi üretiminde 1-2 μm kalınlığında yarıiletken malzemeler kullanılmakta ve üretim maliyetleri kristal silisyum güneş hücrelerine göre düşük olmaktadır (Wrpnski et al., 1996). Bu teknoloji kullanılarak üretilen Amorf Si (a-Si), CdTe ve Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) yapılı güneş hücreleri ticari alanlarda günümüzde kullanılmaktadır (Goetzberger and Christopher, 2003). Güneş hücrelerinin verimlilik değerlerinin yıllara göre gelişimi, Şekil 2.13'de verilmektedir. Şekil 2.13'de görüldüğü gibi, 2015 itibarı ile, yaygın olarak kullanılan hücre yapılarından olan, tek kristal silisyum güneş hücreleri için % 25, çokkristal silisyum için % 20.8, ince film CIGS güneş hücrelerinde % 21.7, CdTe'de % 21.5 ve a-Si hücrelerde ise % 13.6 değerlerinde hücre verimliliklerine ulaşılmıştır (NREL, 2015).

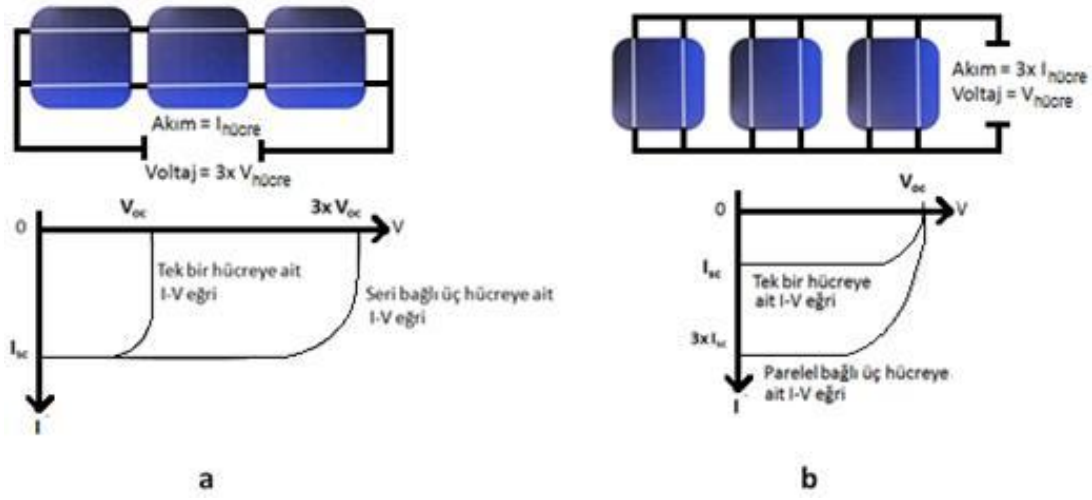


Şekil 2.13. Güneş hücrelerinin yıllara göre verimlilik değerlerinin gelişimi (NREL,2015).

2.3 Fotovoltaik Modül

2.3.1 Fotovoltaik modülün yapısı

Fotovoltaik modüller gereksinim duyulan akım ve voltaj değerlerine göre güneş hücrelerinin birbirlerine elektriksel olarak bağlanması ile oluşturulur. Standart test koşulları altında bir güneş hücresinden verimliliğe bağlı olarak 1,0 ile 1,5 W arasında güç ve 0,5-0,6 V gerilim elde edilmektedir. Fakat birçok elektronik uygulamalarda, bu gerilim değeri kullanılmamaktadır. Yüksek değerlerde gerilim elde edilmesi amacıyla güneş hücreleri elektriksel olarak birbirleriyle seri olarak bağlanırlar. Şekil 2.14-a'da örnek olarak, üç tek hücrenin seri bağlantısı gösterilmektedir. Bağlantının akım değeri tek bir güneş hücresinden elde edilen akıma eşit olup, gerilim değeri $3 \times V_{hücre}$'dir. Elektronik uygulamalar için yüksek akım değerlerine gereksinim olması durumunda, güneş hücreleri birbirleriyle Şekil 2.14-b'deki gibi elektriksel olarak paralel bağlanır. Bu durumda, güneş hücre grubundan elde edilen akım her bir hücrenin akım değerlerinin toplanması sonucu $3 \times I_{hücre}$ değerine eşit olup, gerilim değeri $V_{hücre}$ olacaktır (Pearsall and Hill, 2001).



Şekil 2.14. Güneş hücrelerinin, a) seri bağlantı şeması, b) paralel bağlantı şeması.

Seri bağlı güneş hücrelerinin çevresel faktörlerden korunması amacıyla oluşturulan birime PV modülü adı verilir. PV modüller Şekil 2.15'de gösterildiği gibi; ön yüzlerinde yüksek optiksel geçirgenliğe sahip temperli cam (low-iron tempered glass), güneş hücrelerinin ön ve arka yüzeyini kaplayan güneş ışınlarından etkilenmeyen EVA (ethylene vinyl acetate), seri bağlı güneş hücreleri, alt yüzeyin yalıtımı sağlayan plastik tedlar kaplamadan oluşur. Bu tabakalar bir araya getirilerek vakum altında basınç ve ısı uygulanmasıyla laminasyonu gerçekleştirilir. Ayrıca, camı korumak ve sistemi daha kolay kullanılabilir sağlam bir yapıya kavuşturmak için modül, metal (çoğunlukla alüminyum) çerçeve ile çerçevelenir (Roberts, 1991).

Standart fotovoltaik modüller 20 W–300 W arasında güce sahiptirler. Kullanım amacına göre fotovoltaik modüllerin voltajları değişiklik göstermektedir. Modüller tarafından üretilen enerjinin depolanmasına ihtiyaç duyulursa, modül voltajının depolama birimi ile uyumlu olması gerekmektedir. Depolama ünitesi olarak kullanılan akülerin voltaj değerleri genellikle 12 V olmasından dolayı, modüllerin çıkış voltaj değerleri 12 V ve katları 24 V - 36 V - 48 V civarında olmalıdır. Şehir şebekesi ile bağlantılı sistemlerde kullanılan modüllerin voltaj değerleri, doğru akım/alternatif akım dönüşümünü sağlayan çeviricilere bağlı olarak geniş aralıkta değişmektedir.

Şekil 2.15. PV modül ve katmanlı iç yapısının görünümü.

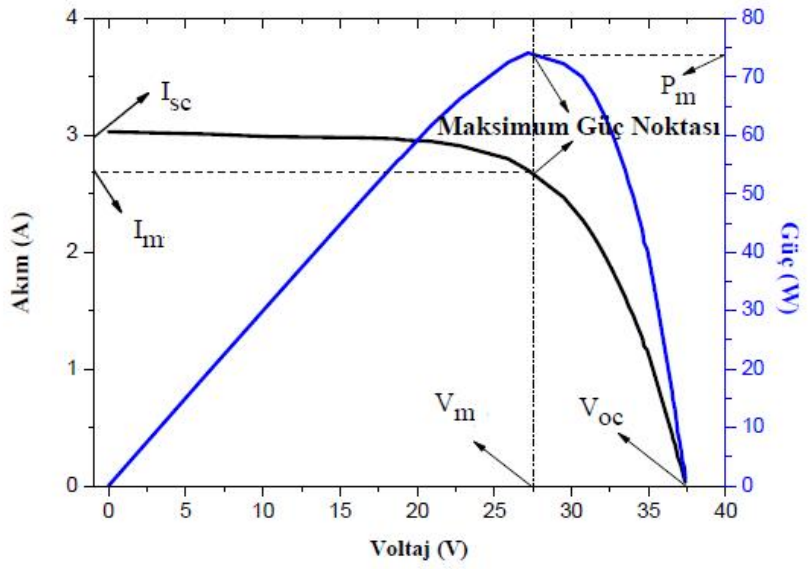
2.3.2 Fotovoltaik modülün elektriksel karakteristiği

Bir modülün I-V karakteristiği kendisini oluşturan güneş hücrelerinden birine ait I-V karakteristiği ile benzerdir ve aynı denklemler ile açıklanabilir. Buradaki farklılık ters doyma akımı, diyot faktörü, seri ve paralel dirençler tüm modülü temsil etmektedir ve bunlar tip, sayı ve hücrelerin elektriksel bağlantısına bağlıdır. N tane seri bağlı güneş hücrelerinin oluşturduğu PV modülün çıkış akımı

$$I = I_L - I_s\left\{exp\left[\frac{V+IR_s}{nNV_T}\right] - 1\right\} - \frac{V+IR_s}{R_p} \qquad (2.10)$$

formülü ile verilmektedir. Burada I; modül çıkış akımı, I_L foto akımı, N seri bağlı güneş hücre sayısını, n diyot idealite faktörünü, R_s seri direnci, R_p paralel direnci, $V_T = kT/q$ termal voltaj, T güneş hücresi sıcaklığını, k Boltzmann sabitini (1.38×10^{-23} J/K), q elektrik yükünü (1.6×10^{-19} C), V modülün terminal voltajını temsil etmektedir (Duffie and Beckman, 1991).

Bir modülün karakteristiği açık devre voltajı, kısa devre akımı, dolum faktörü ve maksimum güç noktası parametreleri ile açıklanır. Buradaki maksimum güç noktası, tek bir güneş hücresinden ziyade modülü temsil etmektedir. Şekil 2.16, bir modülün güç-voltaj ve akım-voltaj ilişkisini vermektedir.

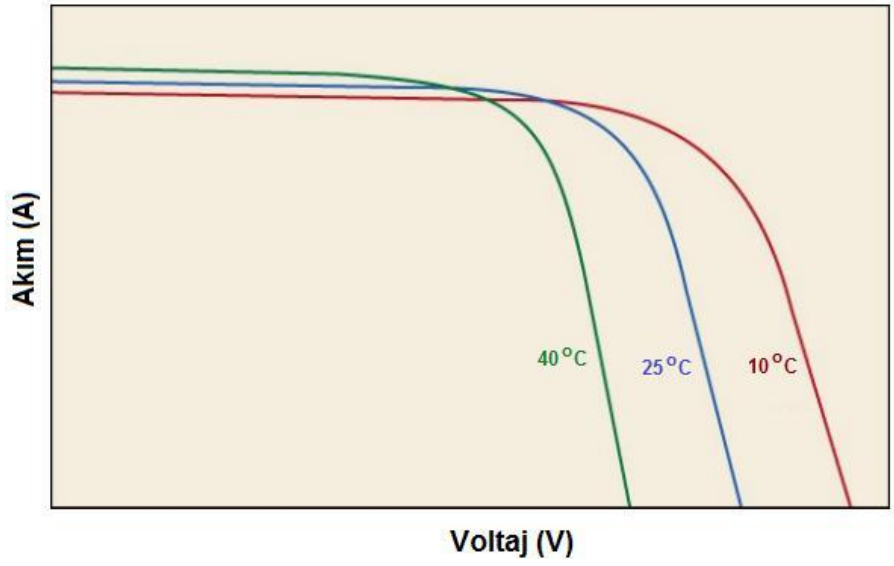


Şekil 2.16. Bir PV modülün elektriksel karakteristiğinde önemli olan parametreler.

Modül yüzeyi üzerine gelen ışınımın % 80 – 90'lık kısmı ısı olarak transfer edilir ve bundan dolayı modülün çalışma sıcaklığı geniş bir aralıkta değişebilir. Modül sıcaklığındaki artış fotoakımı dolayısıyla kısa devre akımını I_{sc} arttırmasına rağmen açık devre voltajı V_{oc} değeri termal örgü titreşimlerinin artmasından kaynaklanan elektron-fonon saçılmaları, taşıyıcı mobilitelerindeki azalmadan dolayı düşmektedir. Açık devre voltajındaki hızlı düşüş dolum faktörü değerinin düşmesine ve dolayısıyla modül verimliliğinin azalmasına yol açacaktır (Radziemska, 2003). Bir PV modülün I-V karakteristiği üzerindeki sıcaklığın etkisi, Şekil 2.17'de gösterilmektedir. Modül çalışma sıcaklığı mevsime bağlı çevre sıcaklığının ve nüfuz eden güneş ışınımının fonksiyonu olarak değişir ve ayrıca modül dizaynına ve modülün yerleştirilmesine bağlıdır. Modül dizaynında bu etkilerin ölçümü, modülün *Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT)* ile verilir.

Bir modülün verimliliği, modülden elde edilen gücün, modül üzerine düşen güneş ışınım gücüne oranı olarak tanımlanır.

$$\eta_e = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{A_m G} \tag{2.11}$$



Şekil 2.17. PV modülün farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği.

V_m, maksimum modül çıkış voltajı, I_m, maksimum modül akımı, A_m, modül nominal alanı, G, modül yüzeyi üzerine gelen güneş ışınımı değerlerini vermektedir. Modül verimliliğinin sıcaklığa bağımlılığı fotovoltaik sistemlerin çalışmasında önemli bir parametreyi oluşturmaktadır. Anlık modül verimliliğinin sıcaklığa bağımlı olarak değişimi,

$$\eta_e = \eta_{ref} + \mu_{P,mp}\left(T_c - T_{c,ref}\right) \tag{2.12}$$

ile verilir (Radziemska, 2003). η_{ref} standart test koşulları altında tanımlanan referans modül verimliliği, T_c hücre sıcaklığı, $T_{c,ref}$ referans sıcaklığıdır (298 K). $\mu_{P,mp}$ değeri bir çok model için sıcaklığa bağlı olarak lineer bir şekilde azalan modül verimliliğinin değişme biçimini ifade etmektedir ve negatif bir sayıdır. Silisyum için $\mu_{P,mp}$ değeri -4.5x10^{-3} K^{-1} 'dir (Radziemska, 2003; Zondag, et al., 2002). Maksimum güç noktası verimlilik sıcaklık katsayısı;

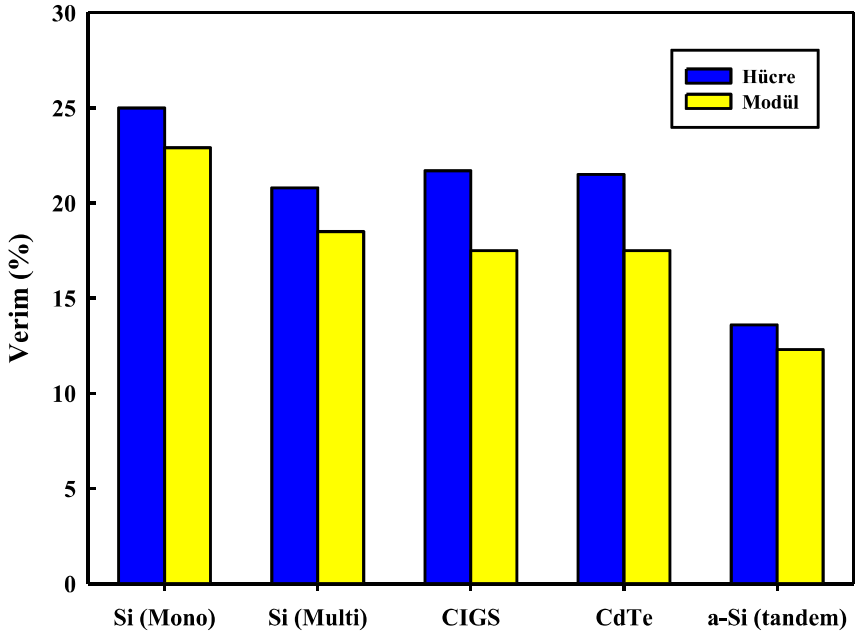
$$\mu_{P,mp} = \frac{d\eta}{dT} = \left(I_m \frac{dV_m}{dT} + V_m \frac{dI_m}{dT}\right) \frac{1}{A_m G_T} \tag{2.13}$$

dir. Bir çok model için kısa devre akımının sıcaklık ile değişimi, açık devre voltajı değişimine kıyasla oldukça küçük olmasından dolayı ihmal edilmektedir ve bu nedenle modül verimliliğinin sıcaklık katsayısı açık devre voltajının sıcaklıkla değişmesine bağlıdır. Bu nedenlerden dolayı $\frac{dV_m}{dT}$ değeri, yaklaşık olarak $\frac{dV_{oc}}{dT}$ değerine eşit olmaktadır. Maksimum güç noktası verimliliğin sıcaklık katsayısı, daha sade bir ifade ile aşağıdaki şekli almaktadır (Duffie and Beckman, 1991).

$$\mu_{P,mp} = \frac{d\eta}{dT} = \left(I_{mp} \frac{dV_{oc}}{dT}\right) \frac{1}{A_m G} \tag{2.14}$$

Modüllerin maksimum akım, voltaj ve çıkış gücü değerleri standart test koşulları altında (1 kWm^{-2} güneş ışınımı, AM 1,5 global spektrumda ve çalışma sıcaklığı 25 ^{0}C) tanımlanmaktadır. Test koşulları tam olarak Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'nda tanımlanmıştır (standart numarası 60904 IEC, 1987) (Pearsall

and Hill, 2001). Modül verimliliği, ön yüzeyi oluşturan cam tarafından güneş ışınlarının bir kısmının yansıtılması, modül çerçevesi tarafından yüzeyde oluşan kısmi gölgelenmeler, yüksek modül sıcaklıkları ve modül alanının daima hücreleri toplam alanından büyük olmasından dolayı güneş hücresi verimliliğinden % 1-3 arasında daha düşüktür. 2015 yılı itibarı ile, yaygın kullanılan PV modül verimlilikleri, tek kristal silisyum modüllerde % 22.9, çok kristal silisyum modüllerde % 18.5, CIGS modüllerde % 17.5, CdTe modüllerde % 17.5 ve a-Si modüllerde % 12.3'dir (Green vd, 2015). Bu PV modüllerin verimlilikleri ile PV hücre verimlilikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.18'de verilmektedir.



Şekil 2.18. PV güneş hücresi ve modül verimlilikleri (Green et al, 2015; NREL,2015)

2.4 Düzlemsel Güneş Kolektörleri

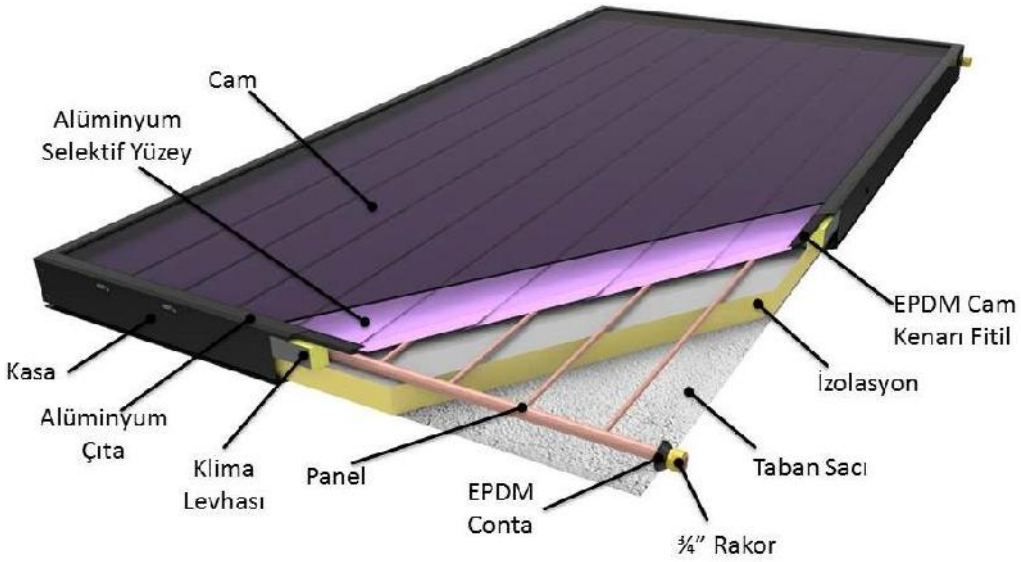
2.4.1 Düzlemsel güneş kolektörlerin yapısı

Güneş enerjisinden faydalanma, en yaygın şekilde, düzlemsel kolektörlerle olmaktadır. Tipik bir düzlemsel güneş kolektörünün şeması, Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Düzlemsel güneş kolektörleri, küçük ısıl yüklerde basit ısıl uygulamalarda kullanılan ekonomik, çevreye zararsız, pratik ve basit ısı değiştiricileridirler. Yapımları için karmaşık teknolojiye gerek yoktur. Konutların sıcak su ve ısıtma sistemleri, soğutma sistemleri, tarımsal ürünlerin kurutulması,

yüzme havuzlarının ısıtılması ve seraların ısıtılması gibi birçok uygulamada düzlemsel güneş kolektörleri kullanılırlar. Düzlemsel güneş kolektörlerinde, güneş enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesi, güneş radyasyonunun siyah yüzeylerde soğurulması ve sıcaklığı artan siyah yüzeyden ısının bir akışkana aktarılması ile olur. Düzlemsel güneş kolektörleri, akışkanın cinsine göre sıvılı ve gazlı olmak üzere iki ana grupta toplanır. Bu tez çalışmasında, sıvılı düzlemsel güneş kolektörlerinin verimleri deneysel olarak incelendiğinden sadece sıvılı kolektörler hakkında bilgi verilmiştir.

Sıvılı düzlemsel güneş kolektörlerinin önemli avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Konstrüksiyonu daha basittir.
- Yayılı ışınımlardan faydalanabilir.
- Tesisatın yerleştirileceği zeminin hazırlanması kolaydır.
- Hareketli kısımları yoktur.
- Hava şartlarına dayanıklı ve daha uzun ömürlüdür.
- İşletme masrafları azdır.
- Havalı kolektöre göre verimi yüksektir.



Şekil 2.19. Düzlemsel güneş kolektörünün şeması.

Basit ve kullanışlı olması sebebiyle geniş kullanım alanına sahip düzlemsel kolektörler 5 temel parçadan oluşmaktadır:

1. Saydam örtü
2. Soğurucu tabaka
3. Akışkanın dolaştığı boru
4. Yalıtım
5. Kasa.

Düzlemsel güneş kolektöründe, soğuk akışkan, dağıtıcı borudan, kolektör uzunluğunca yerleştirilen ve soğurucu tabaka ile temas halinde olan borulara dağıtılır. Soğurucu tabaka sıcaklığı, üzerine düşen güneş ışınımını soğurması sayesinde artar. Isınan tabakadan, temas halindeki boru içinden akan akışkana iletimle ve taşınımla ısı geçişi olur. Isınan akışkan toplayıcı boruda toplanarak kullanılacak yere alınır. Kolektör parçalarının görevleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Saydam örtü:

Saydam örtü, kolektörlerin üstten olan ısı kayıplarını en aza indirgeyen ve güneş ışınlarının geçişini engellemeyen bir maddeden seçilmelidir. Rüzgarlı bölgelerde taşınımla olan ısı kayıpları çok fazla olmaktadır. Saydam örtü taşımınla çevreye olan ısı kaybını önlediği gibi soğurucu tabakayı yağmur, dolu ve toz gibi dış etkilerden de korur. Kolektörlerde kullanılan saydam örtülerin, güneşten gelen ısı ışınımının yoğun olduğu kısa dalga boylu güneş ışınımını geçirme oranı büyük, ve ayrıca, soğurucu tabakadan yayılan uzun dalga boylu ışınımın dışarı çıkmaması için de uzun dalga boylu ışınımı geçirme oranı küçük olmalıdır. Bu özellik sayesinde sera etkisi oluşmaktadır. Pencere camları bu özelliği sağlamaktadır. Ayrıca saydam örtü, ucuz olmalı, kolay temin edilebilmeli, morötesi güneş ışınlarından etkilenmemeli, yüksek sıcaklıklara dayanabilmeli, kolay işlenebilmeli ve çevreden gelecek etkilere (dolu, taş v.s) dayanıklı olmalıdır.

Soğurucu tabaka ve boru:

Soğurucu tabaka, kolektörlerde güneş ışınımını soğuran ve ısıyı, borulardaki akışkana aktaran kısımdır. Soğurucu tabaka, ışınları soğurması için koyu bir renge

genellikle siyah esaslı boyalarla boyanır ya da seçici yüzeyle kaplanır. Soğurucu tabaka, üzerine gelen güneş ışınımını soğurur ve sıcaklığı artar. Soğurucu tabakanın, güneş ışınımını soğurma oranının büyük ve uzun dalga ışınım yayma oranının küçük olması gerekir. Işınımı soğurarak ısınan tabaka, ısıyı, temas halinde bulunduğu akışkana iyi bir şekilde iletmesi için, ısı iletim katsayısının yüksek olması gerekir. Isı geçişinin çabuk ve iyi olması için levhalar ince yapılır. Akışkanın dolaştığı boru veya kanallarda ise, ısı nihai kullanım amacı için faydalı ısı enerjisi olarak akışkana aktarılır. Kolektörlerde soğurucu tabaka ve boru malzemesi olarak genellikle, bakır, alüminyum ve paslanmaz çelik kullanılır. Bakırın ısı iletim katsayısı yüksek olmasına rağmen, diğer malzemelere göre daha pahalıdır. Çelik ise piyasadan kolay temin edilebilir, fakat korozyona müsait bir metaldir. Diğer taraftan, seçilen malzemenin lehim veya kaynak yapılabilme özelliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bakırın lehimi kolay ama pahalıdır. Alüminyumun başka bir metal ile lehim veya kaynağı ise özel yöntemler gerektirir. Burada önemli olan bir diğer nokta boru–soğurucu tabaka temasının çok iyi olmasıdır. Birleşim yöntemi olarak kaynak yönetiminin kullanımı, bu teması çok iyi sağlar. Ancak boru ve soğurucu tabaka malzemelerinin farklı olması durumunda kullanılan kenetleme yöntemlerinde temas konusunda problemler vardır.

Isı yalıtımı ve kasa:

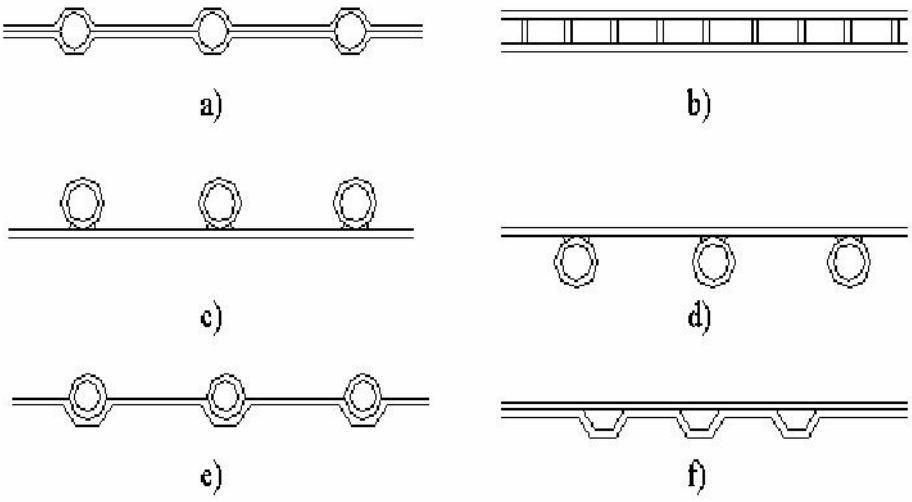
Kolektörlerin arka ve yan kısımlarından olan ısı kayıplarını azaltmak için, soğurucu tabaka ile kasa arası ısı iletim katsayısı düşük malzemelerle yalıtılır. Yalıtım malzemesi seçilirken ısı iletim katsayısının düşük olması yanında, yüksek sıcaklığa dayanabilir ve neme dirençli olması ve şekil değiştirme, yanma ve genişleme özellikleri göz önünde bulundurulur. Cam yünü, strafor ve poliüretan; ısı iletim katsayılarının küçüklüğü ve hafifliği sebebiyle en çok tercih edilen kolektör yalıtım malzemelerindendir. Cam yünü yüksek sıcaklıklara dayanıklı olduğundan, yüksek sıcaklıklara çıkılan kolektörlerde strafor veya poliüretan üzerine (kolektör levhası tarafına) cam yünü konulur. Yalıtım malzemesi ile kolektör levhası arasında bir hava boşluğu bırakılması ve yalıtım malzemesinin üzerinin ışınım yansıtma oranı büyük olan alüminyum folyo ile kaplanması durumunda ısı kaybı daha az olur ve bu durumda yalıtım malzemesi yüksek sıcaklıklara çıkmaz. Yalıtım malzemesi kalınlığı, soğurucu tabaka sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki farka bağlı olarak seçilir.

Yüksek sıcaklıklara çıkılan kolektörlerde, yalıtım kalınlığı artırılmalıdır.

Kolektör kasası olarak alüminyum ve paslanmaz çelik gibi malzemeler kullanılabilir. Kullanılan malzemeye göre, gövde tasarımı değişiklik gösterir. İmalatçılar, genellikle kolektör gövdesi olarak ekstrüze alüminyum profili tercih ederler. Çünkü, ekstrüze alüminyum profil hafiftir ve mümkün olan en yüksek esnekliğe sahiptir. Daha karmaşık şekiller maliyeti düşük olan bu profil ile üretilebilir. Kasa, yalıtım malzemesinin ıslanmasını önleyecek sızdırmazlıkta olmalıdır. Özellikle kolektör giriş ve çıkışında kasanın tam sızdırmazlığı, yüksek sıcaklığa dayanıklı contalar ile sağlanır. Düzlemsel kolektörlerde, camda oluşan su buharını dışarıya atmak maksadı ile, kasanın iki yan kenarına tam karşılıklı ikişer adet 2–3 mm çapında delik açılır. Kolektörün yapım aşamasında, kullanılan malzemelerin ısıl genleşmeleri de dikkate alınmalıdır.

Düzlemsel Kolektörlerin Dizaynı:

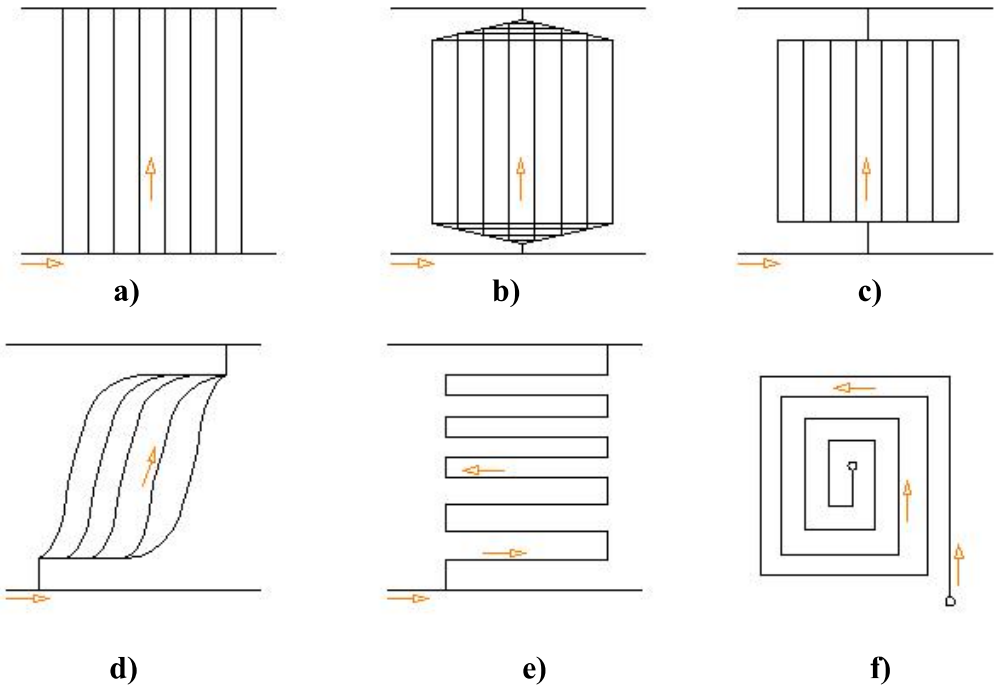
Düzlemsel güneş kolektörleri dizaynında, Şekil 2.20'de gösterilen boru-soğurucu tabaka bağlantı şekilleri kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan bağlantı Şekil 2.20.a'daki konfigurasyondur. Bu bağlantı şekilleri daha çok kaynaklı birleşim şeklinde olup, kenetleme yöntemi de kullanılmaktadır. Ayrıca, ekstrüzyon imalat yöntemleri de özellikle alüminyum malzeme için uygulanmaktadır.



Şekil 2.20. Kolektör boru–soğurucu tabaka bağlantı şekilleri.

Bunun yanı sıra, boruların kolektör alanında dolaştırması Şekil 2.21'de

gösterilmiştir. En çok kullanılan dolaşım yöntemi ise Şekil 2.21.a'da gösterildiği gibi dikey paralel borular kullanılmasıdır. Bu durumun imalat kolaylığının yanında tabi dolaşım kolaylığı da vardır. Şekil 2.21.e ve f durumlarında ise akışkanın kolektörden çıkış sıcaklığı daha yüksek olacaktır.



Şekil 2.21. Kolektör borularının farklı dolaştırılma şekilleri.

2.4.2 Düzlemsel güneş kolektörlerinin termal analizi

Düzlemsel güneş kolektörlerinin verimlerini artırıcı tasarımların yapılması, ancak teorik ve deneysel olarak ısıl analizlerinin detaylı yapılması ile mümkün olmaktadır. Düzlemsel güneş kolektörü, Şekil 2.22'de ısı akış şeması gösterildiği gibi, prensipte üzerine düşen güneş ışınım enerjisini akışkana faydalı ısı enerjisi şeklinde aktaran bir ısı dönüştürücüsüdür. Kolektör, bir kontrol hacmi olarak ele alınırsa, öncelikle, kolektör üzerine gelen güneş ışınımının bir kısmı saydam örtüde yansır ve saydam örtüyü geçen kısmı soğurucu tabakaya ulaşır. Yansıtılan kısım kolektör optik verimi [soğurma–geçirme katsayısı, $(\tau\text{-}\alpha)$] ile ifade edilir.

Soğurucu tabakaya gelen ışınım enerjisi (Q_g), siyah tabaka yüzeyi tarafından soğurulur ve tabakanın sıcaklığı artar. Yüksek sıcaklıktaki tabakadan; ısı, iletim yoluyla borulara ve boru iç yüzeyinden taşınımla akışkana faydalı termal enerjisi (Q_f) olarak aktarılır. Bu esnada, sıcaklığı artan soğurucu tabakadan

düşük sıcaklıktaki çevreye ışınım ve taşınım yolu ile termal kayıplar (Q_k) olmaktadır. Eğer, ısıl olarak sürekli rejime ulaşılmamış ise, kolektör ısıl ataletine bağlı olarak kolektörün ısınması veya soğuması şeklinde bir miktar depolama da (Q_d) olabilecektir. O halde, kolektör üzerine gelen güneş ışınım enerjisi sürekli rejimde ya suya aktarılmakta ya da çevreye kaybolmaktadır. Bu durumda, kolektör bir kontrol hacmi olarak değerlendirilip, kolektörün tamamı için anlık enerji korunumu uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir:

$$Q_g = A_t G = Q_f + Q_k + Q_d \tag{2.15}$$

Burada;

A_t: Kolektör yüzey alanı (m^2)

G: Kolektör üzerine gelen anlık güneş ışınımı (W/m^2)

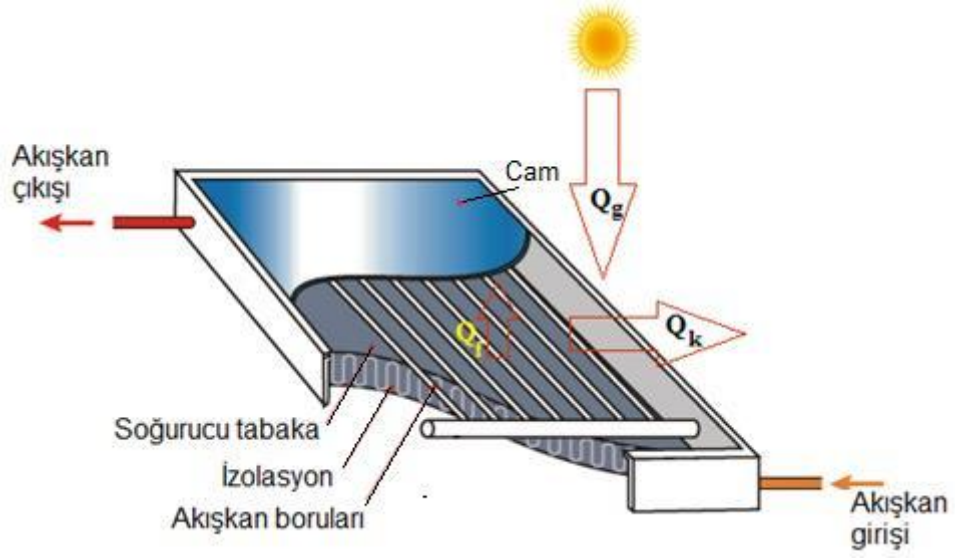
Q_g: Soğurucu tabakaya gelen ışınım enerjisi (W)

Q_f: Akışkana aktarılan faydalı enerji (W)

Q_d: Depolanan enerji (W)

Q_k: Toplam termal kayıp (W)

dir. Bu fiziksel büyüklükler aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.22. Düzlemsel güneş kolektörünün termal analiz şeması.

Kolektör üzerine gelen anlık güneş ışınımı (I_e):

Kolektör üzerine gelen anlık güneş ışınımı (I_e), birçok astronomik, geometrik ve coğrafik parametrenin fonksiyonudur ve yılın her günü ve günün her anı için farklıdır. Bu ışınım, ışınım ölçen cihazlarla belirlenebileceği gibi, Bölüm 2.1'de detayları verilen yarı ampirik denklemlerle de hesaplanabilir.

Akışkana aktarılan faydalı enerji (Q_f):

Kolektörden akışkana aktarılan faydalı enerji miktarı (Q_f), suyun kolektöre giriş (T_g) ve çıkış sıcaklığı ($T_ç$) ile debisinin deneysel olarak belirlenmesi durumunda aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$Q_f = \dot{m} c_p \left(T_ç - T_g\right) \tag{2.16}$$

Depolanan enerji (Q_d):

Depolanan enerji (Q_d), kolektör sürekli rejimde değil iken ısınması ve soğuması esnasındaki ısıl ataletinden kaynaklanmaktadır ve miktarı, kayıp ve faydalı enerjiye göre genellikle ihmal edilebilecek seviyelerdedir.

Kayıp enerji (Q_k):

Kolektörde meydana gelen ısı kayıpları, kolektör geometrisinin yanı sıra, çevre sıcaklığı, rüzgar hızı, saydam örtü sayısı ve özellikleri, yalıtım şekli ve yalıtım malzemesi özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Düzlemsel kolektörlerde, çevreye olan ısı kaybı, kolektörlerin üst, alt ve yan yüzeylerinden olur. Kolektör yan yüzey alanları küçük olduğundan genelde kayıp hesaplarına katılmaz. Soğurucu tabaka ile çevre arasındaki toplam ısı kayıp katsayısı (K), kolektör alt yüzeyinden (K_{alt}) ve üst yüzeyinden ($K_{üst}$) olan ısı kayıp katsayılarının toplamıdır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$K = K_{alt} + K_{üst} \tag{2.17}$$

Bu tez çalışmasında, bu tür kayıpların hesaplanması yapılmayacaktır. Bundan

dolayı bu hesaplamalar ile ilgili olarak burada ayrıntılı bilgi verilmeyecektir. Ayrıntılı hesaplamalar ile ilgili bilgiler Nukolić and Lukić (2015) tarafından yapılan çalışmada ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Anlık kolektör verimi

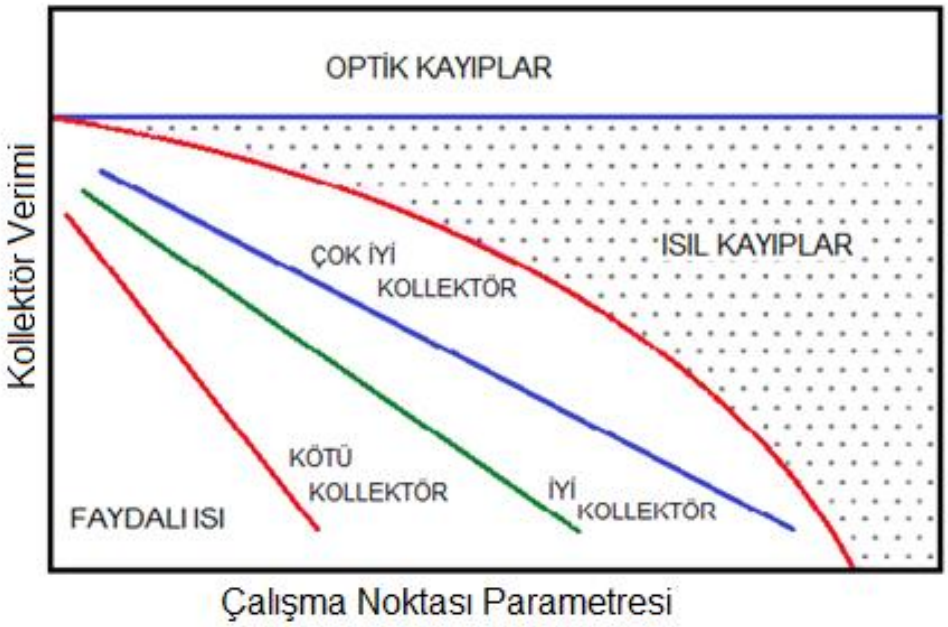
Anlık kolektör verimi, yüzeye gelen güneş ışınımının, faydalı enerji olarak akışkana aktarılma oranı ile tanımlanır ve denklem 2.18'deki formülle ifade edilir.

$$\eta_t = \frac{Q_f}{Q_g} = \frac{\dot{m}c_p(T_ç - T_g)}{A_t G} \tag{2.18}$$

Burada, G (W/m^2) kolektör yüzeyine o anda gelen güneş ışınımı ve A_t (m^2) kolektör alanıdır. Kolektör üzerine gelen anlık güneş ışınımı, bulunulan yere ve zamana bağlı olarak ampirik formüllerle hesaplanabileceği gibi ölçüm yapan cihazlarla da tespiti mümkündür. Kolektör verimi, kolektöre gelen güneş ışınımının yanında, çevre ve çalışma şartlarının da fonksiyonudur. Bu nedenle verim, denklem 2.19'da belirtilen çalışma noktası parametresine (veya işletme noktası parametresi) göre değerlendirilir. Çalışma noktası parametresi, akışkanın kolektöre giriş sıcaklığı (T_g) ve çevre şartlarına (T_o) bağlı olarak aşağıdaki denklemde verilmektedir.

$$P = \frac{T_g - T_o}{G} \tag{2.19}$$

Kolektör veriminin çalışma noktası parametresine (P) göre tipik değişimi, Şekil 2.23'de görüldüğü gibi yaklaşık lineer olarak gerçekleşir. Doğrunun eğimi azaldıkça, kolektörün ortalama verimi artar ve kolektör verimi, pratikte, artan çalışma noktası parametresiyle doğrusal azalım gösterir.



Şekil 2.23. Güneş kolektörü veriminin işletme noktası parametresine göre tipik değişimleri.

Eğer ısıl kayıplar dikkate alınırsa, Q_f,

$$Q_f = A_t\left[S - U_L(T_{p,m} - T_o)\right] \tag{2.20}$$

ile verilir (Charalambous et al., 2007). Burada, S soğurulan güneş enerjisi, U_L kolektörün tamamının ısı kayıp katsayısı, $T_{p,m}$ ortalama tabaka sıcaklığı, T_o ise ortam sıcaklığıdır. Hottel and Willier (1958), Denklem (2.20)'yi modifiye ederek aşağıdaki şekilde yazmışlardır:

$$Q_f = A_t F_R\left[S - U_L(T_g - T_o)\right] \tag{2.21}$$

Burada F_R,

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_t U_L}\left[1 - exp\left(-\frac{A_t U_L F'}{\dot{m}C_p}\right)\right] \tag{2.22}$$

ile verilir. F' kolektör verim faktörü olup,

$$F' = \frac{1/U_L}{W\left[\frac{1}{U_L[D_0+(W-D_0)F]}+\frac{1}{C_b}+\frac{1}{\pi D_i h_{fi}}\right]} \tag{2.23}$$

ile verilir. Burada, C_b soğurucu tabaka (fin) ile boru arasındaki iletkenlik, h_{fi} akışkanın ısı transfer katsayısı ve F soğurucu tabaka (fin) verim faktörü olup aşağıdaki gibi verilir:

$$F = \frac{\tanh(x)}{x} \tag{2.24}$$

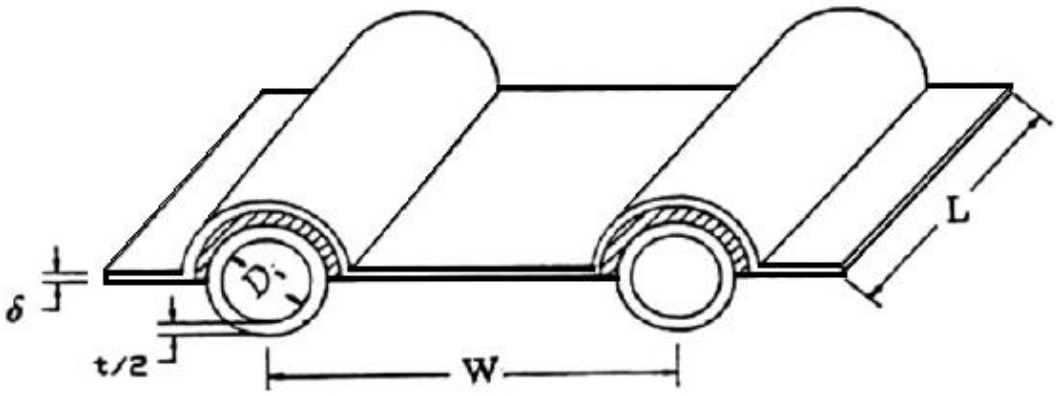
ve x ise,

$$x = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}}\left(\frac{W-D_0}{2}\right) \tag{2.25}$$

olup burada,

$$D_0 = D_i + t \tag{2.26}$$

dir. Denklemlerdeki, D_i akışkan boru çapı, W iki boru arasındaki uzaklık ve δ soğurucu tabaka kalınlığıdır. Bu nicelikler, Şekil 2.24'de açık olarak verilmektedir.



Şekil 2.24. Soğurucu tabakanın şematik gösterimi.

2.5 Fotovoltaik/Termal (PV/T) Modüller

PV/T modüller, hem fotovoltaik modül ve hem de termal kolektörden oluştuğundan dolayı, güneş enerjisinin hem elektriksel hem de termal olmak üzere, iki farklı şekilde dönüşümünü sağlayan sistemlerdir. Termal güneş sistemleri su ısıtması, mekân ısıtması ve güç üretimi, fotovoltaik sistemler ise elektrik enerjisi üretimi uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu iki sistemin bir arada kullanıldığı hibrit sistemlere, PV/T sistemler veya modüller denilmektedir. Bu sistemlerde amaç, tek bir sistemden hem ısı hem de elektrik enerjisi elde etmektir.

PV/T sistemlerinin ana üstünlükleri şunlardır:

1. PV/T sistemlerin kapladığı alandan üretilen toplam enerji (elektrik ve ısı enerjisi) daha fazladır.

2. Saydam örtü ve kasa, her iki panelin ortak bileşenleri olduğundan ve birleşik bir sistemde paylaşıldıklarından dolayı PV/T modüller, termal ve PV panellerin ayrı ayrı kullanılmasına oranla daha ekonomiktir (Loferski ve ark., 1982).

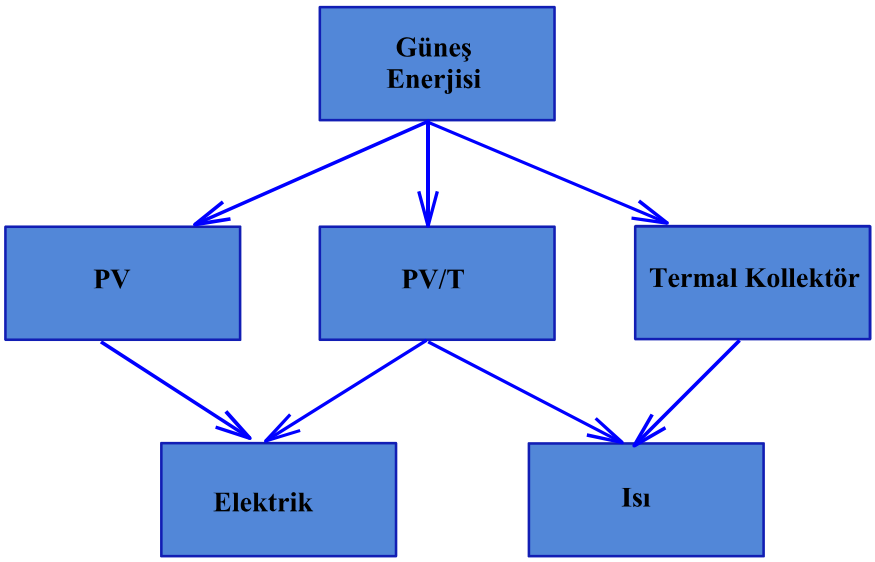
3. PV hücrelerin, termal güneş sistemleri kullanılarak soğutulması sonucu elektriksel veriminin arttırılması sağlanmaktadır.

Bilindiği gibi mono ve polikristal silikon hücrelerinin yüzey sıcaklığının 1°C artması, verimlerinin % 0,5 düşmesine neden olmaktadır. PV/T sistemlerde PV yüzeyin soğutulması, PV hücre sıcaklıklarının azalmasını, bu da sistemin elektriksel veriminin artmasını sağlamaktadır. PV/T modüller, hava tipli PV/T modüller ve su tipli PV/T modüller olmak üzere iki tiptir.

Elektrik üretiminde kullanılan PV modül ve ısı üretiminde kullanılan termal kolektörün birleşik bir sistem olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan PV/T sistemin kıyaslaması, Şekil 2.25'de görülmektedir. Şekil 2.25'de görüldüğü gibi, PV modül, güneş enerjisini sadece elektrik enerjisine; termal kolektör ise güneş enerjisini termal enerjiye dönüştürürken, PV/T modül, hem elektrik enerjisine, hem de termal enerjiye dönüştürmektedir.

PV/T modüllerin toplam verimi, elektriksel ve termal verimlerin toplamı olarak tanımlanır (He et al, 2006; Vokas et al., 2006).

$$\eta_T = \eta_t + \eta_e \tag{2.27}$$



Şekil 2.25. PV modül, termal kolektör ve PV/T modülün kıyaslanması.

2.5.1 Hava tipli PV/T modüller

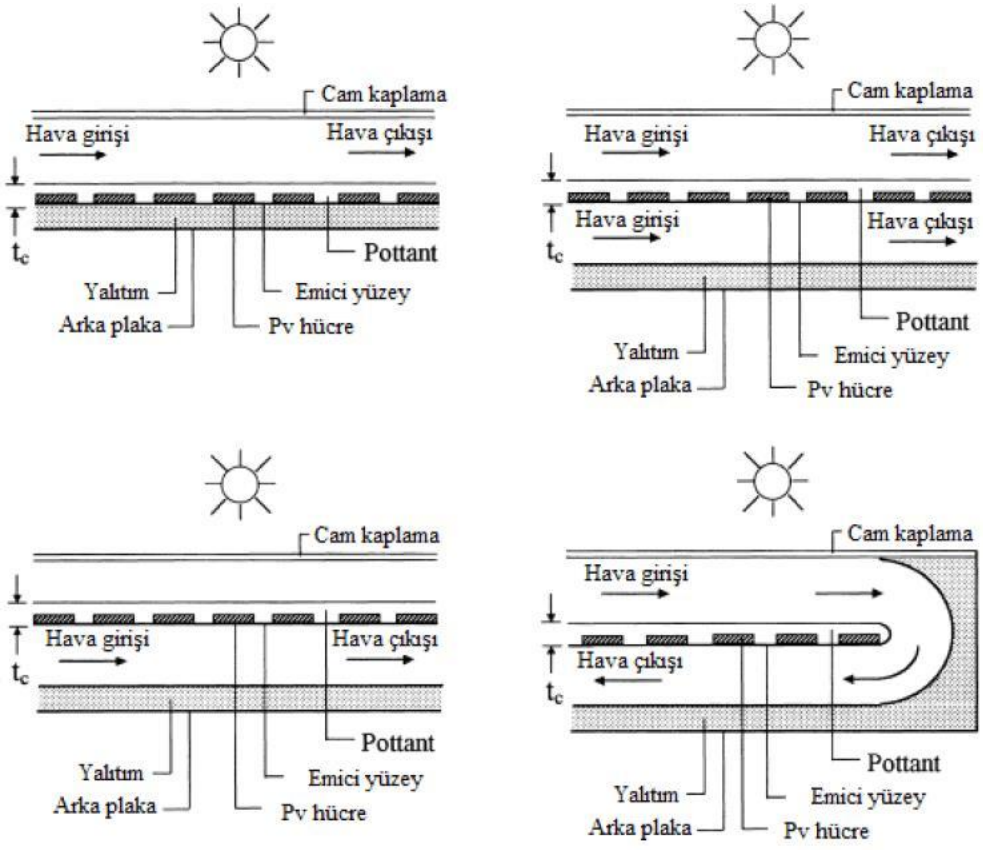
Genel olarak, PV/T kolektörler için en ucuz ve basit olan, hava ısıtmalı sistemlerdir. Bunlarda basit bir şekilde, PV modülün arkasındaki boşlukta yer alan hava devrettirilmektedir. Bu hava devinimi, paneli soğuturken arkasındaki havayı da ısıtmaktadır. Bu sistem, basit olarak Şekil 2.26'da görülmektedir (Chow, 2010).

Şekil 2.26. Hava tipli PV/T modülün basit modeli.

Hegazy (2000), nümerik model kullanarak 4 tip PV/T hava ısıtmalı güneş kolektörünü incelemiştir. Şekil 2.26'da görülen kolektörden farklı olarak sistemde, PV modülün üzerine cam örtü konularak 2. bir hava boşluğu yaratılması sonucu ayrı bir sistem oluşturulmuştur. 2. sistem, genelde kolektörlerde su ısıtılması

için kullanılan bir sistem olup, kolektörün üst yüzeyinden konveksiyonla olan ısı kayıplarını azaltmak amacıyla tasarlanmıştır.

PV/T havalı kolektör, düzlemsel hava ısıtmalı kolektörlerdeki siyah soğurucu yüzey üzerine PV hücrelerin yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Hem düşük derecede termal, hem de yüksek derecede elektriksel enerjilerin aynı üniteden elde edilmesi gibi bir avantajı beraberinde getirir. Sonuç olarak, iki ayrı ünitenin maliyetinden çok daha ucuz maliyete sahiptir. Düzlemsel hava ısıtmalı kolektörler, çok çeşitli tasarıma sahiptirler. En yaygın olarak kullanılanları Şekil 2.27'de görülmektedir. Bu tek camlı kolektörlerde hava, soğurucu yüzey üzerinden (Model 1), altından (Model 2), hem üzerinden hem altından (Model 3) ya da çiftli geçiş (Model 4) şeklinde akabilir (Hegazy, 2000).

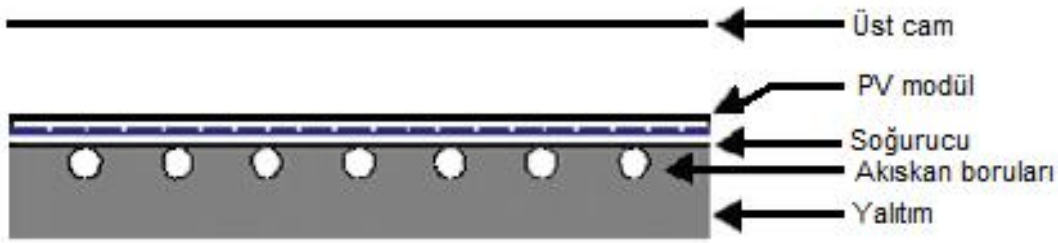


Şekil 2.27. Hava tipli PV/T modülün uygulama örnekleri (Hegazy, 2000).

2.5.2 Su tipli PV/T modüller

PV/T kolektörlerin diğer bir uygulaması da, su ısıtmalı sistemlerdir. En basit formunda PV/T sulu kolektör Şekil 2.28'de görüldüğü gibi, standart bir termal

güneş kolektörünün üzerine PV hücrelerin yerleştirilmesi ve PV modül üzerinde boşluk bırakılarak cam örtü kullanılarak oluşturulmaktadır (Chow, 2010).



Şekil 2.28. Su tipli PV/T modülün basit modeli.

2.6 Biyogaz Sistemleri

2.6.1 Biyogaz nedir?

Biyogaz terimi temel olarak organik atıklardan kullanılabilir gaz üretilmesini ifade eder. Diğer bir ifade ile oksijensiz ortamda mikrobiyolojik floranın etkisi altında organik maddenin karbondioksit ve metan gazına dönüştürülmesidir. Biyogaz elde edinimi, temel olarak organik maddelerin ayrıştırılmasına dayandığı için temel madde olarak bitkisel atıklar ya da hayvansal atıklar kullanılabilmektedir. Kullanılan hayvansal atıkların biyogaza dönüşüm sırasında fermente olarak daha yarayışlı hale geçmesi sebebiyle, dünyada temel materyal olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda tavuk atıklarından da oldukça verimli biyogaz üretimi sağlanabilmektedir. Tavuk atığının kullanımı tarım için önemlidir. Çünkü bu atık topraklarda gübre amaçlı kullanılamaz. Topraklarda tuzluluğa sebep olurlar. Kullanılamayan bu atık biyogaza dönüştürüldüğünde yarayışlı bir hal almış olur. Günümüzde biyogaz üretimi çok çeşitli çaplarda; tek bir evin ısıtma ve mutfak giderlerini karşılamaktan, jeneratörlerle elektrik üretimine kadar yapılmaktadır (Koçar vd, 2010).

2.6.2 Biyogaz teknolojisinin avantajları

İyi çalışan bir biyogaz sisteminin avantajları başlıca aşağıdaki gibidir:

- Biyogaz teknolojisi organik kökenli atık/artık maddelerden, hem enerji eldesine hem de atıkların toprağa kazandırılmasına imkan vermektedir.

- Ucuz - çevre dostu bir enerji ve gübre kaynağıdır.
- Atık geri kazanımı sağlar.
- Biyogaz üretimi sonucu hayvan atıklarında bulunabilecek yabancı ot tohumları çimlenme özelliğini kaybeder.
- Biyogaz üretimi sonucunda hayvan atıklarının kokusu büyük ölçüde yok olmaktadır.
- Hayvan atıklarından kaynaklanan insan sağlığını ve yeraltı sularını tehdit eden hastalık etmenlerinin büyük oranda etkinliğinin kaybolmasını sağlamaktadır.

Biyogaz üretiminden sonra atıklar yok olmamakta, üstelik çok daha değerli bir organik gübre haline dönüşmektedir (Koçar vd, 2010).

2.6.3 Biyogazın kullanım alanları

Biyogaz, doğalgaza alternatif olarak kullanılabilen bir enerji kaynağıdır. Biyogaz kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Doğrudan yakarak ısınma ve ısıtma
- Motor yakıtı olarak kullanımı
- Türbin yakıtı olarak kullanılması ile elektrik üretimi
- Yakıt pillerinde kullanımı
- Mevcut doğalgaza katılarak doğalgaz maliyetlerin düşürülmesi
- Kimyasal maddelerin üretimi sırasında biyogaz kullanımı

2.6.4 Biyogaz üretiminde kullanılabilen materyaller

Tarımsal, toplumsal ve endüstriyel atık/atık sular gibi çok çeşitli kaynaklar biyogaz sistemlerinde besleme materyali olarak kullanılabilir. Enerji bitkileri, algler, kültür bitkilerinin hasat sonrası atıkları aynı hayvansal atıklar gibi biyogaz üretiminde kullanılabilmektedir. Kentsel atık ve atık sular, özellikle gıda endüstrisine ait atıklar diğer önemli kaynaklardandır (Koçar vd, 2010).

Fermentasyonda fermentör iç sıcaklığının 37 ^{o}C sıcaklığının altına düşmemesi gerekmektedir (bu sıcaklık fermentasyon mezofilik fermentasyon adı verilmektedir).

2.6.5 Biyogaz oluşum aşamaları

Biyogaz üç evrede oluşur, bunlar:

- Sıvılaştırma (Hidroliz),
- Asit oluşturma,
- Metan oluşumu.

Birinci aşama atığın mikroorganizmaların salgıladıkları enzimler ile çözünür hale dönüştürülmesidir. Bu aşamada polisakkaritler monosakkaritlere, proteinler peptidlere ve aminoasitlere dönüşür. Bundan sonraki aşamada asit oluşturucu bakteriler devreye girerek, bu maddeleri asetik asit gibi küçük yapılı maddelere dönüştürürler. Asit oluşumu üretim esnasında pH'nın düşmesine neden olabilir, bu durum metan oluşumunu sağlayacak bakteriler üzerinde olumsuz etki yaratabilir. Son aşamada ise bu maddeleri metan oluşturucu bakteriler biyogaza dönüştürürler. Görüldüğü gibi biyogaz oluşumu mikrobiyolojik etmenler ile gerçekleşmekte ve doğal olarak bu mikrobiyolojik organizmaların etkileneceği her türlü koşul biyogaz üretimini de etkilemektedir (wikipedia, 2015).

Hidroliz aşaması: İlk aşamada mikroorganizmaların salgıladıkları selular enzimler ile çözünür halde bulunmayan maddeler çamur içerisinde çözünür hale dönüşürler. Uzun zincirli kompleks karbonhidratları, proteinleri, yağları ve lipidleri kısa zincirli yapılara dönüştürürler. Bu basit organik maddelere dönüşüm sonucunda birinci aşama olan hidroliz tamamlanmış olur.

Asit oluşturma aşaması: Çözünür hale dönüşmüş organik maddeler, asetik asit, uçucu yağ asitleri, hidrojen ve karbondioksit gibi küçük yapılı maddelere dönüşür. Bu aşama anaerobik bakteriler ile gerçekleştirilir.

Metan oluşumu: Bakterilerin asetik asiti parçalayarak veya hidrojen ile karbondioksit sentezi sonucunda biyogaza dönüştürülmesi işlemdir. Metan üretimi, diğer süreçlere göre daha yavaş bir süreçtir. Etkili bakteriler, çevre koşullarından oldukça fazla etkilenirler.

2.6.6 Biyogaz oluşumuna etki eden faktörler

Tüm biyolojik proseslerde olduğu gibi, anaerobik fermantasyonda da çevresel faktörler metan oluşumuna etki eder. Bunlar; sıcaklık ve karıştırma,

yükleme oranı, bekleme süresi, C/N oranı, pH oranı, alkalinite, toksik maddeler, besi ortamı gibi faktörlerdir.

Çalışma sıcaklığının etkisi:

Anaerobik fermentasyon 3 ºC ile 70 ºC sıcaklık aralığında gerçekleşebilmektedir.

Sıcak su kaynaklarında 85 ºC'de yaşayabilen metan bakterileri tespit edilmiştir. Bu sınır bazı çalışmalarda 0-100 ºC olarak verilmektedir.

Sıcaklığın artışıyla fermentasyon süresi kısalır.

1- Psikrofilik Fermentasyon (3–20 ºC): Bu sistemlerde çürütme hızı çok yavaş olup, ortalama bekletme süresi 100-300 gün arasındadır.

2- Mezofilik Fermentasyon (20-40 ºC): Anaerobik fermentasyonda en çok uygulanan sıcaklık bölgesidir. Bekletme süreleri 20–40 gün arasında değişir.

3- Termofilik Fermentasyon (40-70 ºC): Çürütme hızı daha yüksek dolayısıyla bekletme süreleri daha kısadır.

Psikrofilik, mezofilik ve termofilik metan bakterilerinin büyüme oranları Şekil 2.29'da verilmektedir.

Mezofilik bölgede optimum sıcaklık 35-37 ºC'dir.

Termofilik fermantasyonda optimum sıcaklık 55-60 ºC arasındadır.

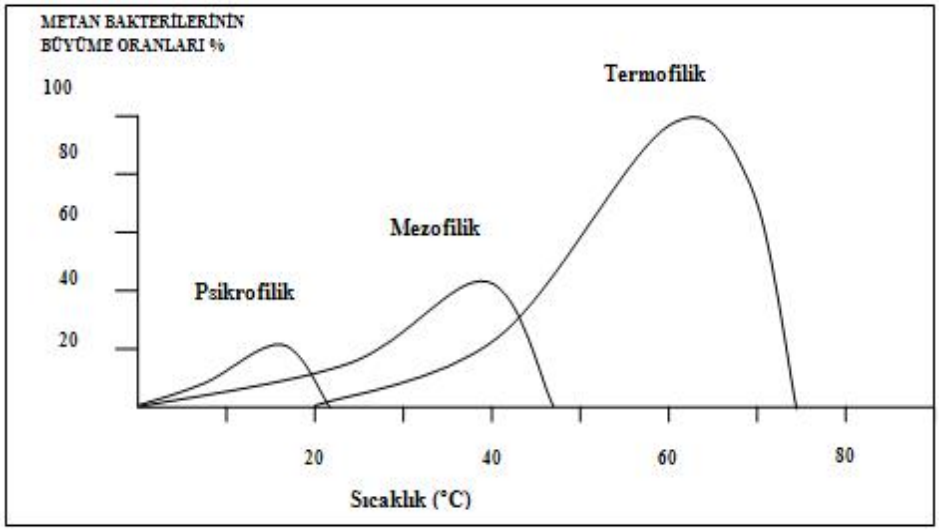
42–50 ºC arasında biyogaz oluşumunda bir kırılma meydana gelir. Bu sıcaklık civarında ne termofilik ne de mezofilik bakteriler aktivitelerini düzgün yürütebilirler.

Avrupa'da bulunan biyogaz sistemlerinin % 87'si mezofilik sıcaklık bölgesinde çalışmaktadır.

Büyük sıcaklık değişimleri anaerobik fermentasyon üzerinde toksik etki yaratır.

Mezofilik fermentasyonda izin verilen saatlik sıcaklık dalgalanması ± 1 olmaktadır.

Termofilik reaktörlerde 3 ºC'lik sapmalar sistemin inhibe olmasına neden olur. Saatlik izin verilen maksimum sıcaklık dalgalanması 0,5 ºC'dir (Koçar et al., 2007).



Şekil 2.29. Psikrofilik, mezofilik ve termofilik metan bakterilerinin büyüme oranları (Koçar ve Eryaşar, 2010).

2.6.7 Biyogaz reaktör tipleri

İki tip biyogaz reaktör tipi vardır:

- Kesikli beslemeli tip
- Sürekli beslemeli tip

Kesikli beslemeli tip reaktörlerde, besleme materyali reaktöre bir kere doldurulur ve gaz çıkışı bitene ya da azalana kadar beklenir. Daha sonra boşaltılarak tekrar yeni materyal eklenir. Bu tip reaktörler, besleme materyalinin yeterli miktarda bulunmadığı ya da dönemsel olarak bulunabildiği yerlerde veya besleme materyalinin iri taneli bir yapıya sahip olduğu yerlerde avantajlı olmaktadır ve günlük bakımı oldukça kolaydır. Biyogaz üretimi düzensizdir. Sürekli beslemeli tip reaktörlerde, materyal düzenli aralıklarla eklenir ve eklenen materyal kadar fermente olmuş materyal boşaltılır, Sürekli beslemeli tip reaktörlerde ideal olan kesintisiz besleme ve boşaltmadır. Fakat pratikte çok fazla uygulanamamaktadır (Koçar vd, 2010).

Reaktör tipleri;

- Anaerobik filtre reaktörler,
- Katı-Yukarı akışlı reaktörler,
- Katı dönüşümlü karıştırmalı tip reaktörler,

- Yukarı akışlı anaerobik reaktörler,
- Anaerobik kontakt reaktörler,
- Akışkan yataklı reaktörler,
- Sabit filim reaktörler,
- Ardışık kesikli tip reaktörler,
- İki fazlı reaktörler (Koçar vd, 2010).

2.7 Tez Konusu İle İlgili Çalışmalar

Termal güneş kolektörleri uzunca bir tarihçeye sahiptir ve 19. yüzyıldan bu yana ticari olarak üretilmektedir. Benzer şekilde PV hücrelerin de 1950'li yıllardan beri üretimi yapılmaktadır. Güneş hücreleri, 1960'lı yıllarda oldukça pahalı olduğundan sadece uzay çalışmalarında kullanılmaktaydı. Ancak, 1973-1974 yıllarındaki OPEC petrol krizinden sonra petrol fiyatlarındaki büyük artış, devletlerin yenilenebilir enerjinin kullanımına olan ilgisinin de artmasına sebep olmuştur. Bu tarihlerde başta ABD olmak üzere, çoğu devlet PV hücre teknolojilerinin geliştirilmesi ile ilgili Ar-Ge çalışmalarına önemli destekler sağlamıştır. Bundan dolayı, daha ucuz ve yüksek verime sahip PV hücre teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Bununla beraber, PV hücrelerin verimliliklerinin artan sıcaklıkla azalma göstermesinden dolayı da, bu etkiyi azaltmak ve gelen Güneş enerjisinden en yüksek düzeyde enerji çevrimi elde etmek amacıyla, bu çalışmalarla birlikte PV/T çalışmalarına da başlanmıştır (Zondag, 2008).

PV/T ile ilgili ilk çalışma, 1973 yılında Delaware Üniversitesinde, Prof. K.W. Böer tarafından, "Solar One" ismi verilen güneş evi için yapılan, hava ısıtma kolektörlerinin kullanıldığı PV/T uygulamasıdır (Böer and Tamm, 2003). Daha sonra, 1976 yılında, Martin Wolf tarafından düzlemsel termal kolektörün kullanıldığı PV/T çalışması gerçekleştirilmiştir. Wolf, bu çalışmada PV/T uygulamalarının PV güç sistemlerinin performansına etkilerini araştırmıştır. PV güneş hücrelerinde oluşacak yaklaşık her 1 °C'lik artış, elektrik üretiminde % 0,45 - 0,50 arasında verim kaybına neden olmaktadır (Wolf, 1976). Bu düşüşü önlemek için, hücreden bu ısıyı çekmek ve çalışma sıcaklığını optimum düzeyde tutmak gereklidir. Bu amaçla güneş panelinin alt kısmında bir akışkan dolaştırılır. Genellikle akışkan olarak hava veya su tercih edilir. Bu yolla PV panel

yüzeyindeki fazla ısı, akışkana ısıl enerji olarak aktarılır ve kullanılabilir hale getirilir (Tiwari and Dubey, 2010).

1974-1978 yıllarında Arizona State üniversitesinde yoğunlaştırılmış PV/T modüller üzerinde çalışmalara başlamış ve aktif soğutmalı yoğunlaştırılmış PV/T'ler üzerinde TRNSYS programı kullanılarak modellemeler geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, düzlemsel PV/T kolektörler üzerine de devam etmiştir. 1978 yılında MIT Lilcoln laboratuvarı ile Sandia tarafından 3 adet tam ölçü düzlemsel PV/T modül prototipi yapılmıştır. Bunu takiben bu modüller için MIT tarafından yapılan testlerde başlangıçta % 6,5 elektrik, % 40 termal verimlilik tespit edilmiştir (Hendrie, 1982).

Prakash (1994) hem hava kütlesel debisinin (100-300 kg/h) hem de su kütlesel debisinin (40-120 kg/h) kullanıldığı durumlar için farklı kanal derinliğine sahip, kanal tipli PV/T modülü incelemiştir. Kanal derinliğinin 3 cm'den 1 cm'ye düşürülmesi durumunda ısıl verimin; hava tipli kolektörlerde 100 kg/h debide, % 17'den % 34'e çıktığını, su tipi kolektörlerde ise 40 kg/h debide, % 50'den % 64'e çıktığını belirlemiştir. Kanal derinliğinin 0.01 m olması durumunda, hava tip kolektörler için kütlesel debinin 100 kg/h'den 300 kg/h'e çıkarılması durumunda ısıl verimin % 34'den % 51'e arttığını, su tipi modüllerde ise debinin 40 kg/h'den 120 kg/h'e çıkarılması durumunda da ısıl verimin % 64'den % 67'ye çıktığını belirlemiştir. Bu durum, debi değerinin artmasının verim artışı üzerindeki etkisinin hava tipi kolektörlerde, su tipi kolektörlere göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Garg and Agarwall (1995) ise, farklı hücre alanları ve debilerde PV/T sistemini araştırmak için sonlu farklar yöntemini kullanmışlardır. Bu sistem; depolama tankı, pompa, otomatik kontrol ve PV modüllerden oluşmuştur. Bu deneysel çalışmanın maksimum ısıl verimindeki optimum kütlesel debisi, 0.03 kg/s olarak bulunmuştur.

Ito et al. (1997) düşük ışınım altında, güneş enerjisi destekli ısı pompasının STK (Soğutma Tesir Katsayısı) değerinin düşük olduğunu göstermişlerdir. Bunun nedenini de, düz kolektörün çevreden enerji elde etmek için optimize edilmemiş olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu problemi çözmek için 3.24 m^2 lik çok kanatçıklı buharlaştırıcı, 2.45 m^2 lik PV/T soğurucu ile paralel olarak yerleştirilmiş ve düşük ışınım koşullarında ısı pompasından 2 gibi düşük bir STK değeri elde edilmiştir. Ayrıca, kış ayında, gündüz saatlerinde 40 ^0C su giriş

sıcaklığında, bu sistemin STK değerinin 5.3 olarak elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Kalogirou (2001) tarafından TRANSYS programı kullanılarak, bir su tipli PV/T modül için sistem simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonda Kıbrıs'ın meteorolojik verilerini kullanmışlardır. Sistem, sırasıyla PV paneller, akü grubu, sıcak su depolama tankı, pompa, fark termostatı ve inverterden oluşmaktadır. Sonuçlar, sistemin optimum su debisinin 25 lt/h olduğunu göstermiştir. Ayrıca PV/T modülde bulunan PV verimin yıllık ortalamasının % 2.8'den % 7.7'ye yükseldiğini ve buna ek olarak bir evin sıcak su ihtiyacının % 49'unun bu sistem ile karşılanabileceğini ve bu veriler ışığında sistemin toplam veriminin yıllık ortalamasının % 31.7 olduğunu belirtmişlerdir.

Ji et al. (2003) binaya entegre su tipli PV/T sistemlerini, değişik PV hücre yapılarında ve Hong Kong şartlarında incelemişlerdir. Bununla ilgili olarak yaptıkları simülasyon çalışmalarının sonuçlarına göre, ince film PV yapısına sahip su tipli PV/T kolektörlerin elektriksel verimini % 4.3 ve monokristal hücre yapısına sahip su tipli PV/T kolektörün hücre verimini % 10.3 olarak, ısıl verimlerini ise sırasıyla % 47.6 ve % 43.2 olarak bulmuşlardır. Ayrıca binada yaşayanlar için bu sistemin, sıcak su üretiminde ön ısıtma olarak kullanılabileceğini önermişlerdir. Diğer bir yandan bu sistemle, duvarlardaki ısının soğurulması sayesinde bina soğutmasının da yapılabileceğini belirtmişlerdir. Son olarak Hong Kong gibi alt tropik şehirlerde, PV/T sistemlerin geniş bir uygulama potansiyeli olabileceğini savunmuşlardır.

Elswijk et al. (2004) binalarda PV/T modül kullanımının, % 38 oranında alandan tasarruf sağlayacağını belirtmişlerdir. Bu durumun çatıdaki ev başına düşen kullanılabilir alan açısından son derece önemli olduğunu, bu sistemlerin tek dezavantajı olan gölgeleme etkisinden dolayı PV/T modüllerin eğim açısının, standart ısıl kolektörlere nazaran daha düşük olmasının gerektiğini belirtmişlerdir.

Tripanagnostopoulos et al. (2005), su tipli PV/T sistemlerle ilgili çalışmalar yapmışlardır. Değişik tiplerdeki su tipli PV/T modüllerin, Yunanistan'ın Patras ili iklim koşullarında yıllık enerji üretimini, elektriksel ve ısıl verim değerlerini belirlemişlerdir. Sonuçlar, standart PV modülün, sırlı PV/T ve sırsız PV/T modülün yıllık toplam elektrik üretimini sırasıyla 203.15 kWh, 165.92 kWh ve 198.26 kWh olarak, toplam ısıl enerji üretimini PV/T modüller için sırasıyla 862.55 kWh ve 597.63 kWh olarak, elektriksel verimi sırasıyla % 10.50, % 8.57

ve % 10.25 olarak ve PV/T kolektörler için ısıl verimi sırasıyla % 44.58 ve % 30.89 olarak ortaya koymuştur.

Coventry (2005), yoğunlaştırılmış PV/T modüllerin verimi üzerine çalışmalar yapmıştır. Yapılan çalışma sonunda ısıl verimin % 58 ve elektriksel verimin % 11 civarında olduğunu, yaklaşık toplam verimin % 69 olduğunu rapor etmiştir.

He et al. (2006) yaptıkları çalışmada, soğurucu ve PV modül arasında iyi bir ısıl kontak oluşturulmasının sistemin hem ısıl hem de elektriksel verimini arttırdığını belirtmişlerdir. Isı değiştiricideki kanatçık performansının toplam verimin artmasında çok önemli bir faktör olduğu sonucuna varmışlardır.

Chow et al. (2007), fotovoltaik ve sıcak su kolektör sisteminin farklı çalışma durumlarındaki performansı ve farklı mevsimlerdeki ölçüm değerleri için deneysel olarak çalışmalar yapmışlardır. Sonuçlar; PV/T sistemlerde, doğal dolaşımlı sistemlerin zorlanmış sistemlere göre daha tercih edilebilir olduğunu göstermiş ve Hong Kong'da yaz aylarının sonunda yapılan deneyde sıfıra indirgenmiş sıcaklıktaki termal veriminin % 38.9 ve buna karşılık gelen elektriksel verimin de % 8.56 olduğunu göstermiştir.

Ji et al. (2007), doğal sirkülasyonlu bir su tipli PV/T modül yapmışlardır. Deney sonuçları, bu sistemin % 65'e varan enerji kazanımı sağladığını göstermiştir. Ayrıca bu sistem için yapılan simülasyon sonuçları, yüksek doluluk oranı (packing factor) ve sır geçirgenliğinin toplam sistem performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

Erdil vd. (2008), PV/T sistemden enerji üretimi için Kuzey Kıbrıs iklim şartlarında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Normalde bir evin ihtiyacının yaklaşık 10 m^2 toplam alana sahip, yani günlük üretimi 7 kWh elektrik enerjisi olan fotovoltaik panellerle sağlanabileceğini belirtmişler, ancak deneyi iki adet 0.6 m^2 lik PV/T-su kolektörlerle yapmışlardır. PV/T kolektörlerde, kolektör üzerine düşen ışınımın önemli bir miktarının ısı enerjisine dönüştüğünü ve bu enerjinin kullanım veya mahal ısıtma sistemlerinde suyun ön ısıtılması için kullanılabileceğini söylemişlerdir. Kullanılan PV/T sistemden günlük 2.8 kWh ısıl enerji elde etmişlerdir.

Chow et al. (2009) yapmış oldukları bilgisayar simülasyonları sonucunda, su tipli BIPV/T kolektörlerin klasik PV sistemlere nazaran daha fazla ekonomiksel avantaj sağladığı ve sistemdeki sıvı için tabi dolaşımın zorlanmış

dolaşıma göre daha iyi ısıl performans gösterdiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca yıl bazında Hong Kong şartlarında, su tipli BIPV/T modülün ısıl verimini ve elektriksel verimini sırasıyla % 37.5 ve % 9.39 olarak bulmuşlardır. Chow (2010), boru içindeki akış miktarının 0.002 kg/s den 0.016 kg/s ye çıkması durumunda elektriksel ve ısıl verimin arttığını göstermiştir.

Sarhaddi et al. (2010), PV panelin yüzeyini soğutmak için panel altından bir hava kanalı oluşturmuşlardır. Bu hava kanalından hava geçirerek, panel yüzeyindeki ısınmayı ortadan kaldırmaya çalışmışlardır. Panelden elde edilen elektrik enerjisi ve ısı enerjisinin verimliliğini hesaplamak için, enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Analizlerden yararlanarak oluşan ısı kayıplarının giderilmesi üzerine incelemeler yapmışlardır.

He at al. (2011), aynı alana sahip PV/T modül ile standart termosifonik termal kolektörü ve PV/T modülde kullanılan PV modül ile aynı özelliklere sahip bir fotovoltaik paneli verimlilik açısından deneysel olarak incelemişlerdir. Bu inceleme sonucunda PV/T kolektörün termal verimini % 40, termosifonik termal kolektörün ısıl verimini % 75 olarak bulmuşlardır. Bu değerlerin yanında PV/T modülün birincil enerji kazanım veriminin, standart termal kolektör ve standart PV panele nazaran daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Wu et al. (2011), vakum tüplü PV/T kolektörlerin performans değerlendirmesi üzerine yaptıkları teoriksel çalışmada, ε-NTU yöntemini kullanarak PV/T sistemin termal, elektriksel ve ekserji verimlerini sırasıyla % 63.65, % 8.45 ve % 10.26 olarak bulmuşlardır.

Charalambous et al. (2011) PV/T modüllerde kullanılan soğurucu plakaların optimizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, PV/T modülde kullanılan soğurucu plaka kalınlığının ince olmasını (örneğin 50 μm) ve m^2 başına 1.185 kg ile 2.14 kg arasında, ara mesafesi 62 ile 64 mm ve iç çapı 1.65 mm olan küçük boru kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Ayrıca tavsiye edilen optimum soğurucu plaka kalınlığının, diğer araştırmacılar tarafından tavsiye edilen prototiplere göre % 40.5 daha az malzeme içerdiği ve daha hafif olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak optimum değerlerde yapılmış bir PV/T modülün elektriksel ve ısıl performans açısından optimum olmayan daha büyük kütleli ve pahalı sistemlerle kıyaslanabilir olduğunu göstermişlerdir.

Dupeyrat et al. (2011), Fraunhofer solar test tesisinde gerçek boyutlarda PV/T modül imal edip denemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, PV/T modülün

toplam verimini % 87.7 (% 79 ısıl verim, % 8.7 elektriksel verim) olarak bulmuşlardır.

Ratlamwala et al. (2011), entegre PV/T sistemini Birleşik Arap Emirlikleri iklim koşullarında soğutma ve hidrojen üretimi açısından incelemişlerdir. Bu inceleme sonucunda maksimum enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla, % 15.6 ve % 7.9 olarak Mart ayında elde etmişlerdir. Bunun yanında hidrojen üretiminin maksimum değerinin Ağustos ayında 9.7 kg olduğunu belirtmişlerdir. Son olarak Haziran ayında sistemin enerji ve ekserji STK değerlerini sırasıyla 2.28 ve 2.145 olarak 15 kW'lık soğutma yükü için bulmuşlardır.

Teo et al. (2012), fotovoltaik modüller için bir aktif soğutma sistemi geliştirerek hibrid PV/T sistem tasarlayıp imalatını yapmışlar ve deneysel olarak incelemişlerdir. Isı transferi simülasyonu yaparak, deneysel olarak elde ettikleri gerçek sıcaklık profilleri ile simülasyon sıcaklık profillerini karşılaştırmışlar ve her iki çalışma arasında iyi bir uyumun olduğunu görmüşlerdir.

Chandrasekar et al. (2013) çalışmalarında, fotovoltaik modüllerin güneşten gelen ışınımı ancak %4-17 oranında elektrik enerjisine çevrilebildiğini, % 50'den daha fazla oranın çalışma esnasında modülde ısı enerjisi olarak açığa çıktığını vurgulamışlardır. Bu nedenle modüllerin verimini arttırmak için yaptıkları çalışmada, şebekeden bağımsız düz PV modülü pasif soğutma ile incelemişlerdir.

Bahaidarah et al. (2013) yaptıkları çalışmada, fotovoltaik modüllerin veriminin büyük oranda çalışma sıcaklığına bağlı olduğunu belirterek sıcak iklim bölgeleri için arka yüzü su soğutmalı olan PV modülün verimini incelemişlerdir. Aktif soğutma sisteminin modül verimini % 9 dolaylarında arttırdığını belirtmişlerdir.

Shan et al. (2014) ve Hazi et al. (2014) hava ve su tipli PV/T sistemlerin karşılaştırmalarını yaptıkları çalışmalarında, binaya entegre hava (building integrated air) PV/T sistemler, yoğunlaştırıcı (concentrator) PV/T sistemler ve ısı pompa (heat pump) PV/T sistemlerin özelliklerini incelemişlerdir. Hava tipli PV/T ve su tipli PV/T modüllerin kullanımının, su kaynaklı ısı pompalarında performansı artırdığı rapor edilmişlerdir. Yapılan analizlerde PV modülün sıcaklığının düşürülmesinin, çalışma performansına olumlu katkı yaptığı gözlenmiştir. PV/T'nin ısı pompalı klima sistemlerine entegre edilebilir olduğunu ve böyle bir sistemin yazın soğutma, kışın ısıtma ve tüm yıl boyunca sıcak su sağlayabildiğini vurgulamışlardır.

Ceylan vd. (2014) yaptıkları çalışmada, fotovoltoik modülleri soğutmak için farklı PV/T sistemleri deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada, basit spiral boru PV modül arka yüzeyine yerleştirilerek, içerisinden soğutma suyu geçirilmiş ve sistemde ısı değiştirici görevi sağlanmıştır. Çalışmada soğutulan modülün verimi % 13 olarak belirlenirken, soğutulmayan modülün verimi de % 10 olarak hesaplanmıştır.

PV soğutucular ve aktif soğutmalı PV/T modüller üzerinde, Arizona State Üniversitesi'nde TRANSYS programı kullanılarak Kalogirou (2001) tarafından bir araştırma ve modelleme yapılmıştır. Bu çalışma, düzlemsel PV/T modülleri de içerecek şekilde genişletilmiştir ve bu PV/T'nin ısıl modeli TRANSYS programı içerisinde TYPE 50 adıyla yer almaktadır.

Fudholi et al. (2014), su tipli PV/T sistemlerde sıvı soğurucunun performansını araştırdıkları çalışmalarında; PV/T sistemlerde yaygın olarak kullanılan W akış soğurucu, direkt akış soğurucu ve serpantin akış soğurucuların davranışlarını incelemişlerdir. Sıvı tipli PV/T modülün elektriksel ve termal performansı, 500-800 W/m^2 solar radyasyon altında hesaplanmıştır. Üç farklı akış soğurucu içerisinden, spiral akış soğurucuya sahip sistem en iyi performansı göstermiştir. Spiral akış soğurucu sistemin, PV/T verimliliği % 68,4, PV verimi %13,8 ve termal verimliliği % 54,6 olarak belirlenmiştir. Farklı debilerde yapılan çalışma sonucunda, akış hızının artmasının yüzeydeki soğutmaya etkisinin yanı sıra sıcak su üretimini de etkilediği tespit edilmiştir.

Rejeb et al. (2015), PV/T sistemlerin sayısal modellemesi ile ilgili kapsamlı bir çalışma yayınlamışlardır. Bu çalışmada PV/T modüllerin, yarı kurak iklim şartlarındaki çalışma performansları incelenmiştir. Sayısal modellemede PV/T sisteminin altı temel bileşeni dikkate alınmıştır. Bu bileşenler geçirgen kapak (transparent cover), PV modülü, soğurucu tabaka, tüp, tüp içindeki su ve yalıtımdır. Bu çalışma deneysel veriler ile oldukça uyumlu sonuçlar vermiş ve PV'nin termal ve elektriksel veriminin, giriş su sıcaklığına, cam kaplamaların sayısına ve PV ile soğurucu tabakanın arasındaki ısı transfer katsayısı ile anlamlı bir şekilde değiştiği görülmüştür.

Liang et al. (2015) yaptıkları bir çalışmada, geleneksel olarak kullanılan PV/T güneş modüllerini grafit ile doldurarak geliştirdikleri PV/T sisteminin performansını incelemişlerdir. Grafit dolgulu PV/T ile geleneksel PV/T'lerin elektriksel verimleri, 08:00 ile 16:00 saatleri arasında sırasıyla % 6.46 ile % 5.15

olarak ölçülmüştür. Grafit dolgulu PV/T sistemin en yüksek verimi % 7.2 olarak tespit edilmiş ve en yüksek Primer Enerji Kazanç (Primary Energy Saving) verimi, 10:35'te % 48 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte elektriksel verimin arka tabaka sıcaklığının düşürülmesi ile, termal verimin ise düşük giriş sıcaklığı ile arttırılabileceğini ifade etmişlerdir.

Aste et al. (2015), birçok araştırmacının elektrik ve termal enerji üretiminde PV/T sistemlerinin veriminin artırılması konusunda yaptığı çalışmalara farklı bir noktadan bakarak katkı sağlamışlardır. Aste et al. çalışmalarında, PV/T sistemlerini yenilikçi bir cam yapıyla dizayn etmişler ve bu sistemin matematiksel modeli üzerinde durmuşlardır. Dizayn ettikleri PV/T sisteminde ince film PV teknolojisi kullanmış ve rool-bond flat soğurucu ile kaplanmışlardır. Sistemin günlük ve yıllık ölçümleri, standart bir PV modül ile karşılaştırılmıştır. Standart PV sistemlerinde gözlemledikleri % 13,'lük verimin, dizayn edilen PV/T sistemlerinde % 13,2'i elektriksel verim ve % 28,8'i termal verim olmak üzere toplam % 42'lik artış sağladığını rapor etmişlerdir.

Kumar et al. (2015) çalışmalarında, dünya genelinde PV/T teknolojisindeki gelişmeleri ve mevcut durumu dizayn, simulasyon, modelleme ve sistemlerin testi başlıklarıyla incelemişlerdir. Çalışmalarında, binaya entegre hava tipli (building integrated air) PV/T sistemler, hava tipli (solar air heating) PV/T sistemler, yoğunlaştırıcı (concentrator) PV/T sistemler ve ısı-boru tabanlı (heat-pipe-based) PV/T sistemleri tartışmışlardır. Genel olarak PV/T sistemlerin çeşitli ticari uygulamalarının yapıldığını, ancak henüz yaygınlaşmadığını vurgulamışlardır.

3. MATERYAL VE METOD

Farklı soğurucu tasarımına sahip PV/T modüllerin verimliliğini etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve karşılaştırılması amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, numunelerin hazırlanması ve standart test koşullarındaki elektriksel verimlilik ölçümleri Solimpeks Enerji A.Ş.'de , dış ortam koşullarındaki elektriksel ve termal verimlilik ölçümleri ise Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir.

3.1 Numunelerin Hazırlanması

Numunelerin hazırlanış aşamaları ayrıntıları olarak aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

A. PV Modül Kısmının İmalatı

PV modül kısımlarının üretiminde kullanılan PV hücreler, hazır bir şekilde temin edilmiş ve çalışmada kullanılmıştır. Kullanılan PV hücrelerin özellikleri Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan PV hücre özellikleri.

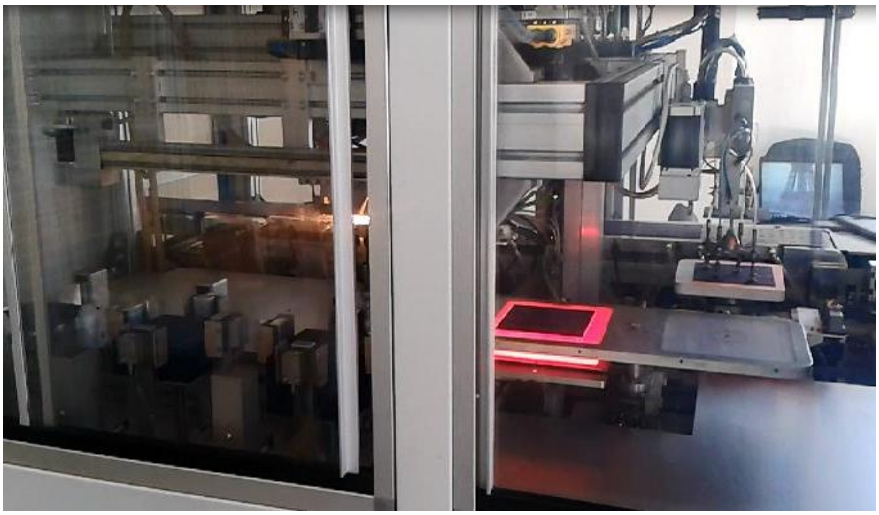
Üretici Firma	:	SF-PV Shunfeng Photovoltaic Int. Ltd.
Tipi	:	Tek kristal silisyum (Si)
Boyutları	:	125 mm x 125 mm
Kalınlığı	:	200±20 μm
Ortalama hücre verimi	:	% 15.40

1. PV hücrelerin birleştirilmesi:

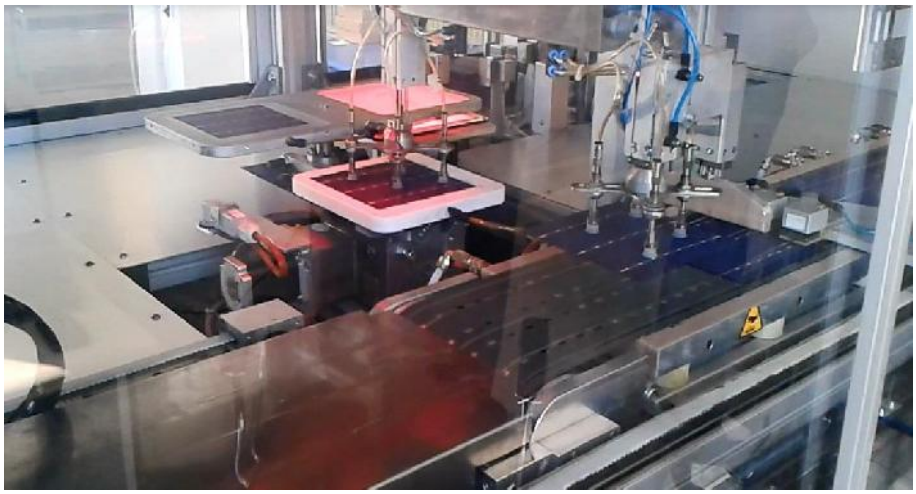
PV hücrelerin birleştirilme işlemi bir Stringer (hücre birleştirme) makinası (2BG S.R.L, Model: TS600PLUS) yardımı ile yapılmıştır. PV hücreler makinada bulunan haznelere yerleştirilmiştir. Makine, üzerinde bulunan optik bir kamera yardımıyla hücrelerin Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, fiziksel kontrolünü yaparak, kırık hücreleri kırık hücre haznesine alırken, sağlam olanları birleştirmek üzere diğer bölmeye götürmektedir. Burada belirli aralıkla hücreler, birleştirilmek üzere ve sırayla bırakılmıştır.

Her bir hücre birbirine seri bağlı olacak şekilde 12 adet PV hücre, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi gümüş lehim teller (ribonlar) ile otomatik olarak birleştirilmiştir.

.



Şekil 3.1. PV hücrelerin stringer makinasında fiziksel kontrolü.



Şekil 3.2. PV hücrelerin seri bağlantılarının stringer makinası ile oluşturulması.

2. Cam besleme ve layout (dizme):

Üretim hattının yan kısmından beslenen camlar, üretim hattına otomatik olarak dahil olmuştur. Ayrıca bu istasyonda Şekil 3.3'deki gibi, cam üzerine bir adet EVA (Etil Vinil Asetat) konulmuştur.

Şekil 3.3. Cam besleme ve EVA yerleştirme işlemi.

Daha sonra, stringer makinesinden gelen 12'li hücr e grupları bir robot kol yardımıyla (KPC-ed05) Şekil 3.4'deki gibi, EVA'lı cam üzerine istenilen aralıkta ve 6 adet seri olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Şekil 3.4. PV hücre serilerinin CAM-EVA üzerine yerleştirilmesi.

3. PV hücre serilerin bağlanması ve laminasyon:

Her bir 12'li hücre serisi Şekil 3.5'de görüldüğü gibi, manuel olarak birbirlerine seri bağlantı şeklinde tekrar birleştirilmiştir (toplam 6x12=72 PV hücre). Ayrıca lehimleme işlemi bittikten sonra hücreler üzerine EVA ve onun da üzerine TPT (Tedlar Polyester Tedlar) malzemesi yerleştirilmiştir. Böylece yapı, laminasyon için hazır hale getirilmiştir.

Şekil 3.5. PV hücre serilerinin birleştirilmesi.

Son olarak, elde edilen yapı Şekil 3.6'da görülen laminasyon makinasında (2BG S.R.L, Model: L640A) ısıl işlem ve vakumlamaya maruz bırakılarak, PV hücreler cama ve TPT'ye lamine edilmiştir. Böylece istenilen PV modül hazır hale getirilmiştir.

Şekil 3.6. PV modül laminasyon işlemi.

B. <u>Termal Soğurucu İmalatı</u>

1. Boru kesme:

Termal soğurucu panelde kullanılmak üzere, rulo halinde gelen toplayıcı (manifold) ve soğurucu (absorber) borular rulo açma, boru düzeltme ve boy kesme makinesinde Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, istenilen ebatlarda kesilmiştir.

Tez kapsamında 4 farklı çapta ve kalınlıkta bakır boru kullanılmıştır. Kullanılan soğurucu boru çapları 8 mm ve 10 mm, et kalınlığı 0.45 mm; toplayıcı boru çapları ise 18 mm ve 22 mm olup et kalınlığı 0.70 mm'dir.

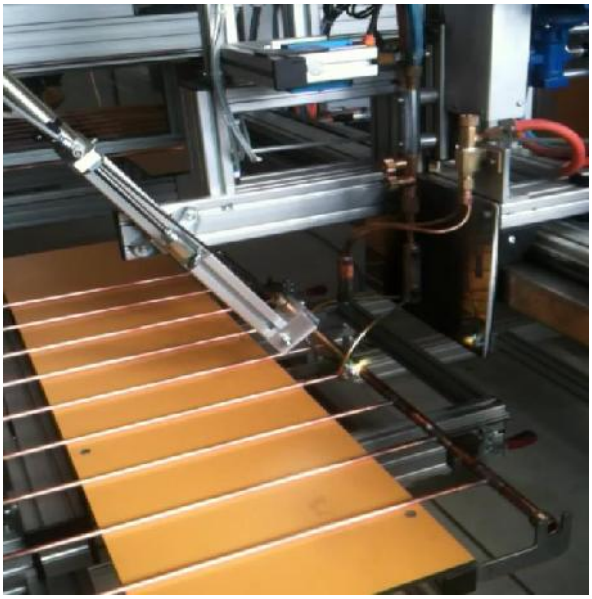
Şekil 3.7. Bakır boru kesme işlemi.

2. Boru delme, havşa açma, rakor takma ve oksijen kaynağı:

Toplayıcı borular üzerine, tasarıma göre, otomatik boru delme makinasında (SUNRISE Model: TUBOCOP 1500) belirlenen aralıklarda delikler açılmıştır. Ayrıca boruların iki ucuna ¾" çapında pirinçten yapılmış erkek rakor takılmıştır. İşlemi tamamlanmış toplayıcı borular Şekil 3.8'de görülmektedir.

Şekil 3.8. Hazırlanan toplayıcı borular.

Toplayıcı borulara istenilen miktarda soğurucu boru Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, oksijen kaynağı (SUNRISE Model: SB-FBM-T2) ile birleştirilmiştir. Sonrasında basınç test cihazında (SUNRISE Model: SR-CFL-TESTER) test edilerek, boru ve kaynaklarda oluşabilecek kaçaklar kontrol edilmiştir. Böylece toplayıcı borular toplayıcı levhayla birleştirilmek üzere hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.9. Oksijen kaynağı yapma işlemi.

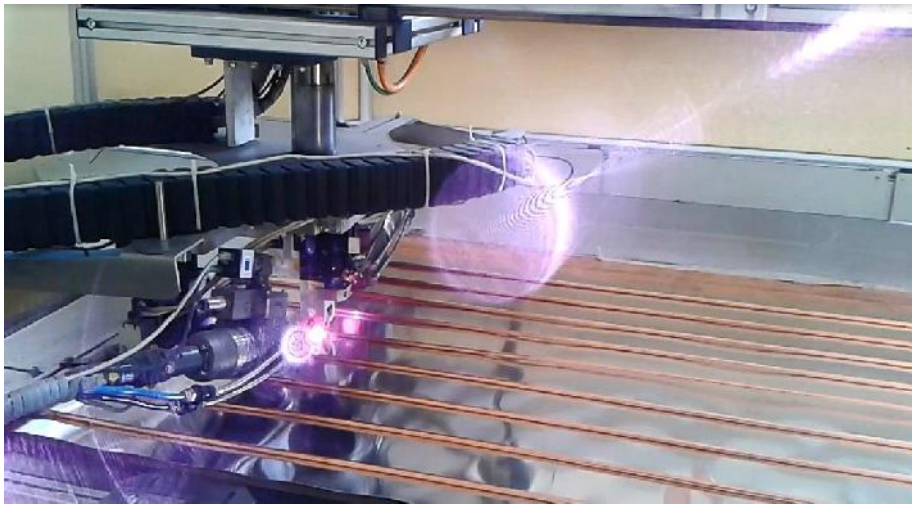
3. Soğurucu tabaka kesme işlemi:

Soğurucu bakır ya da alüminyum levha Şekil 3.10'da görülen rulo açma ve kesme makinesi (MEAN WELL Model: DR4524) ile, istenilen ebatta kesilmiş ve lazer kaynağa hazır hale getirilmiştir.

Şekil 3.10. Soğurucu tabaka kesme işlemi.

4. Lazer kaynak:

Soğurucu borular, hazır haldeki bakır ya da alüminyum şeridin üzerine yerleştirildikten sonra, Şekil 3.11'de verilen lazer kaynak cihazı (SUNRISE Model: SR-LWL-F2500) kullanılarak lazer teknolojisi ile birleştirilmiştir. Böylece termal soğurucu kısmı tamamlanmış oldu.



Şekil 3.11. Lazer kaynak işlemi.

C. PV/T Modül Yapımı

1. PV modül ile termal kısmın birleştirilmesi:

Hazır hale getirilen fotovoltaik modül ve termal soğurucu arasına EVA malzemesi yerleştirilmiş ve yukarıda anılan laminasyon makinasına konularak laminasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle PV/T'nin temel birleşimi sağlanmış oldu.

2. *Bağlantı kutusunun yerleştirilmesi:*

Fotovoltaik hücrelerin çıkış iletkenlerinin toplandığı içinde by-pass diyotları ve çıkış (+) ve (-) kabloların bulunduğu toplama kutusu, soğurucu tabakanın arka tarafına üst ve orta kısmına gelecek şekilde bağlanmıştır. Bağlantı kutusunun monte edilmiş hali, Şekil 3.12'de verilmektedir.

Şekil 3.12. Bağlantı kutusunun yerleştirilmesi.

3. İzolasyon yerleştirme ve kasa birleştirme:

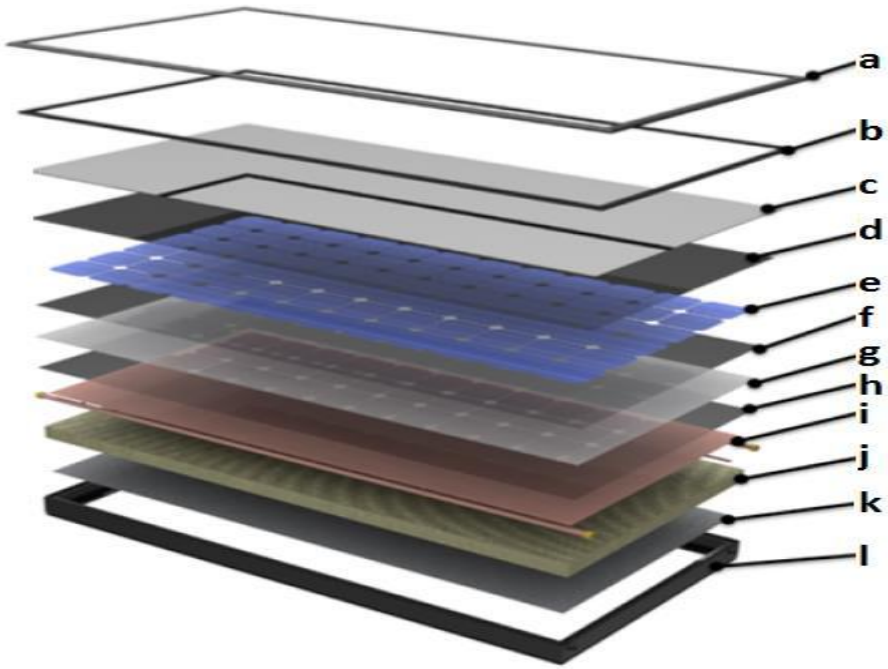
Öncelikle köşeleri perçinlerle birleştirilmiş ve taban sacı iliştirilmiş alüminyum kasaya ısı izolasyonu amaçlı taş yünü ve yan duvarlar, Şekil 3.13'deki gibi yerleştirilmiştir.

Şekil 3.13. Alüminyum kasaya izolasyon yerleştirme işlemi.

Lamine edilmiş PV panel ve soğurucunun camına EPDM fitil döşendikten sonra alüminyum kasaya yerleştirilmiştir (Şekil 3.14). Böylelikle PV/T modül kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Şekil 3.14. PV/T temel parçasının izolasyonlu kasaya yerleştirme işlemi.

Yapılmış olan PV/T modüllerin iç yapısı ve bileşenleri Şekil 3.15'de, kesit görünümü ise Şekil 3.16'da verilmektedir.



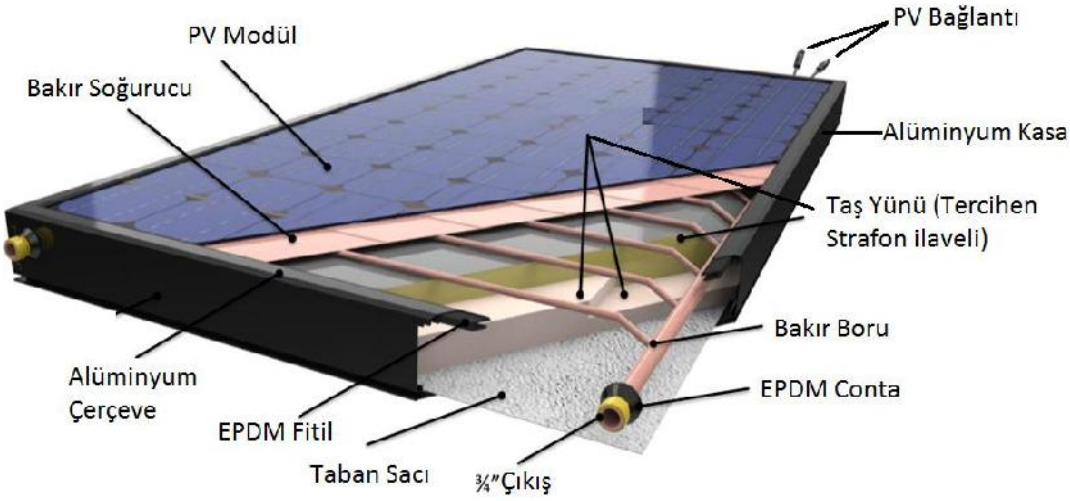
Şekil. 3.15. PV/T modülün katmanlı iç yapısı ve bileşenleri.

a. Alüminyum Çıta: Camın alüminyum kasaya sabitlenmesi için kullanılan alüminyum çerçeve.

b. EPDM Fitil: Camın etrafına su sızdırmazlığı amaçlı yerleştirilen EPDM malzemeden yapılmış U fitili.

c. Düşük Demirli Cam: Fotovoltaik hücrelerin ön kısmına gelen, ışınım geçirgenliği yüksek, düşük demirli ve temperli cam.

d. EVA: Esnek bir yapıya sahip olan ve fotovoltaik hücrelerin cama lamine edilmesinde kullanılan Etil Vinil Asetat.
e. Hücre: Tek kristalli (Monokristalin) Si fotovoltaik hücre.
f. EVA: Esnek bir yapıya sahip olan ve fotovoltaik hücrelerin TPT'ye lamine edilmesinde kullanılan Etil Vinil Asetat.
g. TPT: Hücre kırılmalarına karşı koruyucu arka tabaka olan siyah Tedlar Polyester Tedlar.
h. EVA: Esnek bir yapıya sahip olan ve termal soğurucudaki bakır şeritlerin TPT'ye lamine edilmesinde kullanılan Etil Vinil Asetat.
i. Termal Soğurucu: Bakır boru ve bakır şeritlerin birbirine lazer ya da ultrasonik kaynak ile birleştirilmesinden oluşan soğurucu.
j. Taş Yünü: PV-T modüldeki ısı kayıplarını azaltmak için kullanılan izolasyon malzemesi.
k. Taban Sacı: PV-T modülün dış ortama karşı ilişkisini azaltan gofrajlı alüminyum levha.
l. Kasa: PV-T modülü korumak ve kullanılan malzemeleri bir arada tutmak için kullanılan alüminyum profil kasa.



Şekil 3.16. PV/T modülünün kesit görünümü.

Bu tez çalışmasında incelenen tüm PV/T modüllerin üretimi, aynı aşamalardan geçilerek ve özdeş PV hücreler kullanılarak yapılmıştır. PV/T modüller arasındaki farklar, kullanılan boru çapları, boru adetleri ve soğurucu tabaka tipi gibi özelliklerdir. Tezin başlıca amacı, aynı şartlar altında fakat farklı çap ve tiplerde malzemelerle üretilen PV/T modüllerin verimsel açıdan incelenmesi ve optimum yapının tespit edilmesidir. Bu amaçla, daha önce ifade edilen özellikler bakımından farklı özellikler gösteren 5 adet farklı tipte PV/T modül hazırlanmıştır. Ayrıca, PV/T modül ile PV modülün performanslarının

karşılaştırmalı olarak incelenmesi amacı ile de 3.1 Bölümü A kısmında verilen şekilde 1 adet PV modül hazırlanmıştır. Hazırlanan PV/T modüllerin ve PV modülün özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

Numune adı :PVT-1

Özellikleri:

- 6 absorber borulu kanatçıklı tabaka kullanılmıştır.
- Absorber boruları Φ8 mm çapında, manifold boruları Φ22 mm çapında seçilmiştir.
- Φ8 mm çapındaki absorber boruları öncelikle Φ12,7 mm çapındaki taşıyıcı borularda toplanmış, daha sonra bu borular Φ22 mm manifold borularına kaynatılarak bağlantı noktalanmıştır (Şekil 3.17).

Şekil 3.17. PVT-1 numunesinin termal kısmının iç görünümü.

Numune adı: PVT-2

Özellikleri:

- 16 absorber borulu tam tabaka kullanılmıştır.
- Borular dikine değil serpantin biçiminde yerleştirilmiştir.
- Absorber boruları Φ10 mm çapında, toplayıcı boruları Φ18 mm çapında seçilmiştir.

- Serpantin bağlantısından ötürü, kıvrımlı absorber borulardan 1 tanesi tabaka üzerine değmeden doğrudan manifold borusuna bağlanmıştır (Şekil 3.18).

Şekil 3.18. PVT-2 numunesinin termal kısmının iç görünümü.

Numune adı: PVT-3

Özellikleri:

- 12 absorber borulu kanatçıklı tabaka kullanılmıştır.
- Absorber boruları Φ8 mm çapında, manifold boruları Φ22 mm çapında seçilmiştir.
- Φ8 mm çapındaki absorber boruları öncelikle Φ12,7 mm çapındaki taşıyıcı borularda toplanmış, daha sonra bu borular Φ22 mm manifold borularına kaynatılarak bağlantı noktalanmıştır.
- Absorber boru sayısı her hücreye iki adet boru gelecek şekilde seçilmiştir (Şekil 3.19).

Şekil 3.19. PVT-3 numunesinin termal kısmının iç görünümü.

Numune adı: PVT-4

Özellikleri:

- 16 absorber borulu tam tabaka kullanılmıştır.
- Borular dikine değil serpantin biçiminde yerleştirilmiştir.
- Absorber boruları Φ10 mm çapında, manifold boruları Φ22 mm çapında seçilmiştir (Şekil 3.20).

Şekil 3.20. PVT-4 numunesinin termal kısmının iç görünümü.

Numune adı: PVT-5

Özellikleri:

- 13 absorber borulu tam tabaka kullanılmıştır.
- Borular dikine değil serpantin biçiminde yerleştirilmiştir.
- Absorber boruları Φ10 mm çapında, manifold boruları Φ22 mm çapında seçilmiştir.
- Manifold boruları diğer test kolektörlerinden farklı olarak absorber tabakaya temas ettirilmiştir (Şekil 3.21).

Şekil 3.21. PVT-5 numunesinin termal kısmının iç görünümü.

Numune adı: PV

Özellikleri:

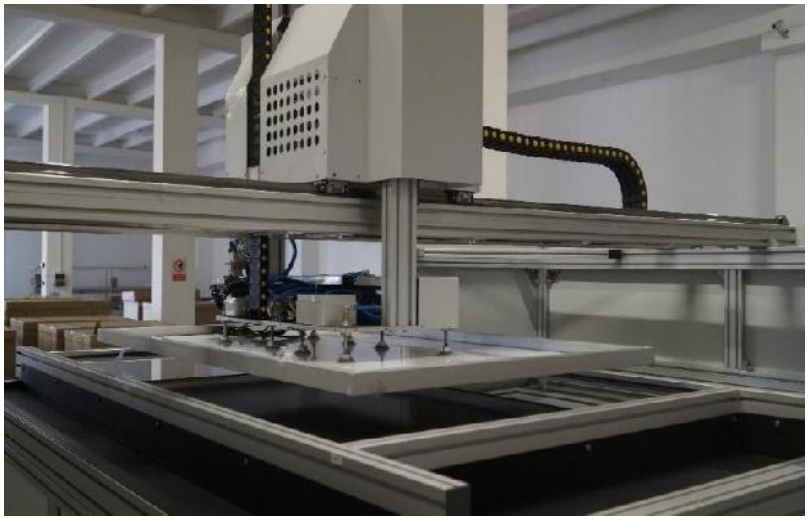
- Yukarıdaki PV/T'lerin PV kısmı ile özdeştir.

3.2 Deneysel Ölçüm Sistemleri

Üretimi tamamlanan PV/T modüller, önce Basınç Test Cihazı (SUNRISE Model: SR-CFL-TESTER) ile 25 bar basınçta su ile test edilmiştir ve test sonucunda tüm modüller incelenmiştir. Yapılan incelemelerde hiçbir modülde boru patlağı, su kaçağı veya çap genişlemesine rastlanmamıştır. Basınç testleri yapılan 5 farklı tipteki modül üzerinde yapılan deneysel ölçümlerin detaylarını şu şekilde özetlemek mümkündür:

3.2.1 Numunelerin standart test koşullarında (STC) veriminin ölçümü

Yukarıda anıldığı gibi, güneş hücrelerinin veya modüllerinin 1000 W/m^2 güneş ışıma spektrumu (AM 1.5) ve 25 °C sıcaklık değeri standart test koşulları olarak tanımlanır. Günümüzde bu tür testleri yapmak için, üzerinde Xeson lambalar ile uygun filtreler bulunan ve I-V ölçümünü, PV modülün ısınmasına fırsat vermeyecek şekilde, çok kısa sürede yapabilen solar simülatörler kullanılmaktadır. Hazırlanan 5 adet PV/T modülün ve 1 adet PV modülün elektriksel verimliliklerinin tayin edilmesi amacıyla, STC'deki I-V ölçümleri Şekil 3.22'de verilen solar simülatör (QUICKSUN Model: 540LA) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.22. Solar simülatör cihazı.

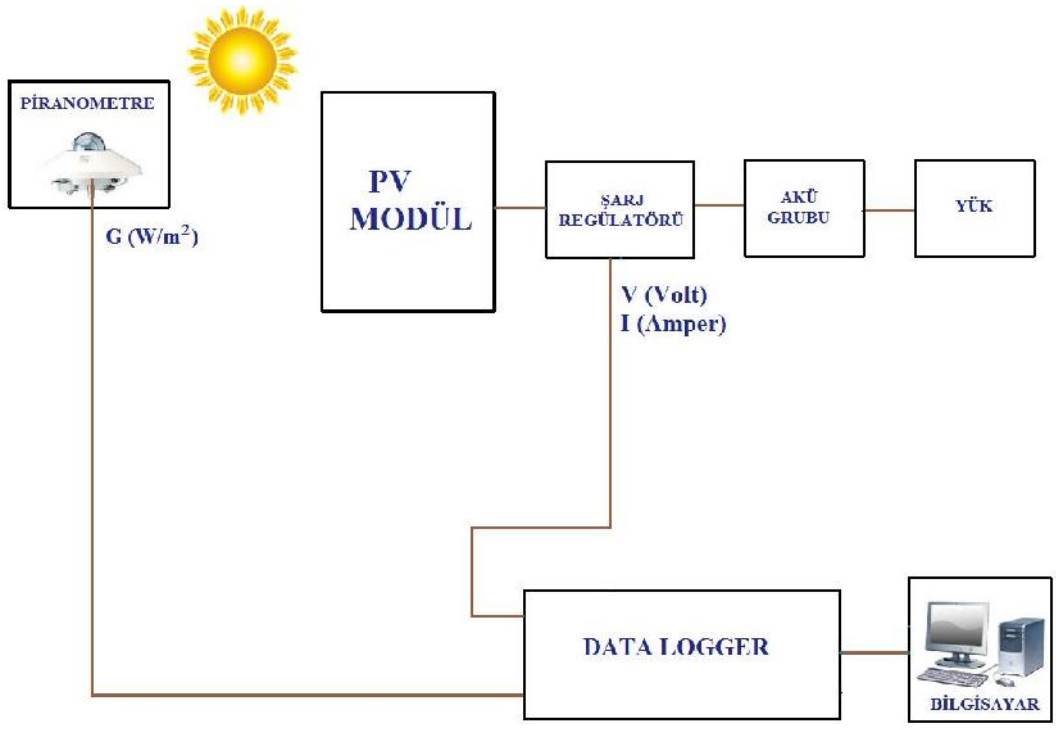
3.2.2 Numunelerin performans ölçümleri

Ölçüm sistemin kurulumu aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

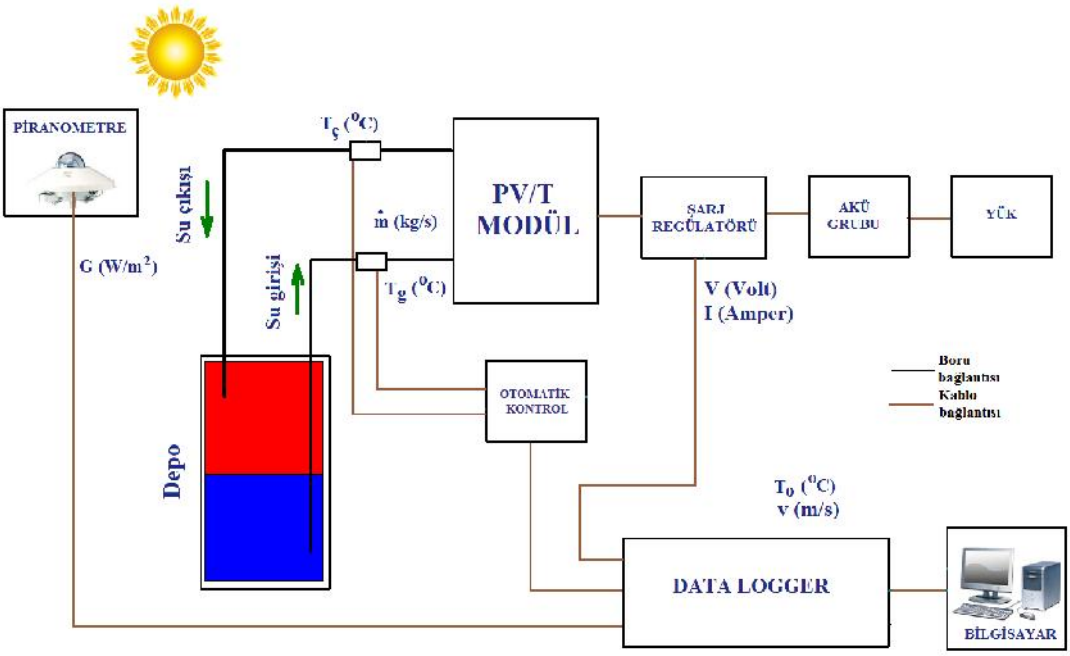
1. Öncelikli olarak malzeme teminleri yapılmış ve Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü bahçesindeki kurulum yeri ayarlanmıştır.
2. PV modül ve su tipli PV/T modüller, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü bahçesinin güneye bakan kısmına montaj setleri vasıtasıyla 30^0 lik açıyla yerleştirilmiştir.
3. PV modülün elektriksel bağlantıları yapılmıştır.
4. PV/T modüllere ait termal sistem bağlantıları (depo, pompa, borulama vb.) yapılmış ve sisteme 2.5 bar basınçta su verilerek sistem çalıştırılmıştır.

5. PV/T modüllere ait kablolama işlemleri, elektriksel ekipmanların bağlantıları yapılmıştır.
6. PV/T modüllere ait sensörlerin yerleşimi yapılmış ve otomatik kontrol cihazına bağlanmıştır.
7. Piranometre, PV modül ve PV/T modüller ile aynı açıda, aynı montaj setine, üzerine gölge düşmeyecek ve panellere gölge yapmayacak şekilde yerleştirilmiştir.
8. Son olarak veri kaydedicilerden veri almak için 2 adet bilgisayar bina içine yerleştirilmiş, kayıt cihazlarıyla bağlantıları yapılmış ve veri alınmaya başlanmıştır.

PV modül testleri için kurulan deney düzeneğinin blok diyagramı Şekil 3.23'de, PV/T modüllerin testleri için kurulan deney düzeneğinin blok diyagramı ise Şekil 3.24'de verilmektedir. Deney düzeneğinin fotoğrafları ise Şekil 3.25'de verilmiştir. Deney düzeneğinde Steca Tarcom-235 şarj regülatörü ve Ahlborn data logger'ı kullanılmıştır.



Şekil 3.23. PV testi için kurulan deney setinin blok diyagramı ve ölçülen parametreler.



Şekil 3.24. PV/T testleri için kurulan deney setinin blok diyagramı ve ölçülen parametreler.

Şekil 3.25. Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde kurulan deney setlerinin fotoğrafları.

PV/T modüller için kurulan deney düzenekleri; farklı soğurucu borusu çaplarında, farklı soğurucu borusu sayılarında, farklı boru dizilimlerinde, farklı tabaka tiplerindeki PV/T yapıların, ısıl ve elektriksel verimlerinin belirlenmesi amacı ile kurulmuştur. Her bir sistem kendi içerisinde ayrı ayrı şarj kontrol cihazlarına ve veri kaydedicilere bağlanmıştır. Tüm sistemler şarj kontrol cihazlarından sonra akülere birleştirilerek bağlanmıştır. Her bir sistemden üretilen elektriksel değerler bilgisayar vasıtasıyla kaydedilmiştir. PV/T modüllerin termal

analizi için kolektör ile depoya birer adet sıcaklık sensörü bağlanmıştır. Bu sensörlerden elde edilen veriler otomatik kontrol vasıtasıyla, cihaza takılan bir SD karta kaydedilmiştir. Ayrıca dış ortam sıcaklığı ve su debisi miktarı da bu otomatik kontrol vasıtasıyla kaydedilmiştir. Modüller üzerine düşen ışınım değeri, modüller ile aynı yer ve açıda yerleştirilen bir pironometre vasıtasıyla ölçülmüştür. Deneylere 2012 yılı Nisan ayı başında başlanmış ve Eylül ayının sonuna kadar devam edilmiştir. Ölçümler, güneşin doğması ile batması arasında geçen süre zarfında yapılmıştır. Bu deneylerde, akım, voltaj, ortam sıcaklığı, giriş ve çıkış su sıcaklığı, güneş ışınımı değerlerinin ölçümleri yapılmıştır.

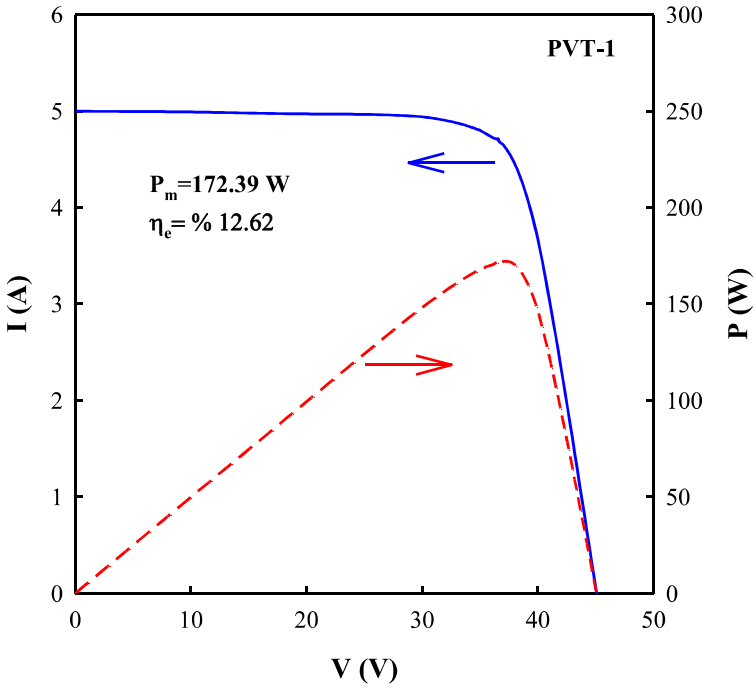
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneylerde, 5 adet farklı soğurucu yapılarındaki su tipli PV/T modül ile 1 adet özdeş PV modülün standart test koşullarındaki elektriksel parametreleri ve verimleri ölçülmüştür. Ayrıca 5 adet su tipli PV/T modülün elektriksel ve termal analiz işlemleri yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Termal yönüyle sistem incelendiğinde her bir soğurucu yapısına sahip modüllerin yüzey sıcaklık değeri, suyun PV/T kolektöre giriş ve çıkış sıcaklık değerleri, ortam sıcaklığı, güneş ışınım değerleri, ısıl verim, ısıl kazanç ve debi değerleri bulunmuş ve incelenmiştir. Bunların dışında, hem PV/T modüllerin hem de PV modülün elektriksel ölçümleri yapılmış, ölçülen akım ve voltaj değerlerinden, elektriksel dönüşüm verimlilikleri de bulunmuş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

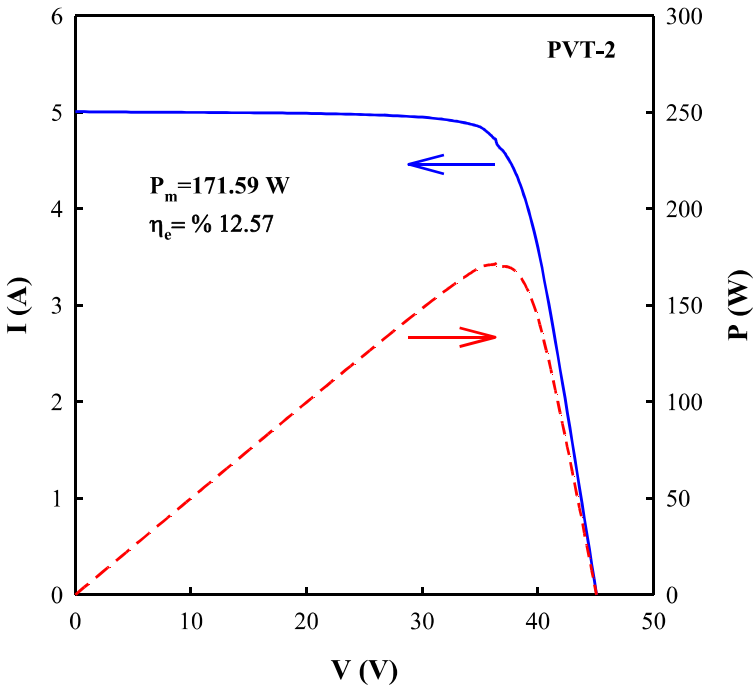
Tüm bu elektriksel ve termal ölçümlerin yapılmasının amacı; PV sistemde hücrelerin soğutulması ile yapılan kazanım ve buna ilaveten farklı soğurucu yapılarından elde edilen ısıl enerji değerinin bulunması ve optimum soğurucu yapısının belirlenmesidir. Bu bölümde elektriksel ve termal deneylerden elde edilen bulgular sırasıyla ele alınmıştır.

4.1 Standart Test Koşullarındaki Verim Ölçüm Sonuçları

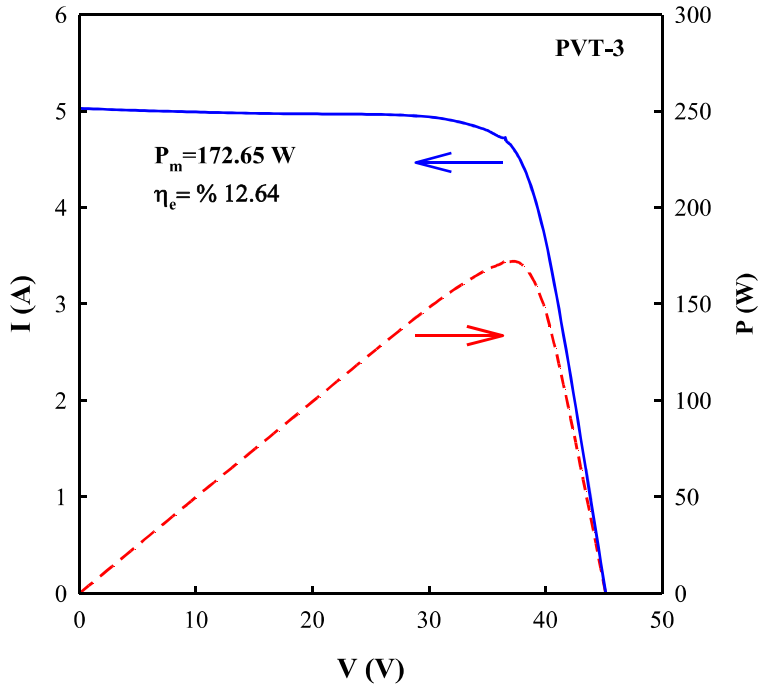
Hazırlanmış olan PV/T modüller ile PV modülün standart test koşullarındaki (STC) Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri yapılmış ve numuneler ile ilgili ölçüm sonuçları; PVT-1 için Şekil 4.1'de, PVT-2 için Şekil 4.2'de, PVT-3 için Şekil 4.3'de, PVT-4 için Şekil 4.4'de, PVT-5 için Şekil 4.5'de, PV için Şekil 4.6'da verilmiştir. Ayrıca her bir modülün dolum faktörü Denklem (2.8), verim değeri ise Denklem (2.11) kullanılarak hesaplanmıştır. Numunelerin elektriksel parametreleri, dolum faktörü ve verim değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'e bakıldığında, modüllerin güç değerlerinin, 171.45 W ile 173.19 W arasında, elektriksel verimlilik değerlerinin ise % 12.57 ile % 12.68 arasında bir değişim gösterdiği görülmektedir. Tüm modüllerin hazırlanmasında özdeş PV hücreler kullanılmasına, aynı üretim süreci ile hazırlanmasına ve her bir yapıda aynı sayıda seri PV hücre olmasına rağmen, elektriksel parametrelerde ve verim değerlerinde küçük de olsa farklılıklar gözlenmiştir. Bunun en önemli sebebi, PV hücrelerin aynı üretim sürecinde ve aynı koşullarda üretilmesine rağmen, hücre verimliliklerinde oluşan çok küçük de olsa farklılıklardan kaynaklanmaktadır.



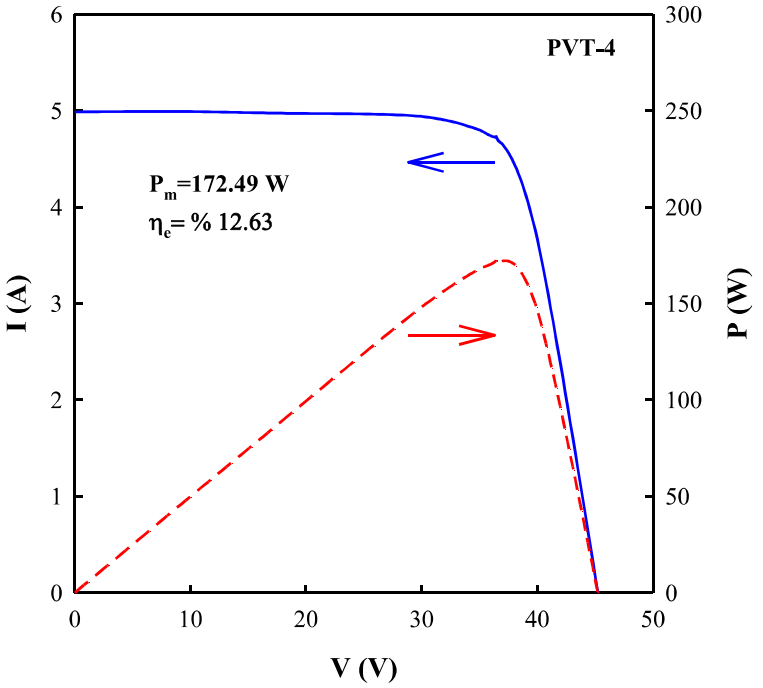
Şekil 4.1. PVT-1 modülünün I-V-P eğrisi.



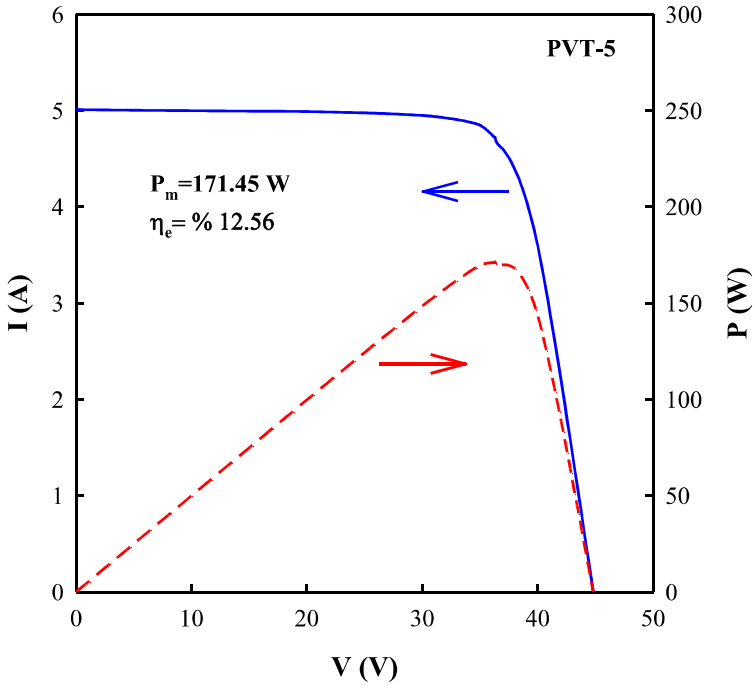
Şekil 4.2. PVT-2 modülünün I-V-P eğrisi.



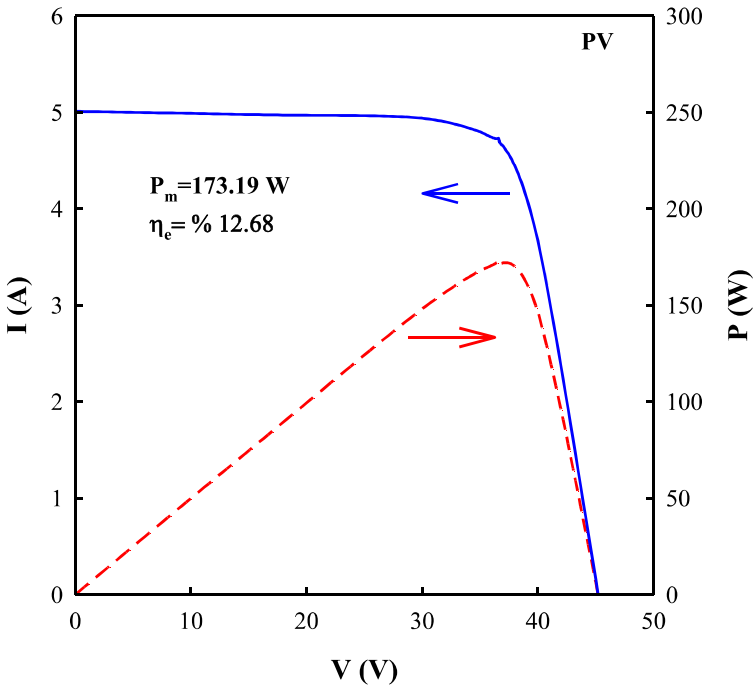
Şekil 4.3. PVT-3 modülünün I-V-P eğrisi.



Şekil 4.4. PVT-4 modülünün I-V-P eğrisi.



Şekil 4.5. PVT-5 modülünün I-V-P eğrisi.



Şekil 4.6. PV modülünün I-V-P eğrisi.

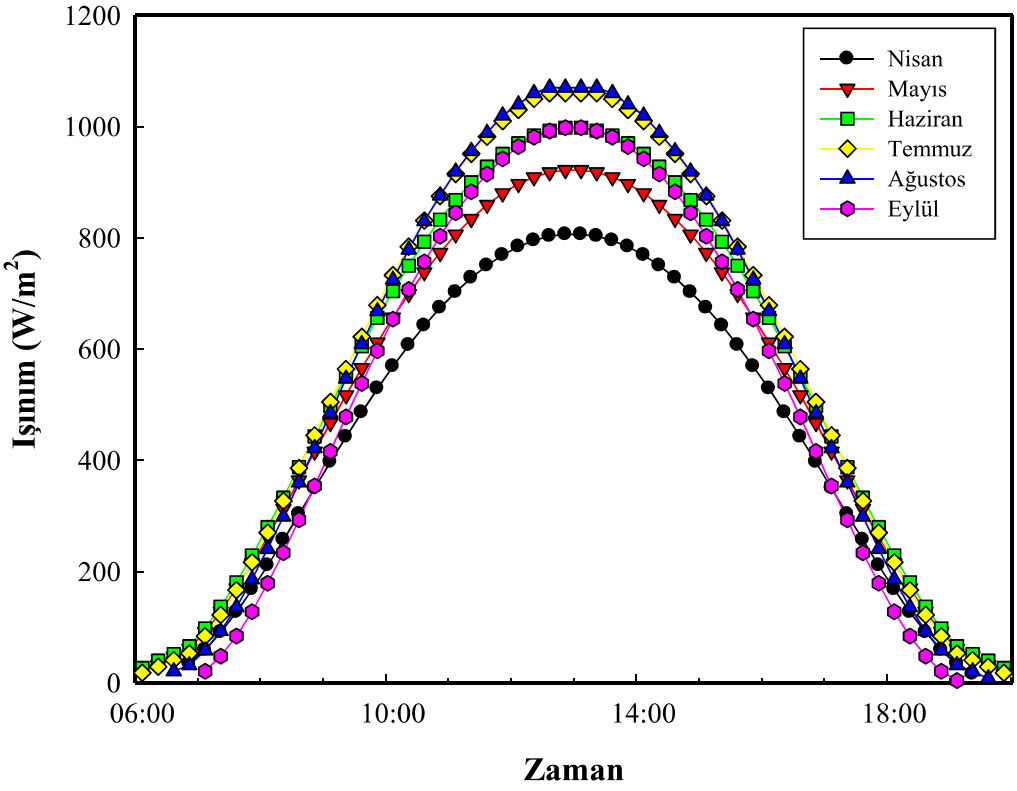
Çizelge 4.1. Numunelerin STC'daki elektriksel parametreleri ve verim değerleri.

Numune Adı	V_{oc} (V)	V_m (V)	I_{sc} (A)	I_m (A)	P_m (W)	FF	η_e (%)
PVT-1	45.22	36.57	4.998	4.714	172.39	0.763	12.62
PVT-2	45.08	36.34	5.007	4.722	171.59	0.760	12.57
PVT-3	45.17	36.54	5.027	4.725	172.65	0.760	12.64
PVT-4	45.25	36.46	4.986	4.731	172.49	0.765	12.63
PVT-5	44.82	36.31	5.010	4.722	171.45	0.764	12.56
PV	45.21	36.60	5.011	4.732	173.19	0.763	12.68

4.2 Güneş Işınımı Ölçüm Sonuçları

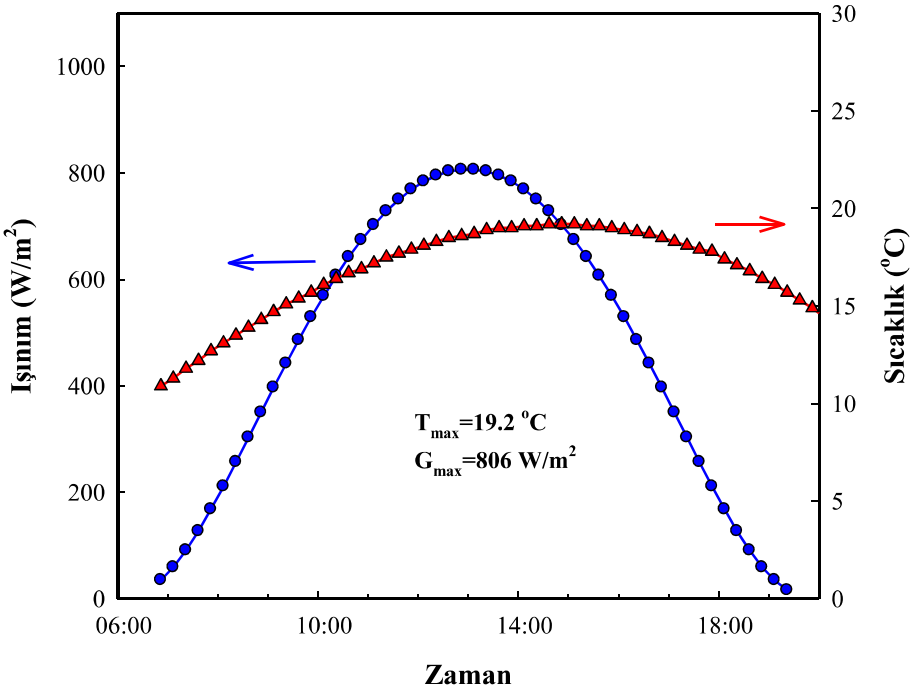
1 Nisan 2012 - 30 Eylül 2012 tarihleri arasında, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde kurulan deney setlerinin yanına, modüllerle aynı açıda yerleştirilmiş olan piranometre ile güneş ışınımı değerleri sürekli olarak ölçülmüştür. Güneşin doğuşundan batışına kadar her 15 dakikada bir data alınmış ve bilgisayara kaydedilmiştir. Elde edilen datalardan, günün o anı için ortalama değerler hesaplanmıştır. Ölçülen aylık ortalama güneş ışınımı değerleri iki farklı gösterimi içerecek şekilde, Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7.a, aylar yatay konumda olacak bir şekilde, Şekil 4.7.b ise aylar yatay eksende aynı bölgede olacak şekilde çizilmiştir. Şekil 4.7'den de görüldüğü üzere ışınım ortalamalarının maksimum değerleri; Nisan ayı için 806 W/m^2, Mayıs ayı için 922 W/m^2, Haziran ayı için 998 W/m^2, Temmuz ayı için 1060 W/m^2 ve Ağustos ayı için 1070 W/m^2 ve Eylül ayı için 998 W/m^2 olarak ölçülmüştür. En yüksek maksimum ortalama ışınım değeri Ağustos ayında, en düşük maksimum ortalama ışınım değeri ise Nisan ayında elde edilmiştir.

Deney sisteminin kurulu olduğu alanda, aylara göre ortam sıcaklık değerleri de ölçülmüştür. Işınım ölçümlerine benzer şekilde, günün ilk ışığı ile her 15 dakikada bir sıcaklık değerleri ölçülmüş ve bilgisayarda kaydedilmiştir. Daha sonra aylık ortalama değerleri hesaplanmıştır. Nisan-Eylül ayları ortalama ortam sıcaklıkları ve ortalama güneş ışınımı eğrileri sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de verilmiştir.

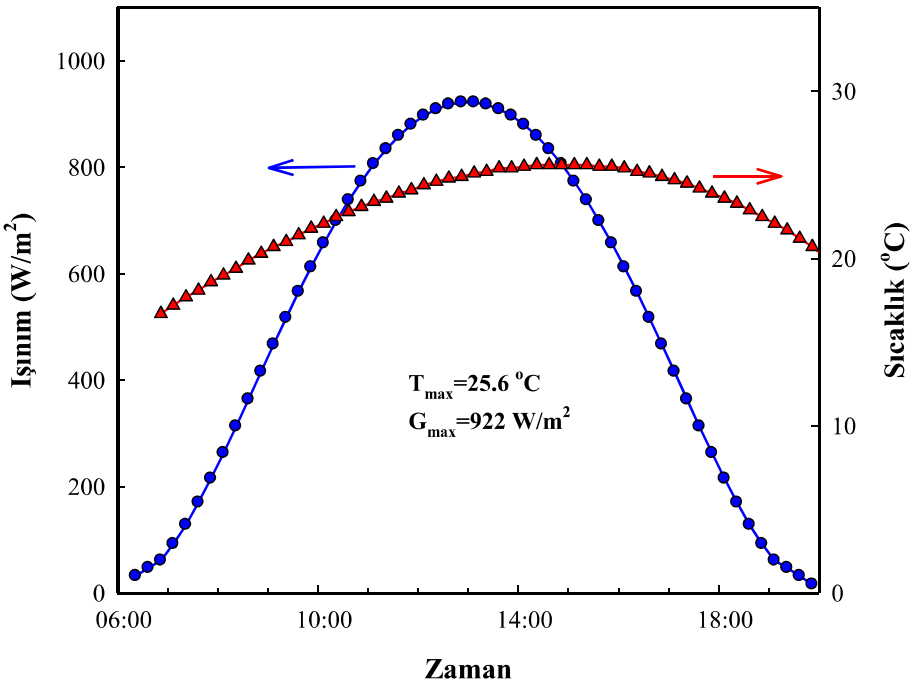


Şekil 4.7. Nisan - Eylül ayları arası ortalama güneş ışınım değerleri.

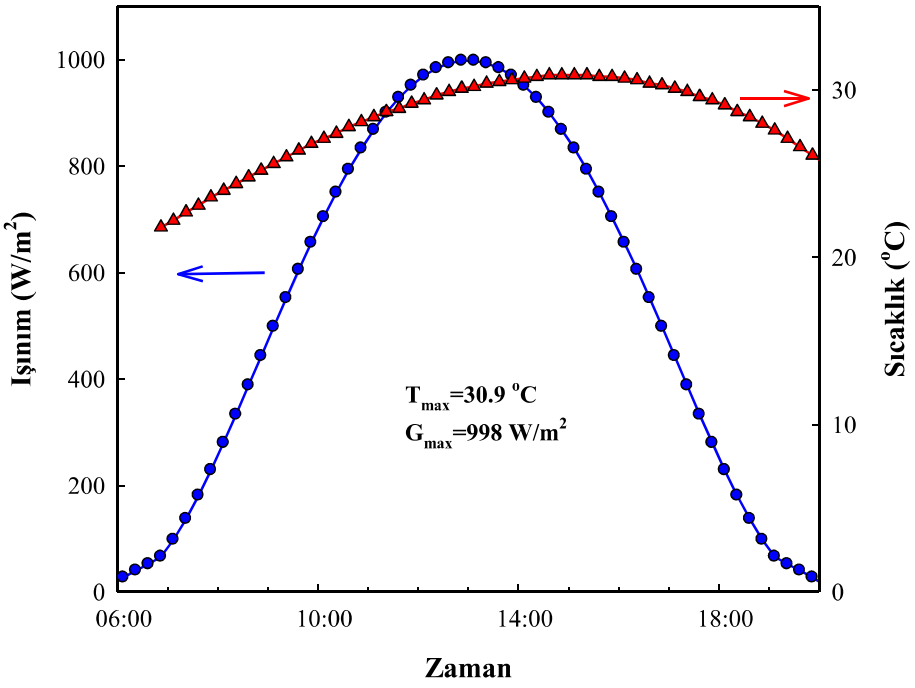
Nisan – Eylül ayları arasında yapılan ölçümlerde aylara göre en yüksek sıcaklık ortalamaları sırası ile Nisan için 19.2 °C, Mayıs için 25.6 °C, Haziran için 30.9 °C, Temmuz için 33.5 °C, Ağustos için 32.9 °C ve Eylül için 28.2 °C olarak bulunmuştur. En yüksek sıcaklık ise Temmuz ayının 23. günü saat 14:55 de 38.2 °C olarak ölçülmüştür.



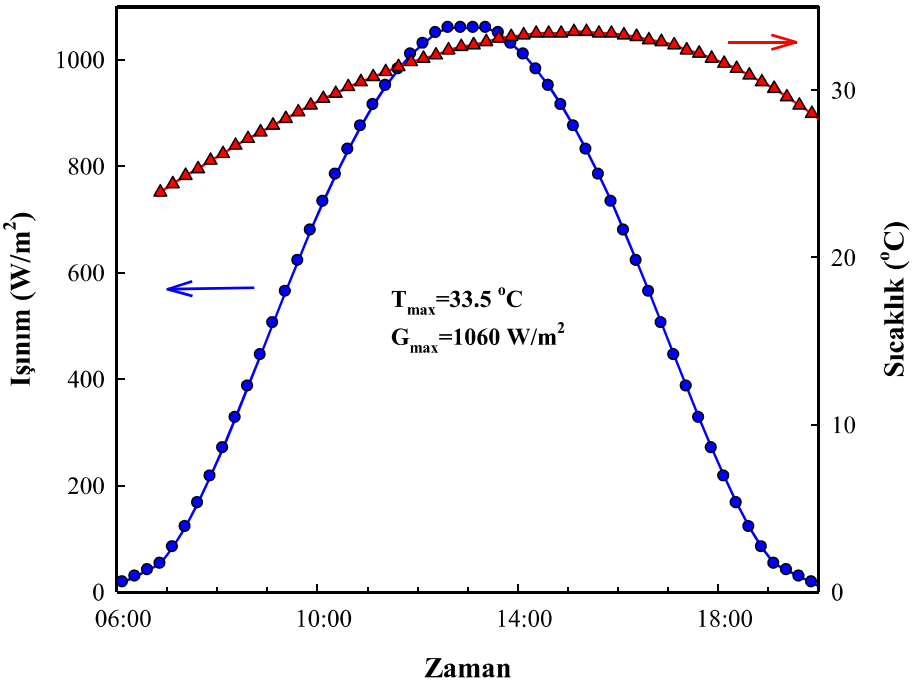
Şekil 4.8. Nisan ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği.



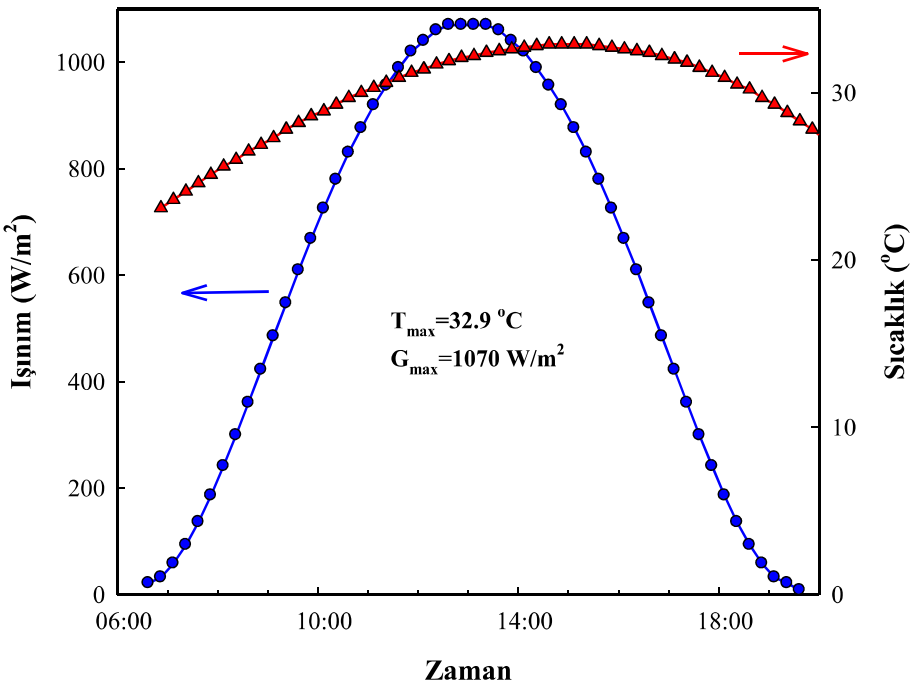
Şekil 4.9. Mayıs ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği.



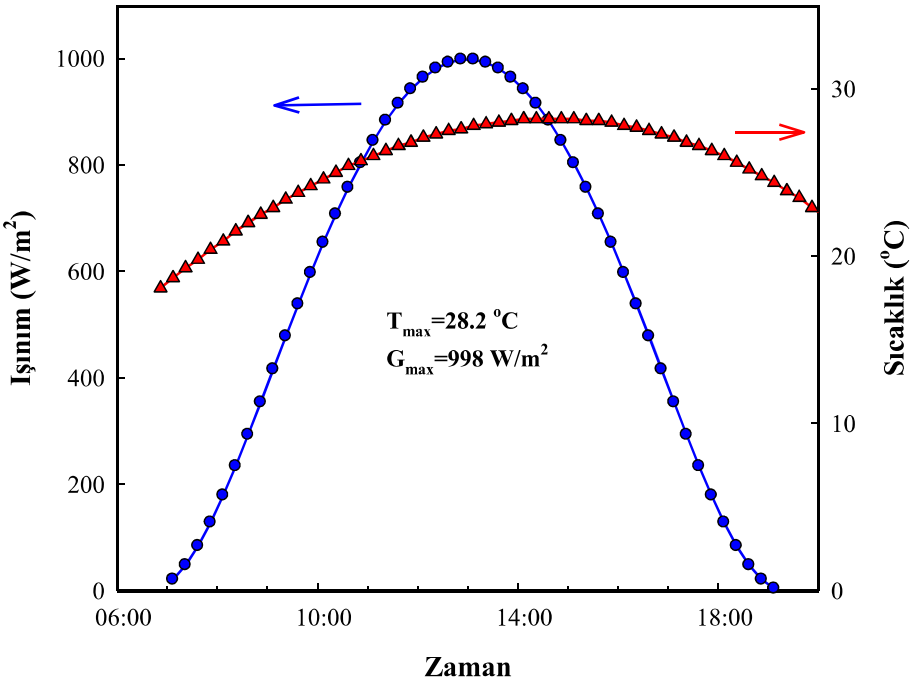
Şekil 4.10. Haziran ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği.



Şekil 4.11. Temmuz ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği.



Şekil 4.12. Ağustos ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği.

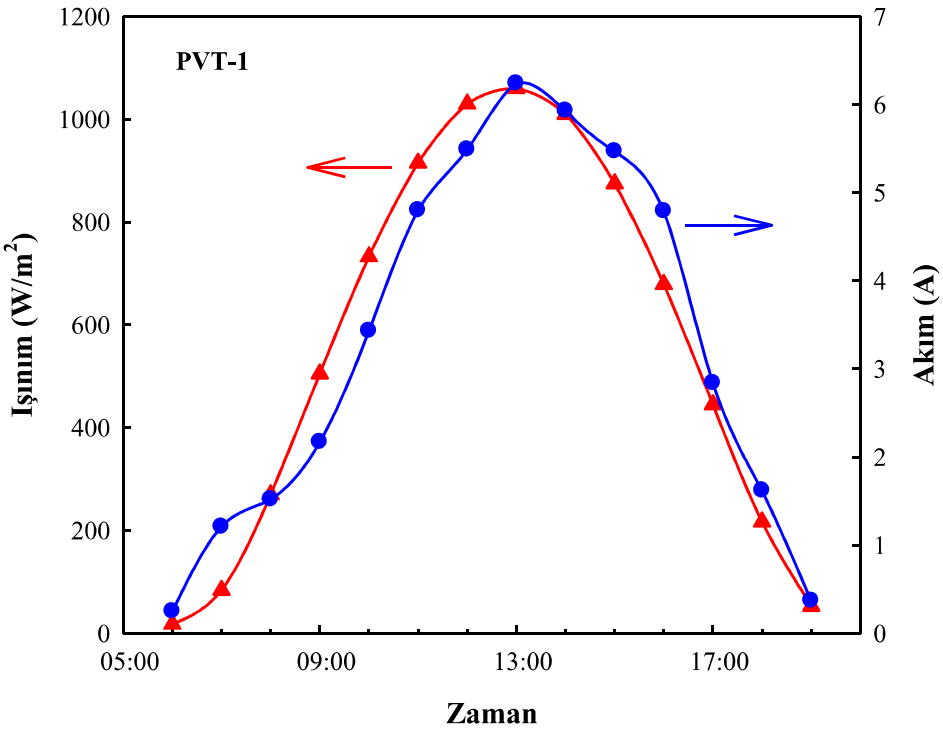


Şekil 4.13. Eylül ayı ortalama sıcaklık ve ortalama ışınım grafiği.

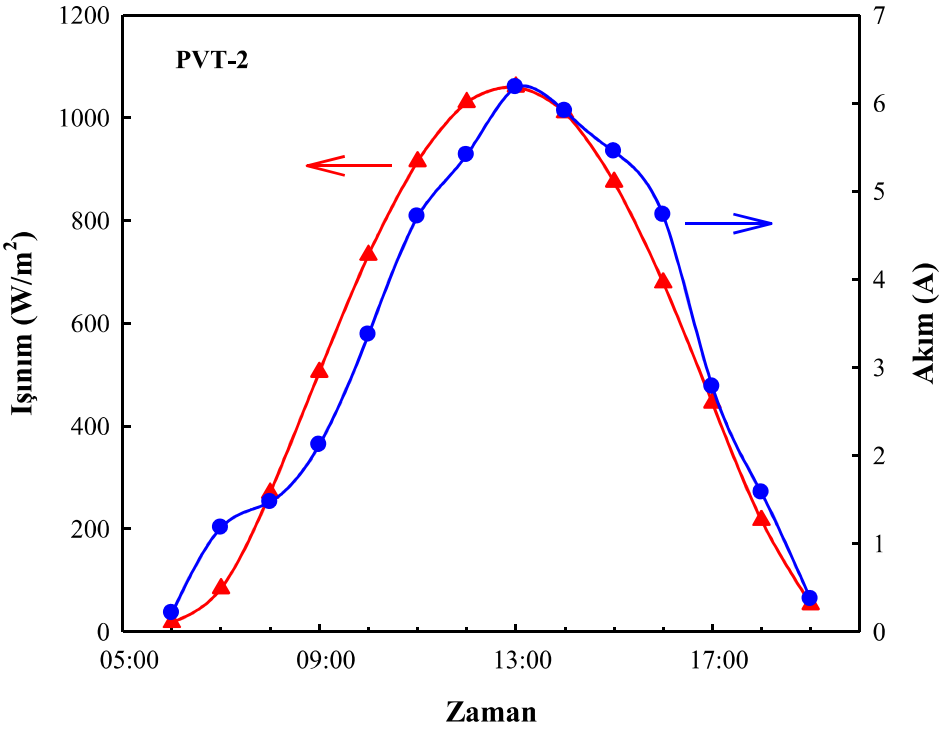
4.3 Elektriksel Performans Ölçüm Sonuçları

Yapılan deneyler sonucunda gün içerisinde her bir PV/T modülden elde edilen elektriksel akımın güneş ışınıma bağlı değişim grafikleri sırası ile, PVT-1 için Şekil 4.14'de, PVT-2 için Şekil 4.15'de, PVT-3 için Şekil 4.16'de, PVT-4 için Şekil 4.17'de, PVT-5 için Şekil 4.18'de ve PV modül için Şekil 4.19'da verilmektedir.

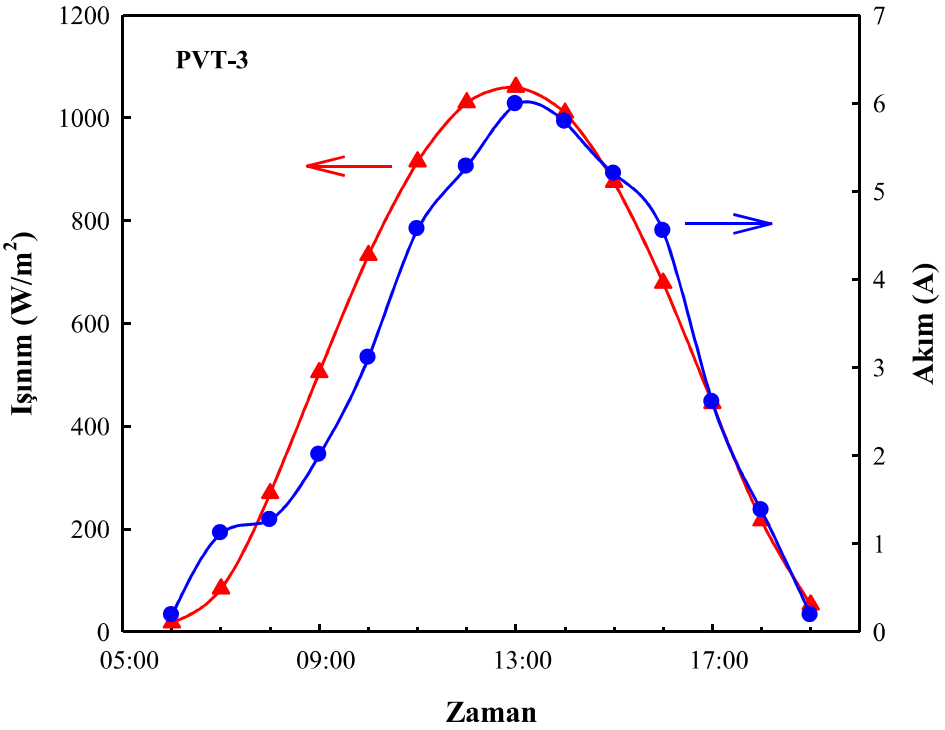
Yapılan deneyler sonucunda güneş ışınım değerinin artmasının PV/T ve PV modüllerde az da olsa akım değerini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca her bir PV/T modülün akım değerlerinin değişimi incelendiğinde, PVT-5 modülünden diğer PV/T modüllere nazaran büyük akım değeri, PVT-3 modülünden ise nispeten küçük akım değerleri elde edildiği görülmüştür. Bilindiği gibi, PV hücrelerin akım değerleri artan sıcaklıkla az da olsa artar. Fakat artan sıcaklıkla akımdaki bu az artışa rağmen, voltaj değerinde ciddi bir azalma olur. Bu da PV hücrelerinin performansının azalmasına, yani verimlerinin düşmesine sebep olur.



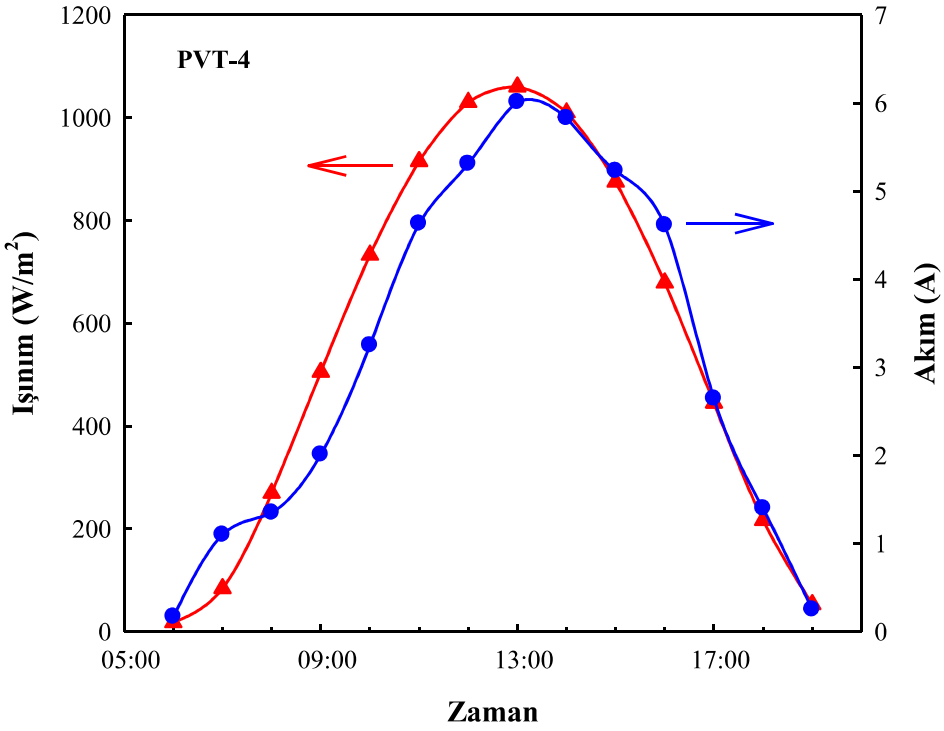
Şekil 4.14. PVT-1 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği.



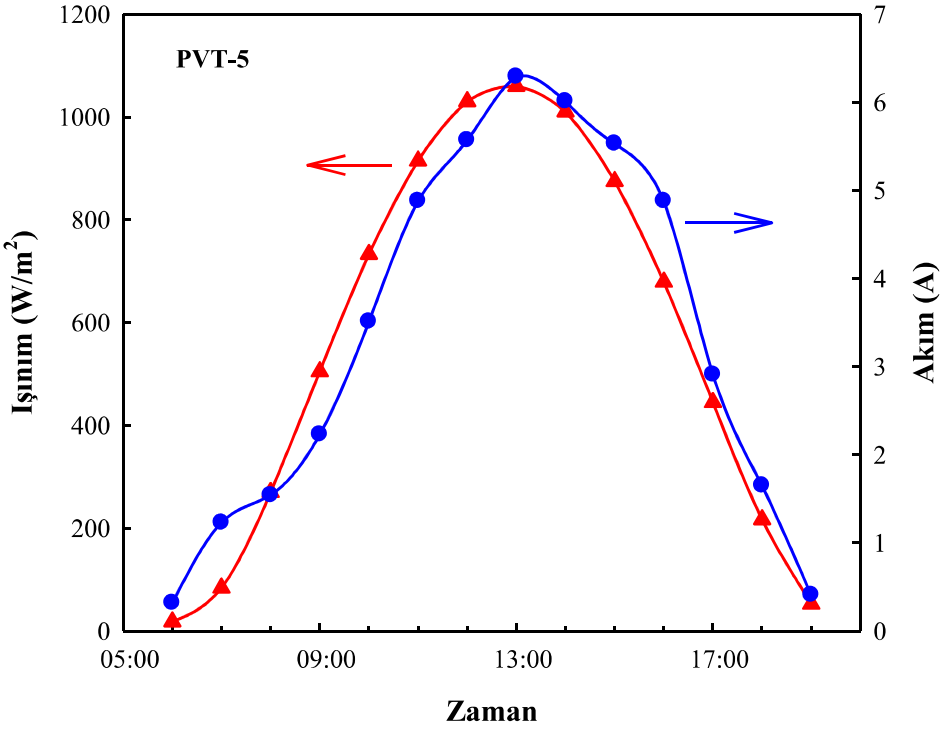
Şekil 4.15. PVT-2 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği.



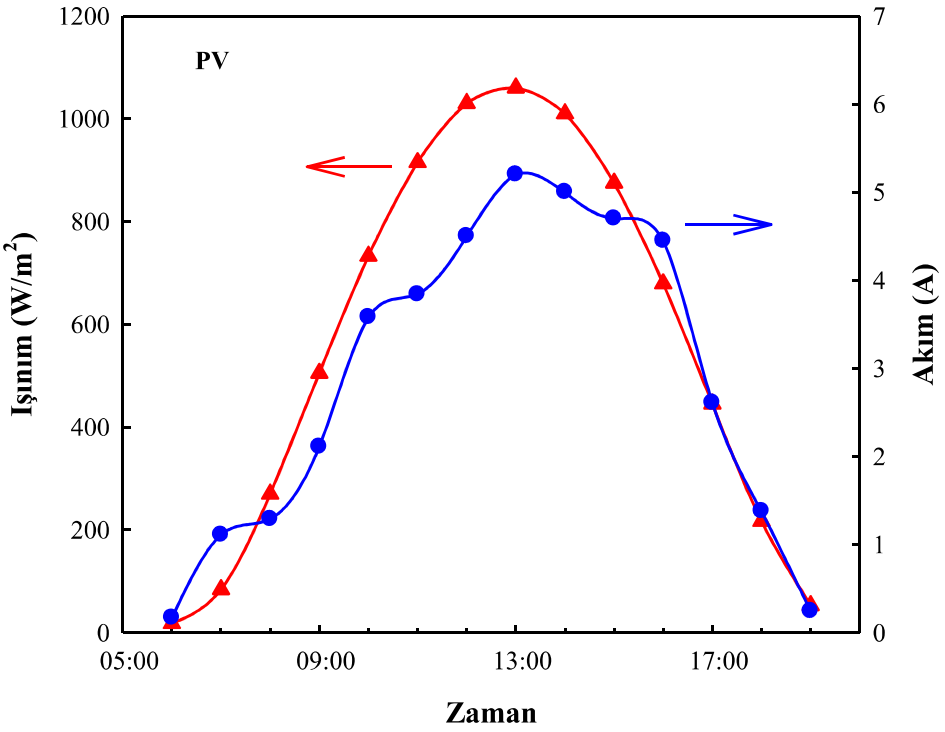
Şekil 4.16. PVT-3 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği.



Şekil 4.17. PVT-4 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği.



Şekil 4.18. PVT-5 modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği.



Şekil 4.19. PV modülü için Temmuz ayı ortalama günlük ışınım-akım değişim grafiği.

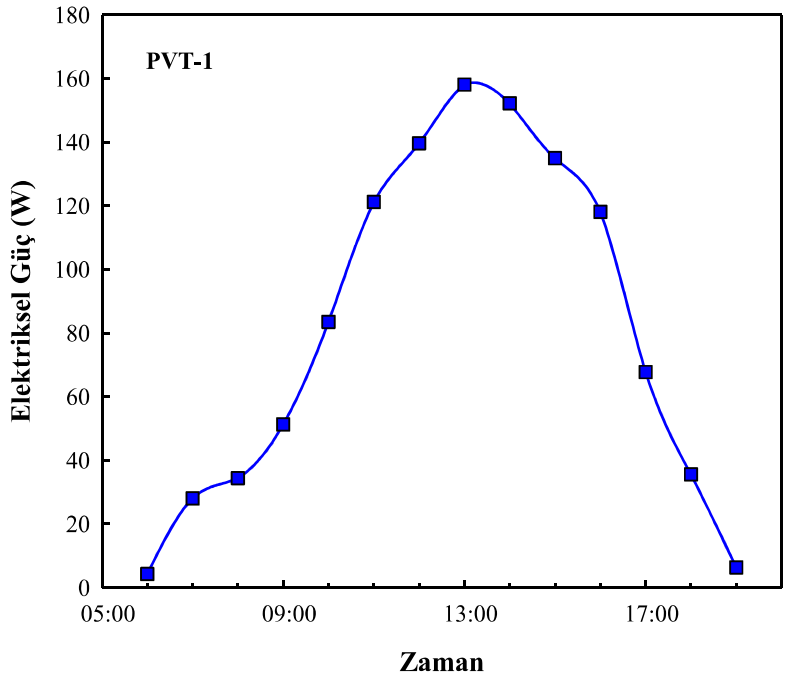
Bunun fiziksel nedenleri 2. Bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir. Buradan hareketle; PVT-3 modülünün termal kısım yapısının diğer yapılara göre, hücre sıcaklığı değerleri açısından daha etkin soğutma yaparak, bu modüldeki hücrelerin daha düşük hücre sıcaklıklarında enerji dönüşümü yapmasını sağladığını düşünmek mümkündür. Tüm PV/T modüllerin akım değerlerinin küçükten büyüğe doğru bir sıralaması yapıldığında $I_{PVT-3}<I_{PVT-4}<I_{PVT-2}<I_{PVT-1}<I_{PVT-5}$ sonucuna ulaşılmıştır.

Ayrıca, düşük ışınım koşullarında, ortam sıcaklığının düşük olması ve dolayısı ile hücre sıcaklıklarının birbirine çok yakın olması nedeni ile PV/T modüller ile PV modülün akım değerlerinde farklılık olmadığı gözlenmiştir. Fakat yüksek ışınım değerlerinin olduğu zaman dilimlerinde, PV/T modülde bulunan hücreler termal kısım ile soğutulduğundan dolayı, PV modüle göre daha düşük akım değerlerine sahip olmaktadır. PV modülde herhangi bir soğutma işlemi olmadığından hücrelerin daha fazla ısınması sonucunda modül akımı daha yüksektir.

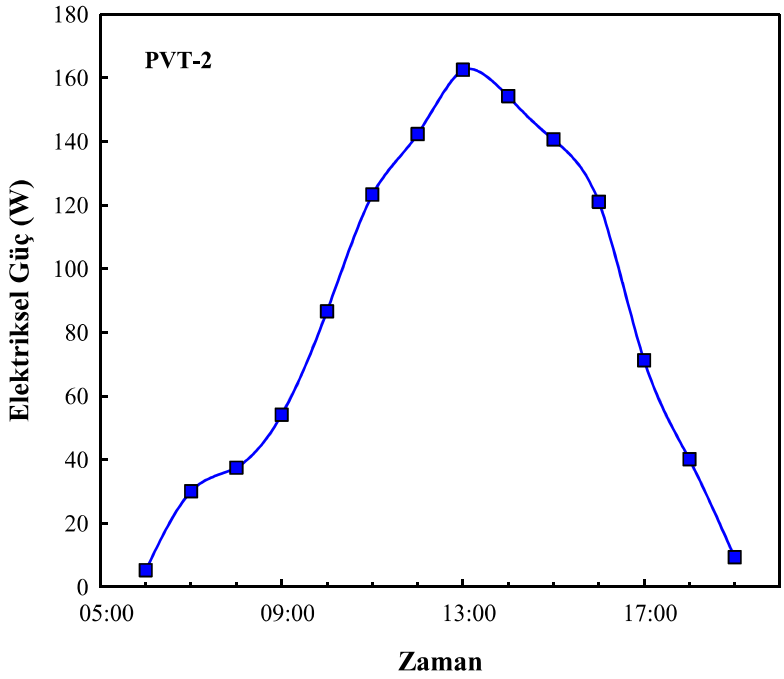
Bu grafikler aynı zamanda şebekeden bağımsız olarak kurulmuş PV sistemler (off - grid PV sistemler) için de önemli bir bilgi içerir. Bağımsız sistemlerde

üretilen elektriğin depolanması için akü grubuna gereksinim duyulur. Akülerin nominal akımda şarj edilebilmesi için gün içerisinde değişik ışınım değerlerinde PV modüllerden üretilen akım değerlerini bilmek önemli avantajlar sağlar. Bu grafikler bu bakımdan önem arz etmektedir.

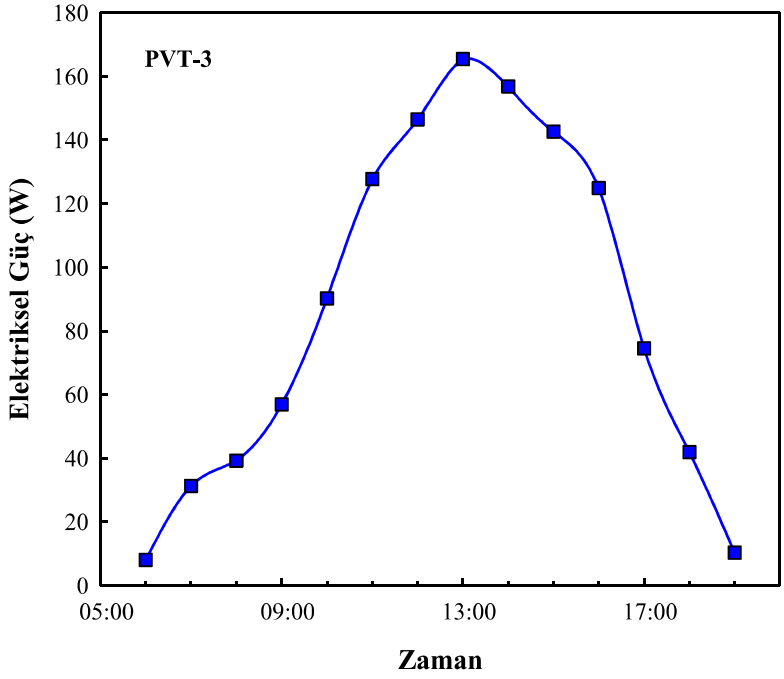
Yapılan akım-gerilim ölçümlerden PV/T modüllerin ve PV modülün elektriksel güç değerleri de belirlenmiştir. Temmuz ayında gün içerisinde her bir PV/T ve PV modüllerin ortalama elektriksel güç değerleri sırasıyla, PVT-1 için Şekil 4.20'de, PVT-2 için Şekil 4.21'de, PVT-3 için Şekil 4.22'de, PVT-4 için Şekil 4.23'de, PVT-5 için Şekil 4.24'de ve PV modül için Şekil 4.25'de verilmektedir.



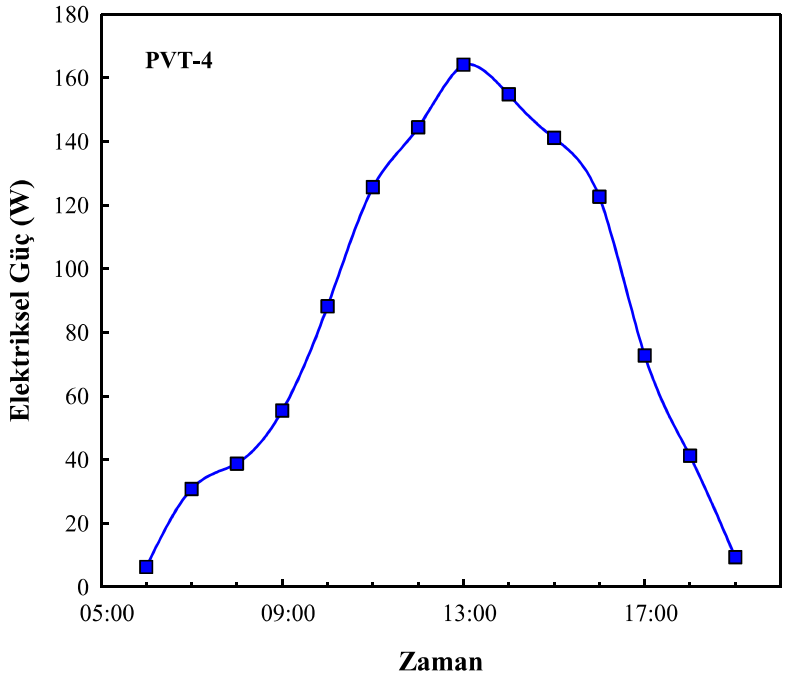
Şekil 4.20. Temmuz ayı PVT-1 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri.



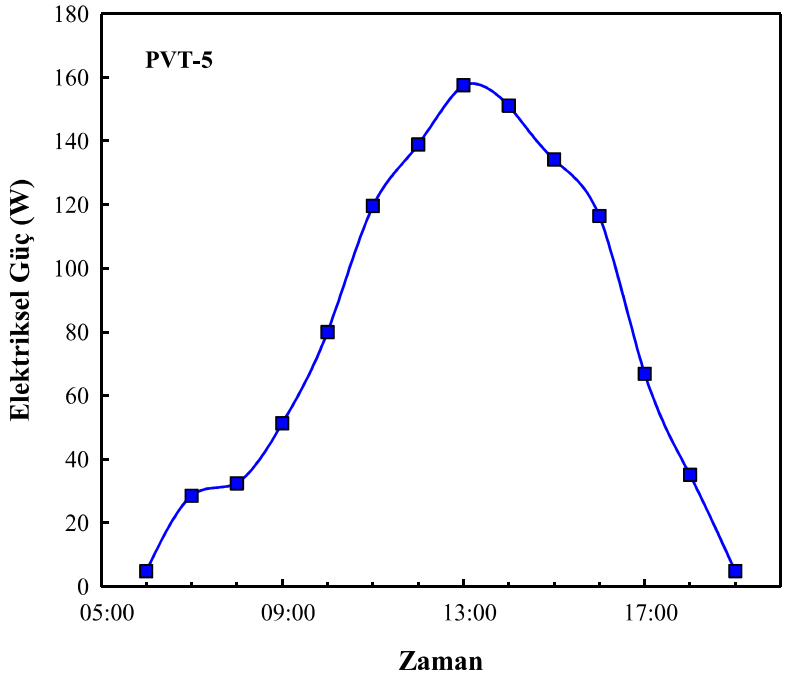
Şekil 4.21. Temmuz ayı PVT-2 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri.



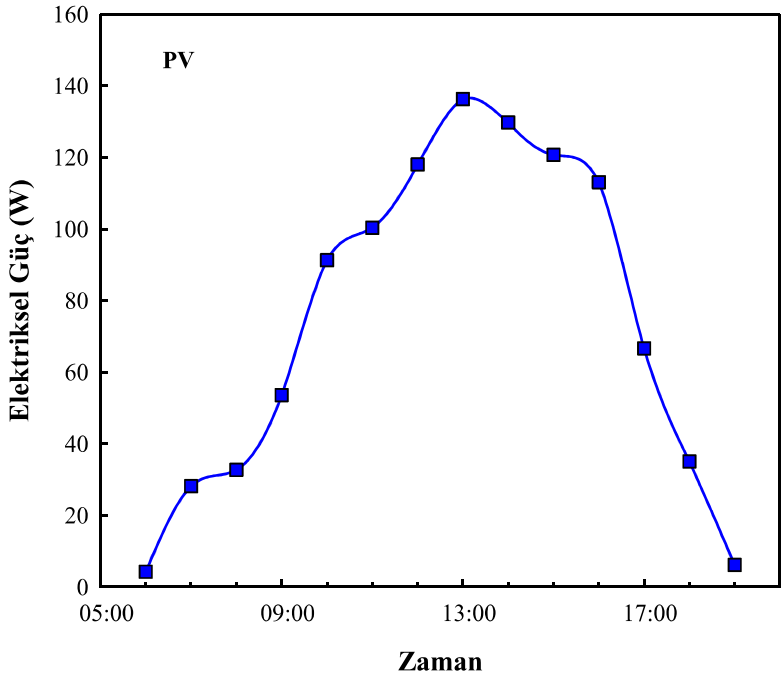
Şekil 4.22. Temmuz ayı PVT-3 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri.



Şekil 4.23. Temmuz ayı PVT-4 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri.



Şekil 4.24. Temmuz ayı PVT-5 modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri.

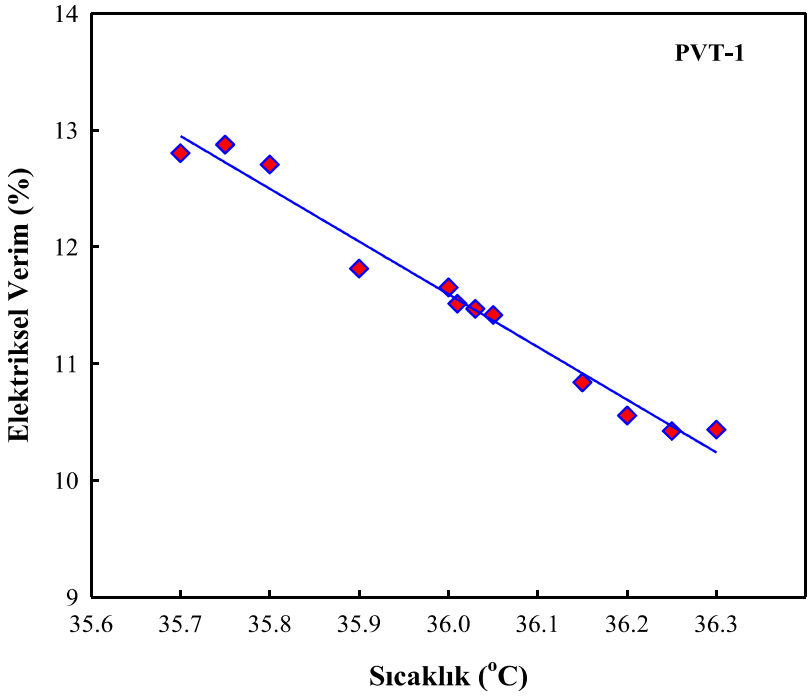


Şekil 4.25. Temmuz ayı PV modülün günlük ortalama elektriksel güç değerleri.

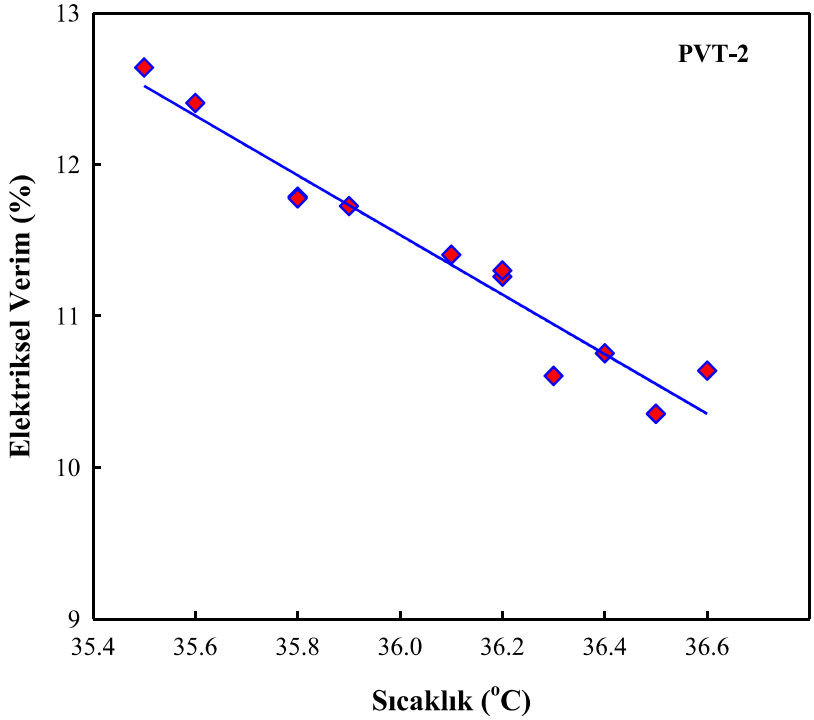
Gün içerisinde, saat 13:00'de, 1010 W/m^2 ışınım, 35 °C ortam sıcaklığı ve 0.83 m/s rüzgar hızında, PVT-3 modülünden, sırasıyla PVT-1 modülünden; 7.37 W, PVT-2 modülünden; 2.9 W, PVT-4 modülünden; 1.32 W, PVT-5 modülünden; 7.89W ve PV modülden; 29.29 W daha fazla elektriksel güç elde edilmiştir.

Yapılan ölçümler sonucunda günlük ortalama toplam üretilen elektriksel enerji değerleri sırasıyla, PVT-1 modül için; 1135,28 Wh, PVT-2 modül için 1178,28 Wh, PVT-3 modül için 1216,70 Wh, PVT-4 modül için 1195,31 Wh, PVT-5 modül için; 1121,39 Wh ve PV modül için 1035,77 Wh olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, en yüksek enerji dönüşümü PVT-3 modülü ile sağlanmıştır. Temmuz ayı dışındaki aylarda yapılan ölçümler, numunelerin dönüşüm yaptıkları toplam elektrik enerjisi bakımından ileride tartışılacaktır.

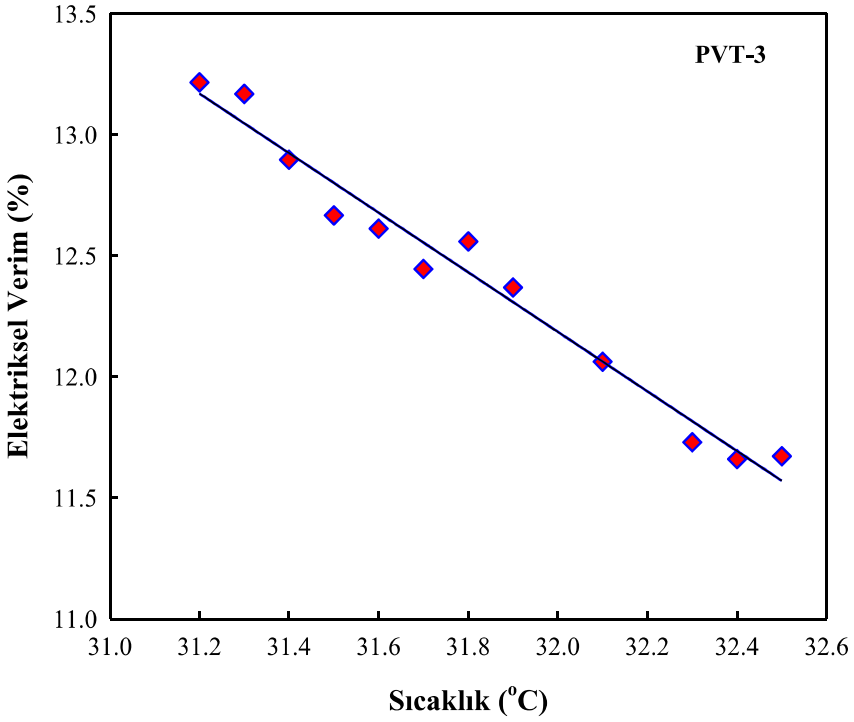
Her bir PV/T modülün ve PV modülün çalışma koşulları altındaki verim değerlerinin hücre yüzey sıcaklığına bağlı değişim grafikleri, günlük 1000-1060 W/m^2 ışınım, 35-36 °C ortam sıcaklığı ve 0,8-0,85 m/s rüzgar hızı şartlarında çizilmiş ve PVT-1 için Şekil 4.26'da, PVT-2 için Şekil 4.27'de, PVT-3 için Şekil 4.28'de, PVT-4 için Şekil 4.29'da, PVT-5 için Şekil 4.30'da ve PV modül için Şekil 4.31'de sunulmuştur.



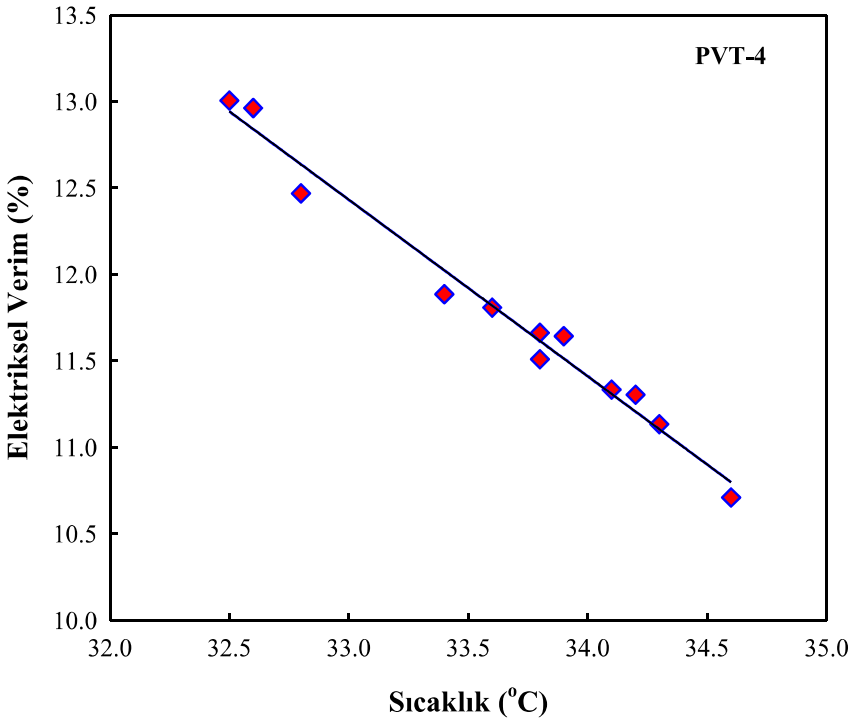
Şekil 4.26. PVT-1 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi.



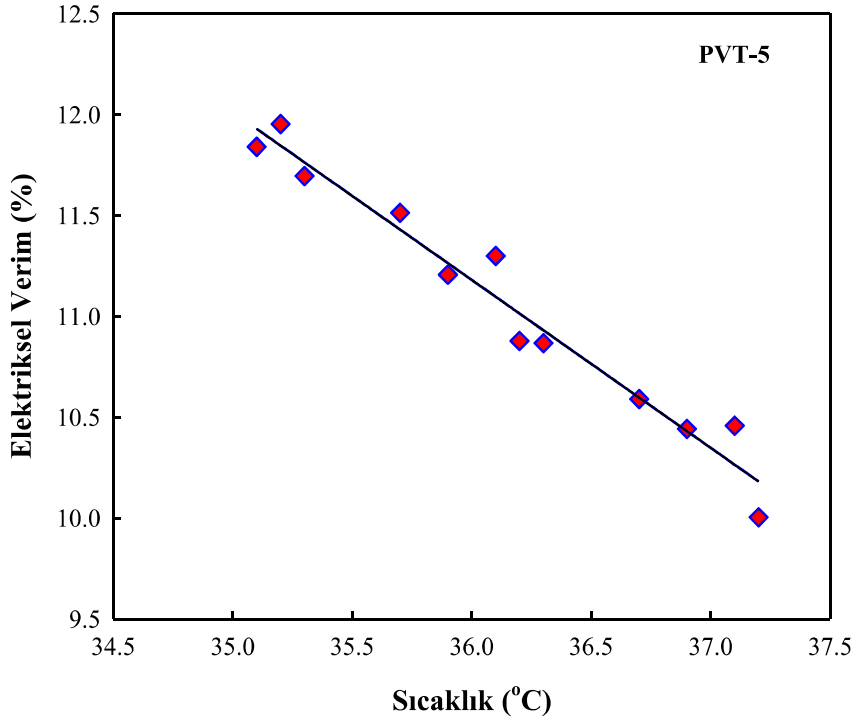
Şekil 4.27. PVT-2 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi.



Şekil 4.28. PVT-3 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi.

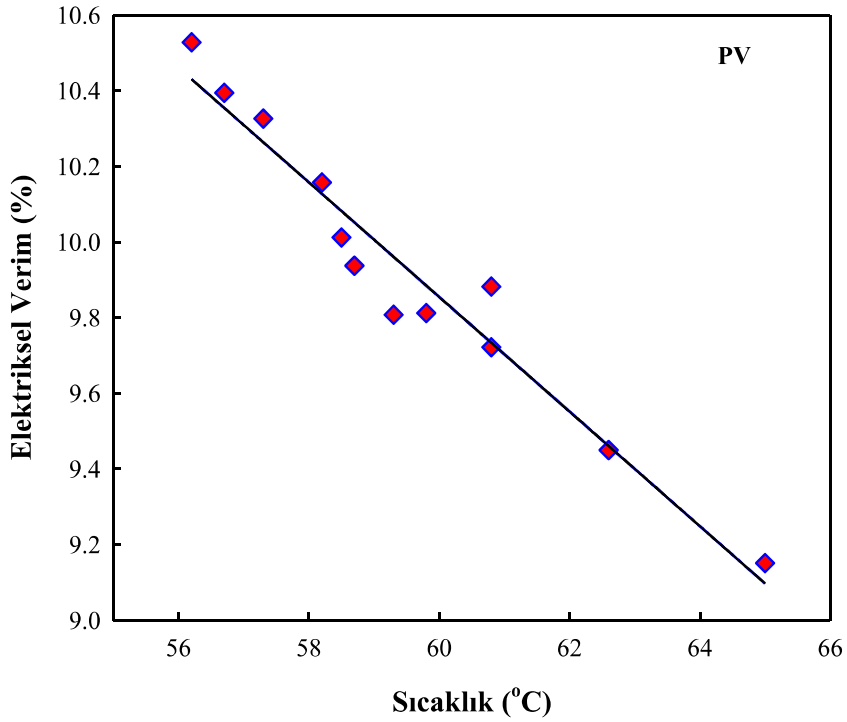


Şekil 4.29. PVT-4 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi.



Şekil 4.30. PVT-5 modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi.

,



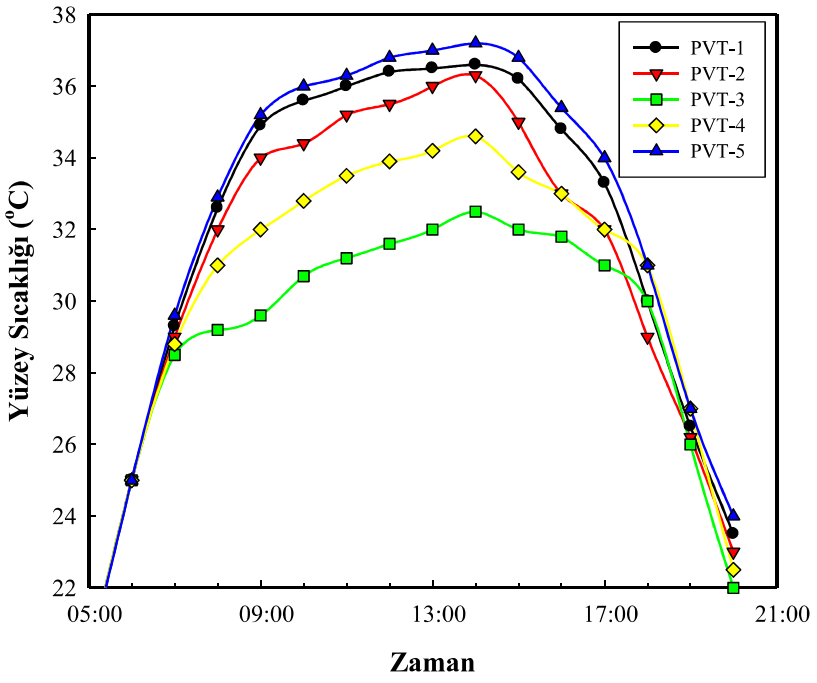
Şekil 4.31. PV modülünün elektriksel veriminin hücre yüzey sıcaklığına göre değişimi.

Deney düzeneklerinin yerleştirildiği ortam koşullarında, yapılan ölçümler sonucunda PV/T modüller ve PV modül için ortalama elektriksel dönüşüm verim değerleri; PVT-1 modülü için % 11.5, PVT-2 modülü için % 11.4, PVT-3 modülü için % 12.4, PVT-4 modülü için % 11.8, PVT-5 modülü için % 11.1 ve PV modül için; % 9.9 olarak bulunmuştur.

Aynı şekilde gün içerisinde PV/T modüller ve PV modül için elde edilen maksimum verim değerleri; PVT-1 modülü için % 12.9, PVT-2 modülü için % 12.6, PVT-3 kolektör için % 13.2, PVT-4 modülü için % 13.0, PVT-5 modülü için; % 12.0 ve PV modül için %10.5 olarak bulunmuştur.

4.4 Termal Performans Ölçüm Sonuçları

Farklı soğurucu yapılarına sahip modüllerin hücre soğutma performanslarını incelemek amacı ile PV/T modüllerin üzerine PV hücre ile temas edecek şekilde sıcaklık sensörleri yerleştirilmiş ve yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Sıcaklığın ve ışınımın en yüksek olduğu Temmuz ayında yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçların ortalama değerler, Şekil 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.32. PV/T modüllerin Temmuz ayı ortalama yüzey sıcaklıkları.

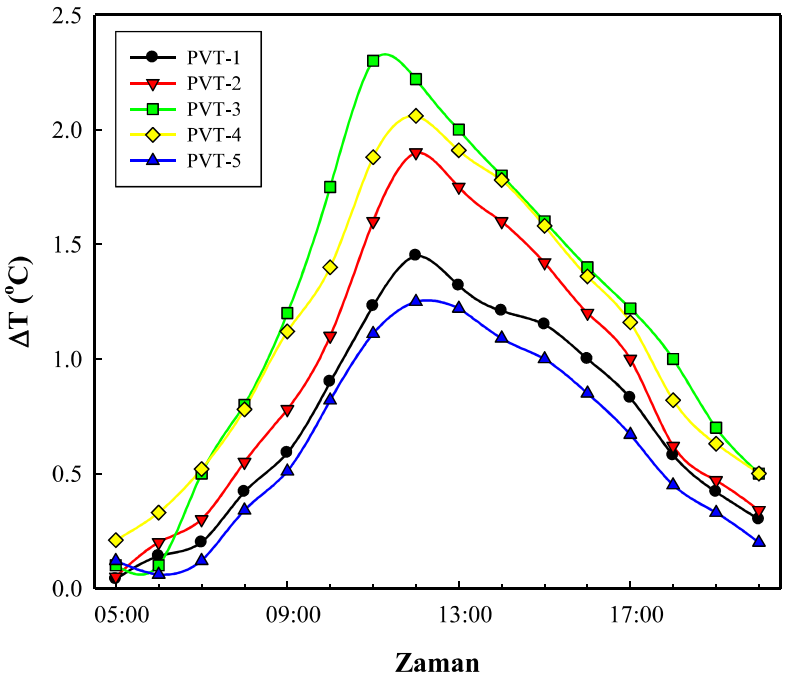
Termal kısım yönünden farklı yapıya sahip PV/T modüller üzerinde yapılan ölçümler sonucunda, yüzey soğutma derecesi en yüksek olan modül PVT-3 isimli modül olmuştur. Benzer şekilde her bir tip için ölçülen ortalama maksimum yüzey sıcaklık değerleri ise, Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PV/T modüllerin Temmuz ayı maksimum yüzey sıcaklıkları.

Numune	Maksimum Yüzey Sıcaklığı (°C)
PVT-1	36.6
PVT-2	36.3
PVT-3	32.5
PVT-4	34.6
PVT-5	37.2

PV/T modüllerin, termal kazancı ve termal verim değerlerinin hesaplanabilmesi için, modüllerin su giriş ve çıkış sıcaklıklarının bilinmesi gerekir. PV/T modüllerin giriş ve çıkış su sıcaklıklarının, Bölüm 3.2.2'de verilen deneysel sistemde ölçümleri yapılmıştır. 806 W/m^2 güneş ışınımı, 28.6 °C ortam sıcaklığı ve 0,045 kg/s giriş debisindeki modül giriş-çıkış su sıcaklık farkı profili Şekil 4.33'de görülmektedir. Elde edilen sıcaklık farkları; PVT-1 modülü için 1.45 °C, PVT-2 modülü için 1.9 °C, PVT-3 modülü için 2.3 °C, PVT-4 modülü için 2.06 °C ve PVT-5 modülü için 1.25 °C olarak bulunmuştur.

Benzer şekilde 1050 W/m^2 ışınım, 32.5 °C ortam sıcaklığı ve 0,045 kg/s giriş debisindeki modül giriş-çıkış su sıcaklıkları, Çizelge 4.3'de verilmektedir. Bu deneylerde, modül giriş sıcaklıkları 33 °C de (ortam sıcaklığının üzerinde) sabit tutulmuş ve her bir kolektörün 1 saatlik sıcaklık farkları değerleri incelenmiştir. Deneyler; her bir modül için günün en yüksek ışınım ve sıcaklık anında modül sıcaklık farklarının ve verim değerlerinin hesaplanması için yapılmıştır.



Şekil 4.33. PV/T modüllerin su giriş-çıkış sıcaklık farklarının değişimi.

Çizelge 4.3. PV/T modüllerin su giriş-çıkış sıcaklık değerleri.

Numune	T_o (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Işınım (W/m^2)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	ΔT (°C)
PVT-1	32.5	1	1050	33	36.78	0.045	3.78
PVT-2	32.5	1	1050	33	36.86	0.045	3.86
PVT-3	32.5	1	1050	33	37.10	0.045	4.10
PVT-4	32.5	1	1050	33	36.90	0.045	3.90
PVT-5	32.5	1	1050	33	36.70	0.045	3.70

Çizelge 4.3'de verilen ölçüm sonuçları kullanılarak, PV/T modüllerin termal verimlilikleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek termal verimlilik, PVT-3 modülünden elde edilmiştir.

PV/T modüllerin 1 Nisan'dan 30 Eylül'e kadar, 30 °C sabit su giriş sıcaklığında ve 0,045 kg/s debi değerinde, sabah saat 09:00'da, öğlen saat 12:00'de ve ikindi saat 16:00'da ölçümleri yapılmış ve her bir modül tipi için sıcaklık farkı, anlık verim değerleri (Denklem (2.18)'den) ve anlık faydalı güç

değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar sırasıyla, PVT-1 modülü için Çizelge 4.5'de, PVT-2 modülü için Çizelge 4.6'da, PVT-3 kolektör için Çizelge 4.7'de, PVT-4 modülü için Çizelge 4.8'de, PVT-5 modülü için ise Çizelge 4.9'da verilmiştir. Ayrıca, bu zaman aralığında, farklı güneş ışınımı değerleri için su giriş-çıkış sıcaklık fakları belirlenmiş, güneş ışınımına göre, modüllerin su giriş-çıkış sıcaklık farkı grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler ise yine sırası ile, PVT-1 için Şekil 4.34'de, PVT-2 için Şekil 4.35'de, PVT-3 için Şekil 4.36'da, PVT-4 için Şekil 4.37'de, PVT-5 için Şekil 4.38'de sunulmuştur.

Beş farklı tipte PVT modül için yapılan deney sonuçlarına göre en fazla sıcaklık farkı 4.17 °C ile Ağustos ayında PVT-3'den elde edilmiştir. Diğer modüller için en yüksek sıcaklık farkı değerleri; 3.94 °C ile PVT-4, 3.9 °C ile PVT-2, 3.81 °C ile PVT-1 ve 3.74 °C ile PVT-5'den elde edilmiştir. Benzer şekilde gerçek faydalı güç ise en fazla 783 W ile PVT-3'den elde edilmiştir. Diğer PV/T modüller için gerçek faydalı güç değerleri ise, 740 W ile PVT-4, 733 W ile PVT-2, 716 W ile PVT-1 ve 703 W ile PVT-5 şeklindedir.

Çizelge 4.4. PV/T modüllerin aynı koşullardaki termal parametreleri ve verimlilikleri.

Numune	Ölçülen Ortam Koşulları			PV/T Modül		PV/T Modül Ölçümleri			Hesaplamalar							
	T_o (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Işınım (W/m^2)	Açıklık Alan (m^2)	Soğurucu Alanı (m^2)	T_{ig} (°C)	$T_ç$ (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	ΔT (°C)	T_m (°C)	C_p (Ws/kg°C)	T_m-T_o (°C)	İndirgenmiş Sıcaklık Farkı	Gerçek Faydalı Güç (W)	Anlık Verim (Açıklık Alan)	Anlık Verim (Soğurucu Alan)
PVT-1	32.5	1	1050	1.365	1.36	33	36.78	0.045	3.78	34.89	4175	2.39	0.0022	710	0.495	0.497
PVT-2	32.5	1	1050	1.365	1.36	33	36.86	0.045	3.86	34.93	4175	2.43	0.0023	725	0.506	0.508
PVT-3	32.5	1	1050	1.365	1.36	33	37.1	0.045	4.10	35.05	4175	2.55	0.0024	770	0.537	0.539
PVT-4	32.5	1	1050	1.365	1.36	33	36.9	0.045	3.90	34.95	4175	2.45	0.0023	733	0.511	0.513
PVT-5	32.5	1	1050	1.365	1.36	33	36.7	0.045	3.70	34.85	4175	2.35	0.0022	695	0.485	0.487

Çizelge 4.5. PVT-1 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri.

Aylar	Ölçülen Ortam Koşulları			PV/T Modül		PV/T Modül Ölçümleri			Hesaplamalar							
	T_o (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Işınım (W/m^2)	Açıklık Alan (m^2)	Soğurucu Alanı (m^2)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	ΔT (°C)	T_m (°C)	C_p (Ws/kg°C)	T_m-T_o (°C)	İndirgenmiş Sıcaklık Farkı	Gerçek Faydalı Güç (W)	Anlık Verim (Açıklık Alan)	Anlık Verim (Soğurucu Alan)
Nisan	15,4	1	569	1,365	1,36	30	31,42	0,045	1,42	30,710	4175	15,310	0,02566	267	0,343	0,345
	18,1	1	806	1,365	1,36	30	32,60	0,045	2,60	31,300	4175	13,200	0,01476	488	0,444	0,446
	18,9	1	350	1,365	1,36	30	30,68	0,045	0,68	30,340	4175	11,440	0,03171	128	0,267	0,268
Mayıs	20,7	1	657	1,365	1,36	30	32,15	0,045	2,15	31,075	4175	10,375	0,01416	404	0,450	0,452
	24,4	1	922	1,365	1,36	30	33,12	0,045	3,12	31,560	4175	7,160	0,00607	586	0,466	0,467
	25,4	1	416	1,365	1,36	30	31,16	0,045	1,16	30,580	4175	5,180	0,01106	218	0,384	0,385
Haziran	25,6	1	704	1,365	1,36	30	32,21	0,045	2,21	31,105	4175	5,505	0,00625	415	0,432	0,434
	29,4	1	998	1,365	1,36	30	33,55	0,045	3,55	31,775	4175	2,375	0,00060	667	0,490	0,491
	30,7	1	443	1,365	1,36	30	31,20	0,045	1,20	30,600	4175	-0,100	-0,00158	225	0,373	0,374
Temmuz	27,9	1	733	1,365	1,36	30	32,48	0,045	2,48	31,240	4175	3,340	0,00286	466	0,466	0,467
	31,9	1	1060	1,365	1,36	30	33,81	0,045	3,81	31,905	4175	0,005	-0,00179	716	0,495	0,497
	33,3	1	445	1,365	1,36	30	31,30	0,045	1,30	30,650	4175	-2,650	-0,00742	244	0,402	0,404
Ağustos	27,3	1	725	1,365	1,36	30	32,53	0,045	2,53	31,265	4175	3,965	0,00372	475	0,480	0,482
	31,4	1	1070	1,365	1,36	30	33,80	0,045	3,80	31,900	4175	0,500	-0,00131	714	0,489	0,491
	32,6	1	422	1,365	1,36	30	31,30	0,045	1,30	30,650	4175	-1,950	-0,00616	244	0,424	0,426
Eylül	22,9	1	654	1,365	1,36	30	32,24	0,045	2,24	31,120	4175	8,220	0,01086	421	0,471	0,473
	27,1	1	998	1,365	1,36	30	33,52	0,045	3,52	31,760	4175	4,660	0,00291	661	0,485	0,487
	27,8	1	354	1,365	1,36	30	31,10	0,045	1,10	30,550	4175	2,750	0,00621	207	0,428	0,429

Çizelge 4.6. PVT-2 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri.

Aylar	Ölçülen Ortam Koşulları			PV/T Modül		PV/T Modül Ölçümleri			Hesaplamalar							
	T_o (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Işınım (W/m^2)	Açıklık Alan (m^2)	Soğurucu Alanı (m^2)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	ΔT (°C)	T_m (°C)	C_p (Ws/kg°C)	T_m-T_o (°C)	İndirgenmiş Sıcaklık Farkı	Gerçek Faydalı Güç (W)	Anlık Verim (Açıklık Alan)	Anlık Verim (Soğurucu Alan)
Nisan	15,4	1	569	1,365	1,36	30	31,56	0,045	1,56	30,780	4175	15,380	0,02703	293	0,377	0,379
	18,1	1	806	1,365	1,36	30	32,55	0,045	2,55	31,275	4175	13,175	0,01635	479	0,435	0,437
	18,9	1	350	1,365	1,36	30	30,95	0,045	0,95	30,475	4175	11,575	0,03307	178	0,374	0,375
Mayıs	20,7	1	657	1,365	1,36	30	32,10	0,045	2,10	31,050	4175	10,350	0,01575	395	0,440	0,442
	24,4	1	922	1,365	1,36	30	33,25	0,045	3,25	31,625	4175	7,225	0,00784	611	0,485	0,487
	25,4	1	416	1,365	1,36	30	31,22	0,045	1,22	30,610	4175	5,210	0,01252	229	0,404	0,405
Haziran	25,6	1	704	1,365	1,36	30	32,23	0,045	2,23	31,115	4175	5,515	0,00783	419	0,436	0,438
	29,4	1	998	1,365	1,36	30	33,60	0,045	3,60	31,800	4175	2,400	0,00240	676	0,496	0,498
	30,7	1	443	1,365	1,36	30	31,54	0,045	1,54	30,770	4175	0,070	0,00016	289	0,478	0,480
Temmuz	27,9	1	733	1,365	1,36	30	32,56	0,045	2,56	31,280	4175	3,380	0,00461	481	0,481	0,482
	31,9	1	1060	1,365	1,36	30	33,90	0,045	3,90	31,950	4175	0,050	0,00005	733	0,506	0,508
	33,3	1	445	1,365	1,36	30	31,50	0,045	1,50	30,750	4175	-2,550	-0,00573	282	0,464	0,466
Ağustos	27,3	1	725	1,365	1,36	30	32,45	0,045	2,45	31,225	4175	3,925	0,00541	460	0,465	0,467
	31,4	1	1070	1,365	1,36	30	33,92	0,045	3,92	31,960	4175	0,560	0,00052	736	0,504	0,506
	32,6	1	422	1,365	1,36	30	31,45	0,045	1,45	30,725	4175	-1,875	-0,00444	272	0,473	0,475
Eylül	22,9	1	654	1,365	1,36	30	31,98	0,045	1,98	30,990	4175	8,090	0,01237	372	0,417	0,418
	27,1	1	998	1,365	1,36	30	33,55	0,045	3,55	31,775	4175	4,675	0,00468	667	0,490	0,491
	27,8	1	354	1,365	1,36	30	31,22	0,045	1,22	30,610	4175	2,810	0,00794	229	0,474	0,476

Çizelge 4.7. PVT-3 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri.

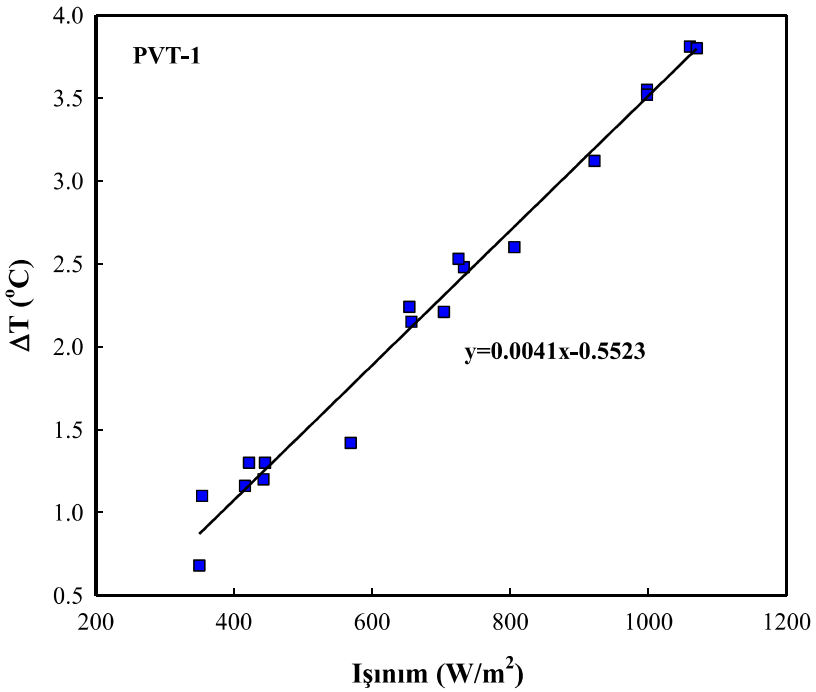
Aylar	Ölçülen Ortam Koşulları			PV/T Modül		PV/T Modül Ölçümleri			Hesaplamalar							
	T_o (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Işınım (W/m^2)	Açıklık Alan (m^2)	Soğurucu Alanı (m^2)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	ΔT (°C)	T_m (°C)	C_p (Ws/kg°C)	T_m–T_o (°C)	İndirgenmiş Sıcaklık Farkı	Gerçek Faydalı Güç (W)	Anlık Verim (Açıklık Alan)	Anlık Verim (Soğurucu Alan)
Nisan	15,4	1	569	1,365	1,36	30	31,68	0,045	1,68	30,840	4175	15,440	0,02714	316	0,406	0,408
	18,1	1	806	1,365	1,36	30	32,47	0,045	2,47	31,235	4175	13,135	0,01630	464	0,422	0,423
	18,9	1	350	1,365	1,36	30	30,64	0,045	0,64	30,320	4175	11,420	0,03263	120	0,252	0,253
Mayıs	20,7	1	657	1,365	1,36	30	32,21	0,045	2,21	31,105	4175	10,405	0,01584	415	0,463	0,465
	24,4	1	922	1,365	1,36	30	33,24	0,045	3,24	31,620	4175	7,2200	0,00783	609	0,484	0,485
	25,4	1	416	1,365	1,36	30	31,12	0,045	1,12	30,560	4175	5,1600	0,01240	210	0,371	0,372
Haziran	25,6	1	704	1,365	1,36	30	32,65	0,045	2,65	31,325	4175	5,725	0,00813	498	0,518	0,520
	29,4	1	998	1,365	1,36	30	33,75	0,045	3,75	31,875	4175	2,475	0,00248	705	0,517	0,519
	30,7	1	443	1,365	1,36	30	31,42	0,045	1,42	30,710	4175	0,010	0,00002	267	0,441	0,443
Temmuz	27,9	1	733	1,365	1,36	30	32,78	0,045	2,78	31,390	4175	3,490	0,00476	522	0,522	0,524
	31,9	1	1060	1,365	1,36	30	34,13	0,045	4,13	32,065	4175	0,165	0,00016	776	0,536	0,538
	33,3	1	445	1,365	1,36	30	31,46	0,045	1,46	30,730	4175	-2,57	-0,00578	274	0,452	0,453
Ağustos	27,3	1	725	1,365	1,36	30	32,49	0,045	2,49	31,245	4175	3,945	0,00544	468	0,473	0,474
	31,4	1	1070	1,365	1,36	30	34,17	0,045	4,17	32,085	4175	0,685	0,00064	783	0,536	0,538
	32,6	1	422	1,365	1,36	30	31,33	0,045	1,33	30,665	4175	-1,935	-0,00459	250	0,434	0,435
Eylül	22,9	1	654	1,365	1,36	30	32,31	0,045	2,31	31,155	4175	8,255	0,01262	434	0,486	0,488
	27,1	1	998	1,365	1,36	30	33,74	0,045	3,74	31,870	4175	4,770	0,00478	703	0,516	0,518
	27,8	1	354	1,365	1,36	30	31,19	0,045	1,19	30,595	4175	2,795	0,00790	224	0,463	0,464

Çizelge 4.8. PVT-4 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri.

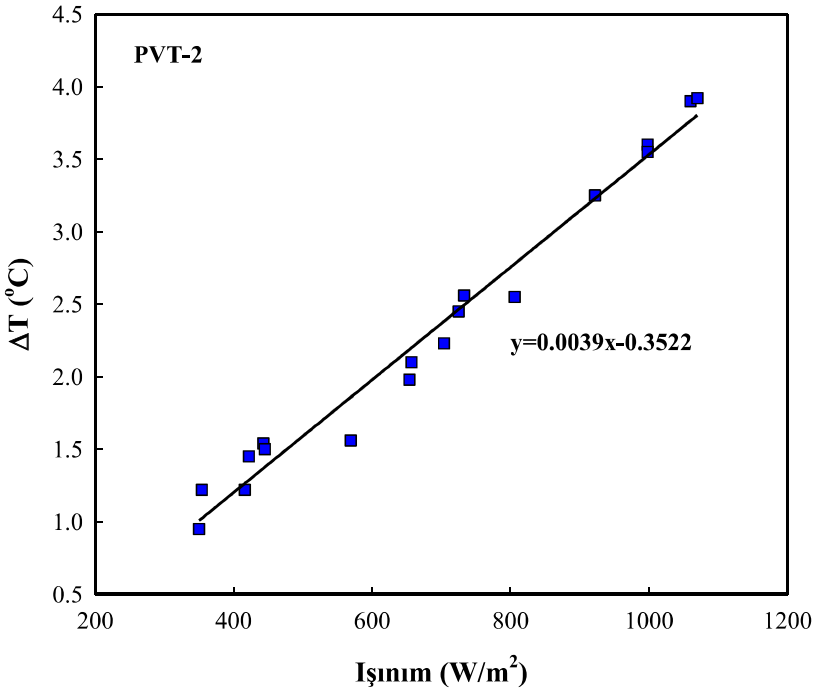
Aylar	Ölçülen Ortam Koşulları			PV/T Modül		PV/T Modül Ölçümleri			Hesaplamalar							
	T_o (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Işınım (W/m^2)	Açıklık Alan (m^2)	Soğurucu Alanı (m^2)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	ΔT (°C)	T_m (°C)	C_p (Ws/kg°C)	T_m-T_o (°C)	İndirgenmiş Sıcaklık Farkı	Gerçek Faydalı Güç (W)	Anlık Verim (Açıklık Alan)	Anlık Verim (Soğurucu Alan)
Nisan	15,4	1	569	1,365	1,36	30	31,64	0,045	1,64	30,82	4175	15,42	0,02710	308	0,397	0,398
	18,1	1	806	1,365	1,36	30	32,49	0,045	2,49	31,245	4175	13,145	0,01631	468	0,425	0,427
	18,9	1	350	1,365	1,36	30	30,89	0,045	0,89	30,445	4175	11,545	0,03299	167	0,350	0,351
Mayıs	20,7	1	657	1,365	1,36	30	32,24	0,045	2,24	31,12	4175	10,42	0,01586	421	0,469	0,471
	24,4	1	922	1,365	1,36	30	33,12	0,045	3,12	31,56	4175	7,160	0,00777	586	0,466	0,467
	25,4	1	416	1,365	1,36	30	31,22	0,045	1,22	30,61	4175	5,210	0,01252	229	0,404	0,405
Haziran	25,6	1	704	1,365	1,36	30	32,47	0,045	2,47	31,235	4175	5,635	0,00800	464	0,483	0,485
	29,4	1	998	1,365	1,36	30	33,65	0,045	3,65	31,825	4175	2,425	0,00243	686	0,503	0,505
	30,7	1	443	1,365	1,36	30	31,45	0,045	1,45	30,725	4175	0,025	0,00006	272	0,451	0,452
Temmuz	27,9	1	733	1,365	1,36	30	32,68	0,045	2,68	31,34	4175	3,44	0,00469	504	0,503	0,505
	31,9	1	1060	1,365	1,36	30	33,94	0,045	3,94	31,97	4175	0,07	0,00007	740	0,512	0,513
	33,3	1	445	1,365	1,36	30	31,48	0,045	1,48	30,74	4175	-2,56	-0,00575	278	0,458	0,459
Ağustos	27,3	1	725	1,365	1,36	30	32,61	0,045	2,61	31,305	4175	4,005	0,00552	490	0,495	0,497
	31,4	1	1070	1,365	1,36	30	33,91	0,045	3,91	31,955	4175	0,555	0,00052	735	0,503	0,505
	32,6	1	422	1,365	1,36	30	31,45	0,045	1,45	30,725	4175	-1,875	-0,00444	272	0,473	0,475
Eylül	22,9	1	654	1,365	1,36	30	32,28	0,045	2,28	31,140	4175	8,240	0,01260	428	0,480	0,482
	27,1	1	998	1,365	1,36	30	33,49	0,045	3,49	31,745	4175	4,645	0,00465	656	0,481	0,483
	27,8	1	354	1,365	1,36	30	31,14	0,045	1,14	30,570	4175	2,770	0,00782	214	0,443	0,445

Çizelge 4.9. PVT-5 modülünün Nisan-Eylül ayları arası için termal parametreleri.

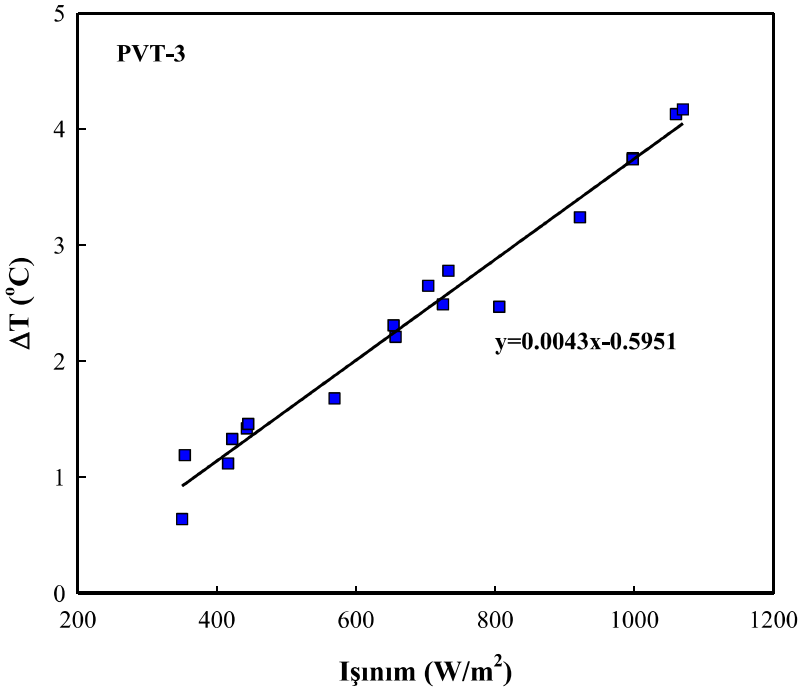
Aylar	Ölçülen Ortam Koşulları			PV/T Modül		PV/T Modül Ölçümleri			Hesaplamalar							
	T_o (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Işınım (W/m^2)	Açıklık Alan (m^2)	Soğurucu Alanı (m^2)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	ΔT (°C)	T_m (°C)	C_p (Ws/kg°C)	T_m-T_o (°C)	İndirgenmiş Sıcaklık Farkı	Gerçek Faydalı Güç (W)	Anlık Verim (Açıklık Alan)	Anlık Verim (Soğurucu Alan)
Nisan	15,4	1	569	1,365	1,36	30	31,23	0,045	1,23	30,615	4175	15,215	0,02674	231	0,298	0,299
	18,1	1	806	1,365	1,36	30	32,47	0,045	2,47	31,235	4175	13,135	0,01630	464	0,422	0,423
	18,9	1	350	1,365	1,36	30	30,52	0,045	0,52	30,260	4175	11,36	0,03246	98	0,204	0,205
Mayıs	20,7	1	657	1,365	1,36	30	32,04	0,045	2,04	31,020	4175	10,32	0,01571	383	0,427	0,429
	24,4	1	922	1,365	1,36	30	32,95	0,045	2,95	31,475	4175	7,075	0,00767	554	0,440	0,442
	25,4	1	416	1,365	1,36	30	31,10	0,045	1,10	30,550	4175	5,15	0,01238	207	0,364	0,365
Haziran	25,6	1	704	1,365	1,36	30	32,14	0,045	2,14	31,07	4175	5,47	0,00777	402	0,418	0,420
	29,4	1	998	1,365	1,36	30	33,40	0,045	3,40	31,70	4175	2,30	0,00230	639	0,469	0,471
	30,7	1	443	1,365	1,36	30	31,02	0,045	1,02	30,51	4175	-0,19	-0,00043	192	0,317	0,318
Temmuz	27,9	1	733	1,365	1,36	30	32,33	0,045	2,33	31,165	4175	3,265	0,00445	438	0,438	0,439
	31,9	1	1060	1,365	1,36	30	33,74	0,045	3,74	31,870	4175	-0,03	-0,00003	703	0,486	0,487
	33,3	1	445	1,365	1,36	30	31,00	0,045	1,00	30,500	4175	-2,80	-0,00629	188	0,309	0,310
Ağustos	27,3	1	725	1,365	1,36	30	32,28	0,045	2,28	31,140	4175	3,84	0,00530	428	0,433	0,434
	31,4	1	1070	1,365	1,36	30	33,68	0,045	3,68	31,840	4175	0,44	0,00041	691	0,473	0,475
	32,6	1	422	1,365	1,36	30	31,11	0,045	1,11	30,555	4175	-2,045	-0,00485	209	0,362	0,363
Eylül	22,9	1	654	1,365	1,36	30	32,09	0,045	2,09	31,045	4175	8,145	0,01245	393	0,440	0,441
	27,1	1	998	1,365	1,36	30	33,24	0,045	3,24	31,620	4175	4,520	0,00453	609	0,447	0,448
	27,8	1	354	1,365	1,36	30	30,97	0,045	0,97	30,485	4175	2,685	0,00758	182	0,377	0,379



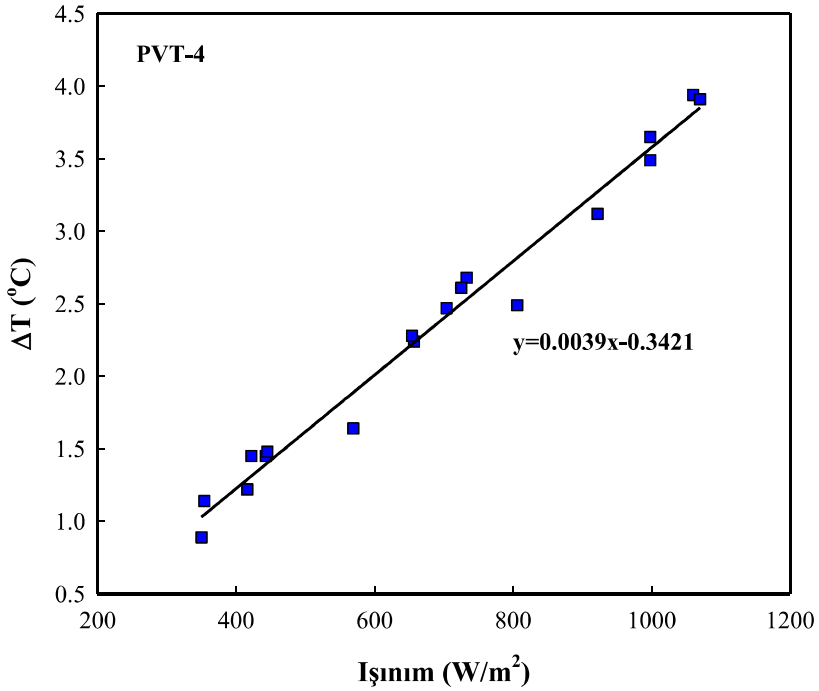
Şekil 4.34. PVT-1 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi.



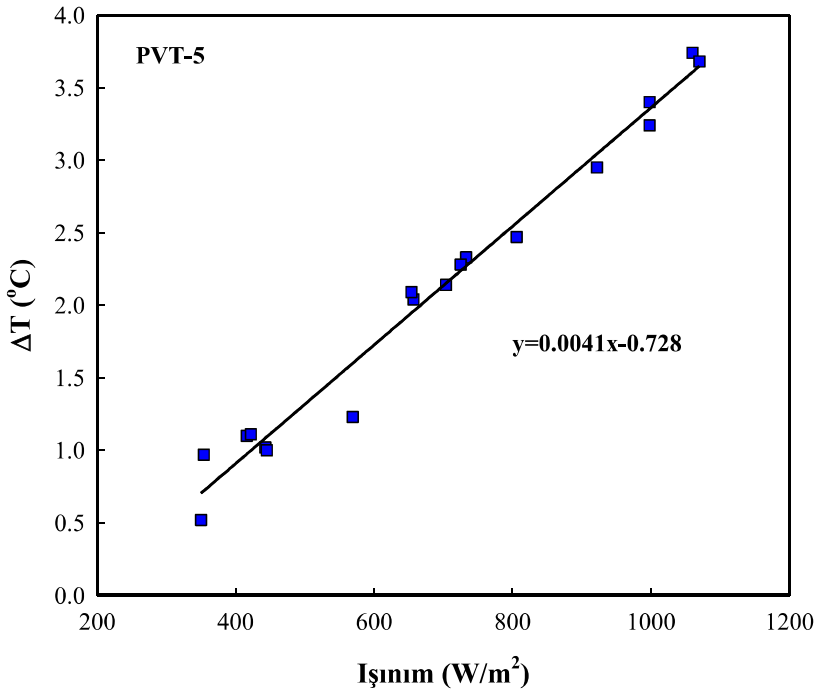
Şekil 4.35. PVT-2 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi.



Şekil 4.36. PVT-3 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi.



Şekil 4.37. PVT-4 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi.

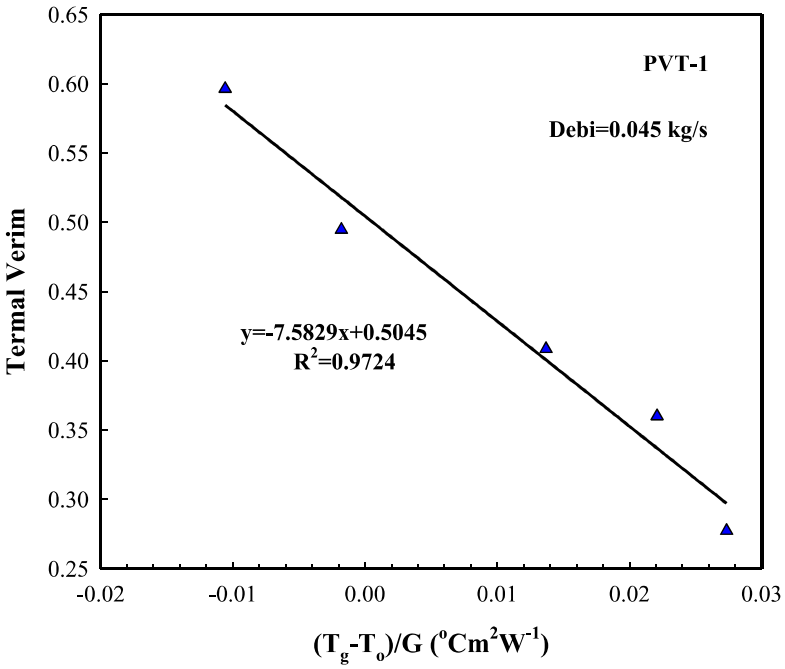


Şekil 4.38. PVT-5 modülünün su giriş-çıkış sıcaklık farkı değerlerinin ışınıma göre değişimi.

Temmuz ayında, 1050 W/m^2, 1060 W/m^2, 1044 W/m^2, 1032 W/m^2 ve 1042 W/m^2 ışınım değerinde (ortalaması 1045.6 W/m^2), iki farklı debi (0.045 kg/s ve 0.07 kg/s) ve farklı su giriş sıcaklıkları için tüm PV/T modüllerin, Denklem (2.18) yardımı ile, termal verim değerleri hesaplanmıştır. 0.045 kg/s ve 0.07 kg/s debi değerleri için elde edilen sonuçlar sırasıyla, PVT-1 modülü için, Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11'de; PVT-2 modülü için, Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13'de; PVT-3 modülü için, Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'de; PVT-4 modülü için, Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17'de; PVT-5 modülü için, Çizelge 4.18 ve Çizelge 4.19'da verilmektedir. Ayrıca Denklem (2.19)'dan PV/T modüllerin çalışma noktası parametresi hesaplanmış ve termal verimliliklerinin çalışma noktası parametresine göre değişim grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler, 0.045 kg/s ve 0.07 kg/s debi değerleri için ayrı ayrı çizilmiş ve sırasıyla, PVT-1 modülü için, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da; PVT-2 modülü için, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de; PVT-3 modülü için, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'de; PVT-4 modülü için, Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da; PVT-5 modülü için, Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de sunulmuştur. Grafikler üzerinde, değişimin uyduğu lineer denklemle ilgili bilgiler de verilmiştir.

Çizelge 4.10. 0.045 kg/s debide PVT-1 modülü için ısıl verim değerleri.

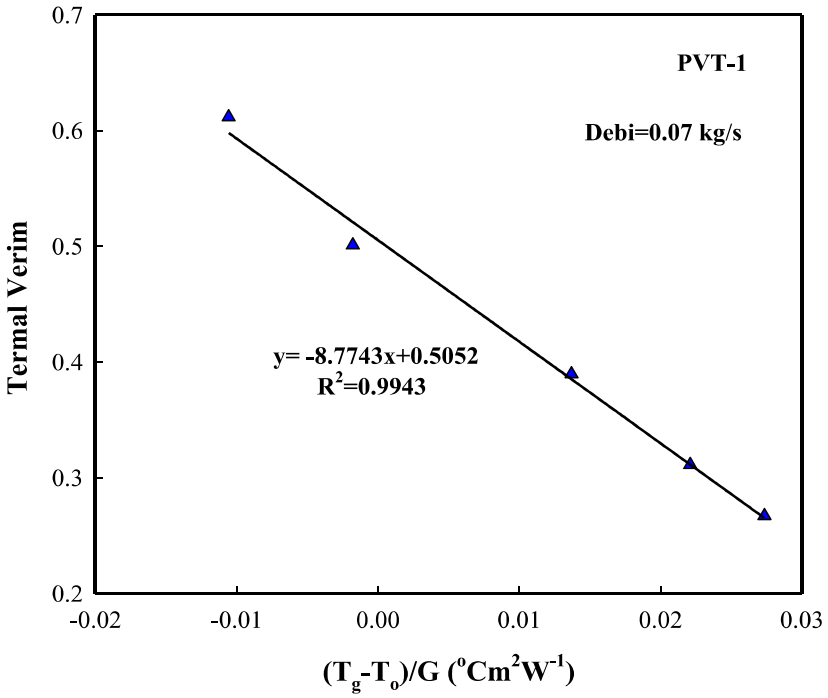
T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg. °C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	24,55	4175	0,045	854,831	1,365	4,55	1050	0,596	-0,010570
31,90	30	33,81	4175	0,045	715,804	1,365	3,81	1060	0,495	-0,001790
30,70	45	48,10	4175	0,045	582,413	1,365	3,10	1044	0,409	0,013697
32,21	55	57,70	4175	0,045	507,263	1,365	2,70	1032	0,36	0,022083
31,50	60	62,10	4175	0,045	394,538	1,365	2,10	1042	0,277	0,027351



Şekil 4.39. 0.045 kg/s debide PVT-1 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizelge 4.11. 0.07 kg/s debide PVT-1 modülü için ısıl verim değerleri.

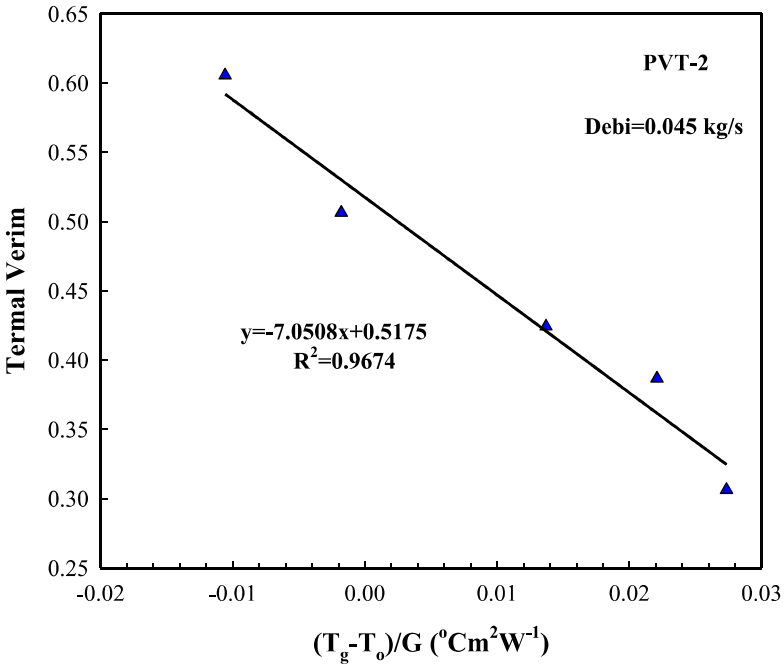
T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg.°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	23,00	4175	0,07	876,750	1,365	3,00	1050	0,612	-0,010570
31,90	30	32,48	4175	0,07	724,780	1,365	2,48	1060	0,501	-0,001790
30,70	45	46,90	4175	0,07	555,275	1,365	1,90	1044	0,390	0,013697
32,21	55	56,50	4175	0,07	438,375	1,365	1,50	1032	0,311	0,022083
31,50	60	61,30	4175	0,07	379,925	1,365	1,30	1042	0,267	0,027351



Şekil 4.40. 0.07 kg/s debide PVT-1 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizelge 4.12. 0.045 kg/s debide PVT-2 modülü için ısıl verim değerleri.

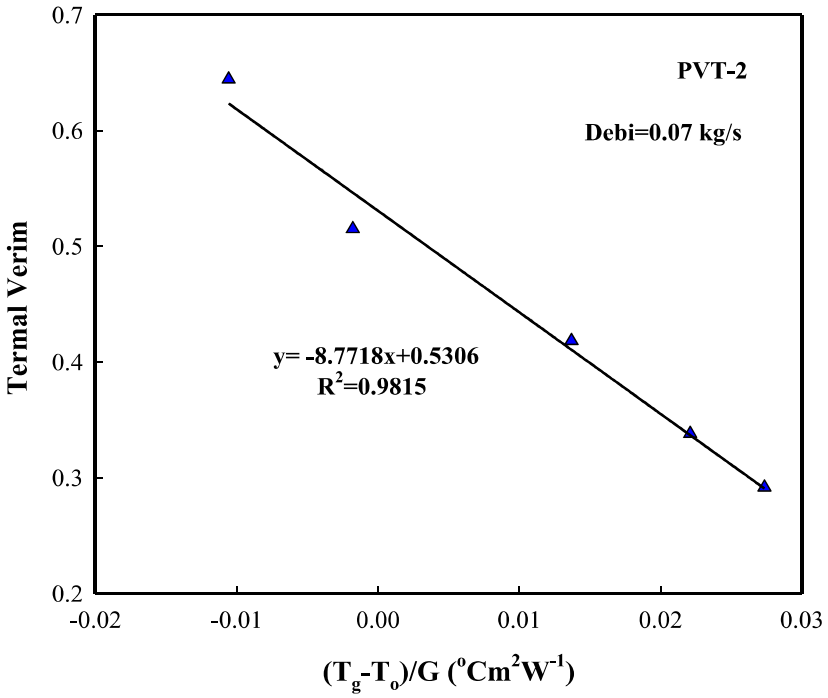
T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg.°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	24,62	4175	0,045	867,983	1,365	4,62	1050	0,606	-0,010570
31,90	30	33,90	4175	0,045	732,713	1,365	3,90	1060	0,506	-0,001790
30,70	45	48,22	4175	0,045	604,958	1,365	3,22	1044	0,425	0,013697
32,21	55	57,90	4175	0,045	544,838	1,365	2,90	1032	0,387	0,022083
31,50	60	62,32	4175	0,045	435,870	1,365	2,32	1042	0,306	0,027351



Şekil 4.41. 0.045 kg/s debide PVT-2 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizelge 4.13. 0.07 kg/s debide PVT-2 modülü için ısıl verim değerleri.

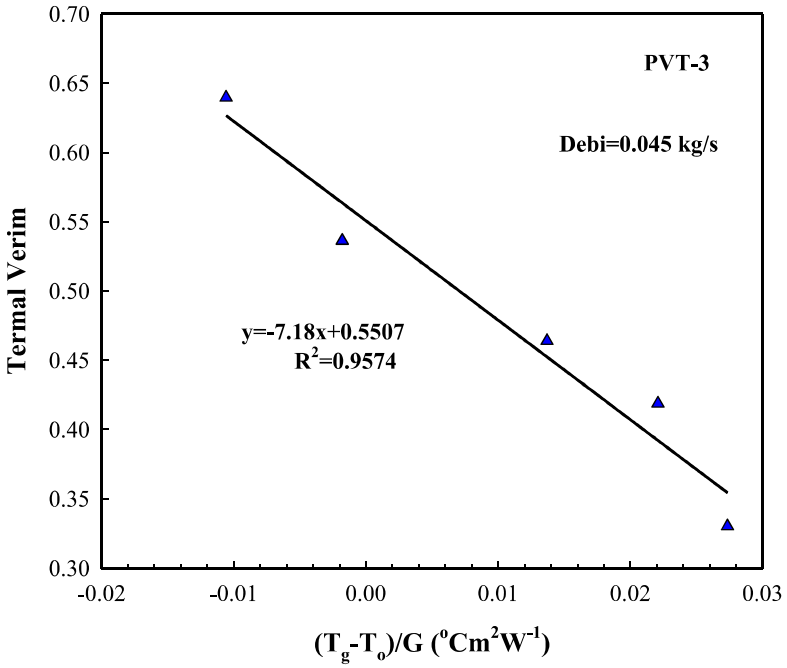
T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg.°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	23,16	4175	0,07	923,510	1,365	3,16	1050	0,644	-0,010570
31,90	30	32,55	4175	0,07	745,237	1,365	2,55	1060	0,515	-0,001790
30,70	45	47,04	4175	0,07	596,190	1,365	2,04	1044	0,418	0,013697
32,21	55	56,63	4175	0,07	476,368	1,365	1,63	1032	0,338	0,022083
31,50	60	61,42	4175	0,07	414,995	1,365	1,42	1042	0,292	0,027351



Şekil 4.42. 0.07 kg/s debide PVT-2 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizelge 4.14. 0.045 kg/s debide PVT-3 modülü için ısıl verim değerleri.

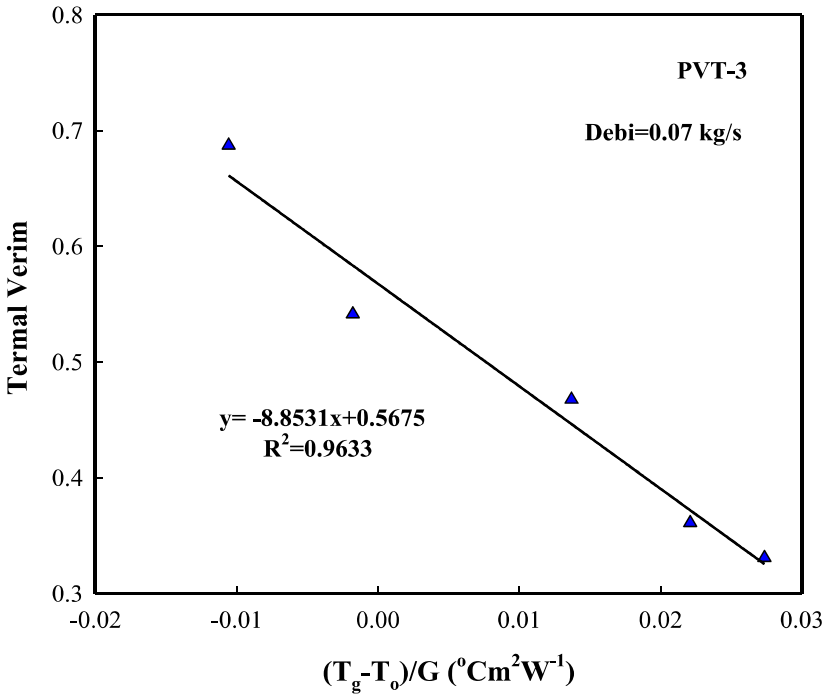
T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg.°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	24,88	4175	0,045	916,83	1,365	4,88	1050	0,640	-0,010570
31,90	30	34,13	4175	0,045	775,924	1,365	4,13	1060	0,536	-0,001790
30,70	45	48,52	4175	0,045	661,320	1,365	3,52	1044	0,464	0,013697
32,21	55	58,14	4175	0,045	589,928	1,365	3,14	1032	0,419	0,022083
31,50	60	62,50	4175	0,045	469,688	1,365	2,50	1042	0,330	0,027351



Şekil 4.43. 0.045 kg/s debide PVT-3 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizelge 4.15. 0.07 kg/s debide PVT-3 modülü için ısıl verim değerleri.

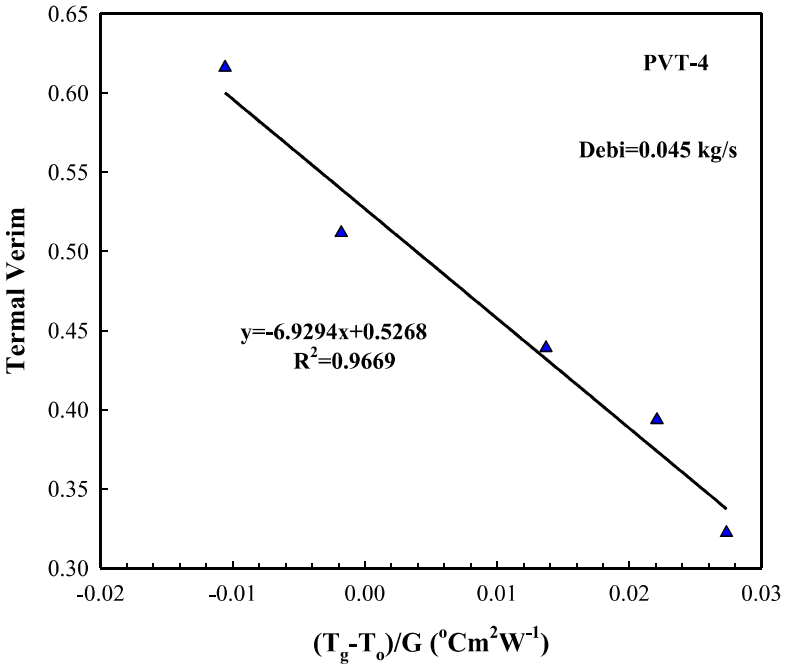
T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg.°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	23,37	4175	0,07	984,883	1,365	3,37	1050	0,687	-0,010570
31,90	30	32,68	4175	0,07	783,230	1,365	2,68	1060	0,541	-0,001790
30,70	45	47,28	4175	0,07	666,330	1,365	2,28	1044	0,468	0,013697
32,21	55	56,74	4175	0,07	508,515	1,365	1,74	1032	0,361	0,022083
31,50	60	61,61	4175	0,07	470,523	1,365	1,61	1042	0,331	0,027351



Şekil 4.44. 0.07 kg/s debide PVT-3 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizelge 4.16. 0.045 kg/s debide PVT-4 modülü için ısıl verim değerleri.

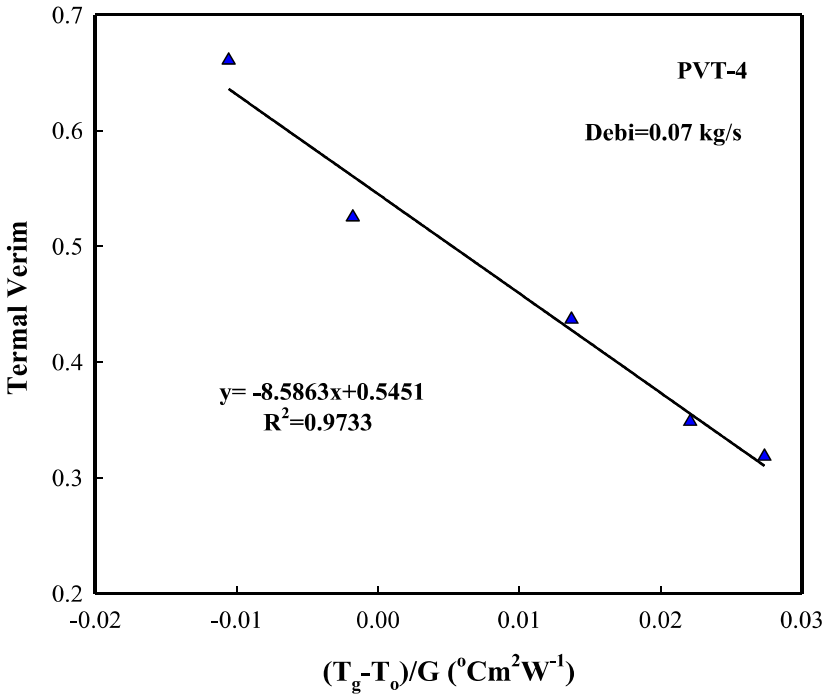
T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg.°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	24,70	4175	0,045	883,013	1,365	4,70	1050	0,616	-0,010570
31,90	30	33,94	4175	0,045	740,228	1,365	3,94	1060	0,512	-0,001790
30,70	45	48,33	4175	0,045	625,624	1,365	3,33	1044	0,439	0,013697
32,21	55	57,95	4175	0,045	554,231	1,365	2,95	1032	0,393	0,022083
31,50	60	62,44	4175	0,045	458,415	1,365	2,44	1042	0,322	0,027351



Şekil 4.45. 0.045 kg/s debide PVT-4 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizelge 4.17. 0.07 kg/s debide PVT-4 modülü için ısıl verim değerleri.

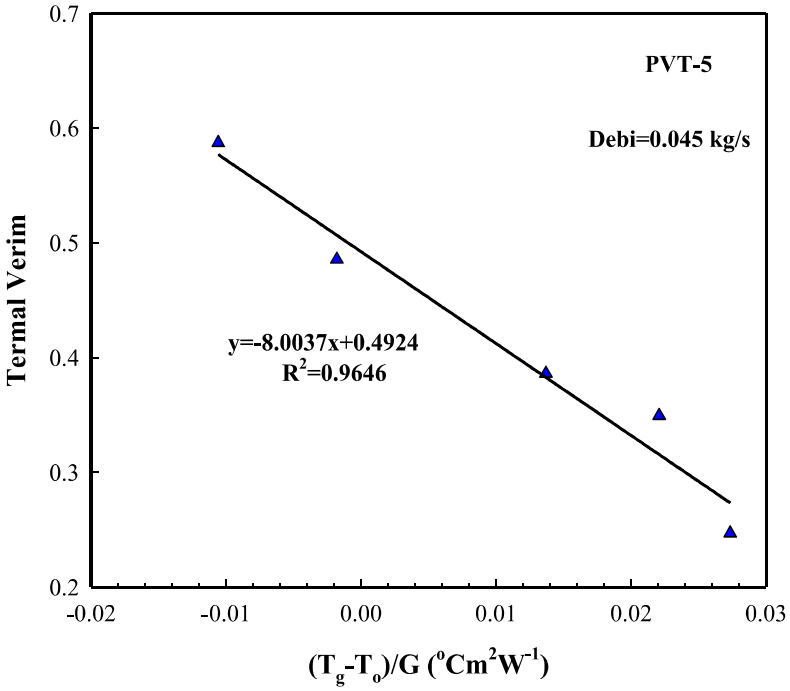
T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg.°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	23,24	4175	0,07	946,890	1,365	3,24	1050	0,661	-0,010570
31,90	30	32,60	4175	0,07	759,850	1,365	2,60	1060	0,525	-0,001790
30,70	45	47,13	4175	0,07	622,493	1,365	2,13	1044	0,437	0,013697
32,21	55	56,68	4175	0,07	490,98	1,365	1,68	1032	0,349	0,022083
31,50	60	61,55	4175	0,07	452,987	1,365	1,55	1042	0,318	0,027351



Şekil 4.46. 0.07 kg/s debide PVT-4 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizelge 4.18. 0.045 kg/s debide PVT-5 modülü için ısıl verim değerleri.

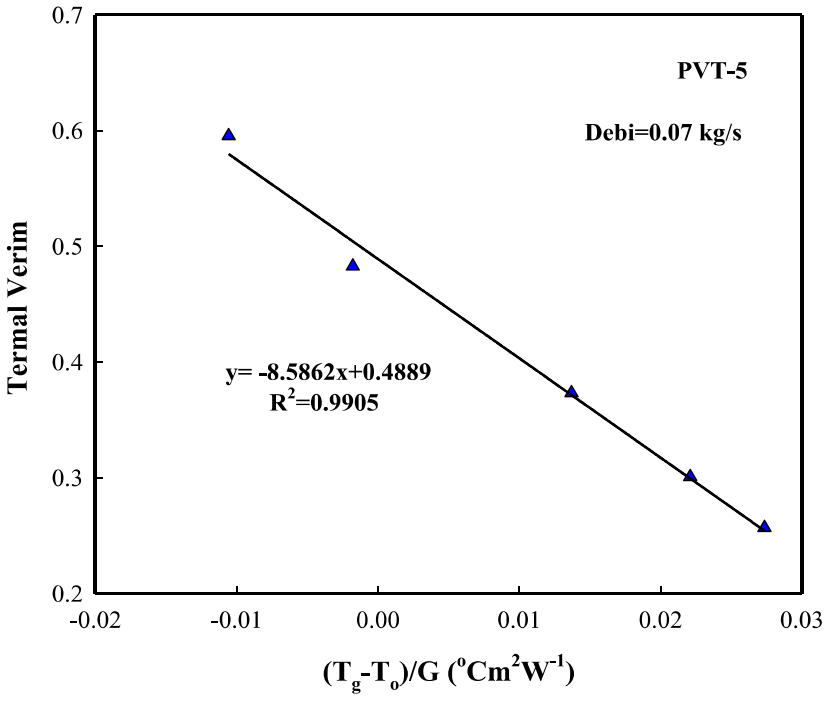
T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg.°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	24,48	4175	0,045	841,680	1,365	4,48	1050	0,587	-0,010570
31,90	30	33,74	4175	0,045	702,653	1,365	3,74	1060	0,486	-0,001790
30,70	45	47,93	4175	0,045	550,474	1,365	2,93	1044	0,386	0,013697
32,21	55	57,62	4175	0,045	492,233	1,365	2,62	1032	0,349	0,022083
31,50	60	61,87	4175	0,045	351,326	1,365	1,87	1042	0,247	0,027351



Şekil 4.47. 0.045 kg/s debide PVT-5 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizelge 4.19. 0.07 kg/s debide PVT-5 modülü için ısıl verim değerleri.

T_o (°C)	T_g (°C)	$T_ç$ (°C)	C_p (W.sn/ kg.°C)	Kütlesel Debi (kg/s)	Q (W)	Modül Alanı (m^2)	Sıcaklık Farkı (°C)	Işınım (W/m^2)	Isıl Verim	$(T_g-T_o)/G$ ($°Cm^2W^{-1}$)
31,10	20	22,92	4175	0,07	853,370	1,365	2,92	1050	0,595	-0,010570
31,90	30	32,39	4175	0,07	698,478	1,365	2,39	1060	0,483	-0,001790
30,70	45	46,82	4175	0,07	531,895	1,365	1,82	1044	0,373	0,013697
32,21	55	56,45	4175	0,07	423,763	1,365	1,45	1032	0,301	0,022083
31,50	60	61,25	4175	0,07	365,313	1,365	1,25	1042	0,257	0,027351



Şekil 4.48. 0.07 kg/s debide PVT-5 modülünün termal veriminin çalışma parametresine göre değişimi.

Çizilen termal verim-çalışma noktası parametresi grafiklerinin tümü lineer bir değişim göstermektedir. Bu doğrunun uyduğu lineer fonksiyona PV/T modülün verim denklemi adı verilir. Bu denklemlerden modülün, farklı su giriş sıcaklıkları, farklı ortam sıcaklıkları ve farklı ışınım değerleri için verimini hesaplamak mümkündür. Tüm PV/T modüller için iki farklı debide çizilen termal verimin çalışma noktası parametresine göre değişim grafiklerinden belirlenen verim denklemleri Çizelge 4.20'de verilmiştir. Elde edilen denklemlerde bulunan ilk terim PV/T modüllerin termal verimini, ikinci terim ise çalışma koşullarındaki sıcaklıklara bağlı kaybı temsil etmektedir.

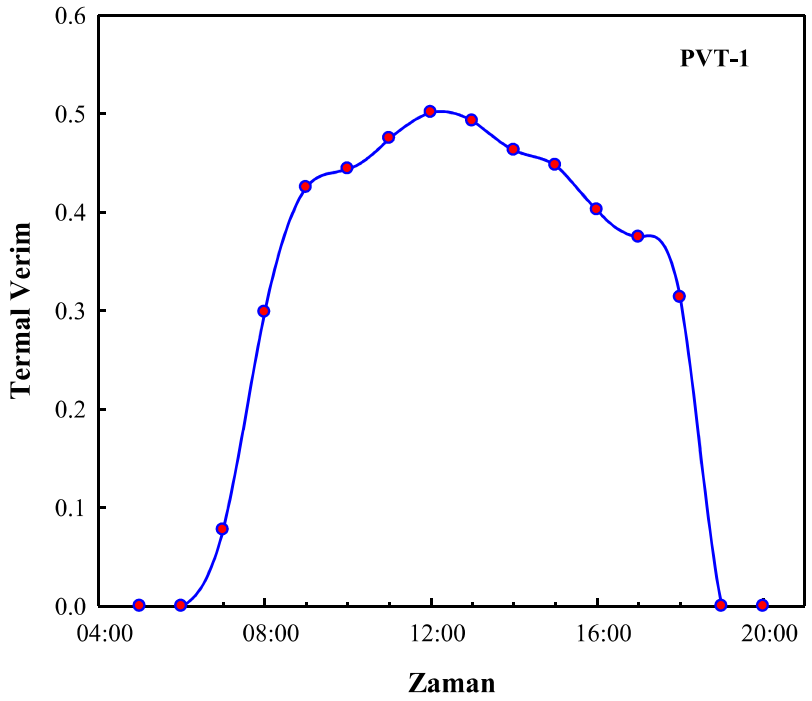
Sonuçlara göre en yüksek termal verim % 56.7 ile PVT-3 den, 0.07 kg/s debi değerinde elde edilmiştir. Ancak sıcaklığa bağlı kayıplar dikkate alındığında 0,07 kg/s debi değerindeki kayıp, 0.045 kg/s debi değerine göre daha fazladır. Buradan, PV/T modüllerde debi artışının verimi arttırdığı ancak sıcaklığa bağlı kayıpların da artmasına sebebiyet verdiği görülmektedir. En düşük verim % 49.2 ile PVT-5 modülünden elde edilmiştir. Modüllerin sıcaklığa bağlı ortalama verim kayıpları, 0.7 kg/s debi değerinde % 6.5 ve 0.045 kg/s debi değerinde % 5.4 olmuştur. PV/T modüllerin 0.045 kg/s debi değerindeki giriş-çıkış su sıcaklık farkları, 0.07 kg/s debi değerindeki sıcaklık farklarından daha yüksek olarak bulunmuştur. Bu sonuçtan akışkanın kütlesel debisinin artmasının giriş-çıkış su sıcaklık farkını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.20. PV/T modüllerin termal enerji verimliliği için bulunan denklemler. (Burada $\Delta T^*=T_g-T_o$ ve niceliklerin birimi SI birim sistemindedir)

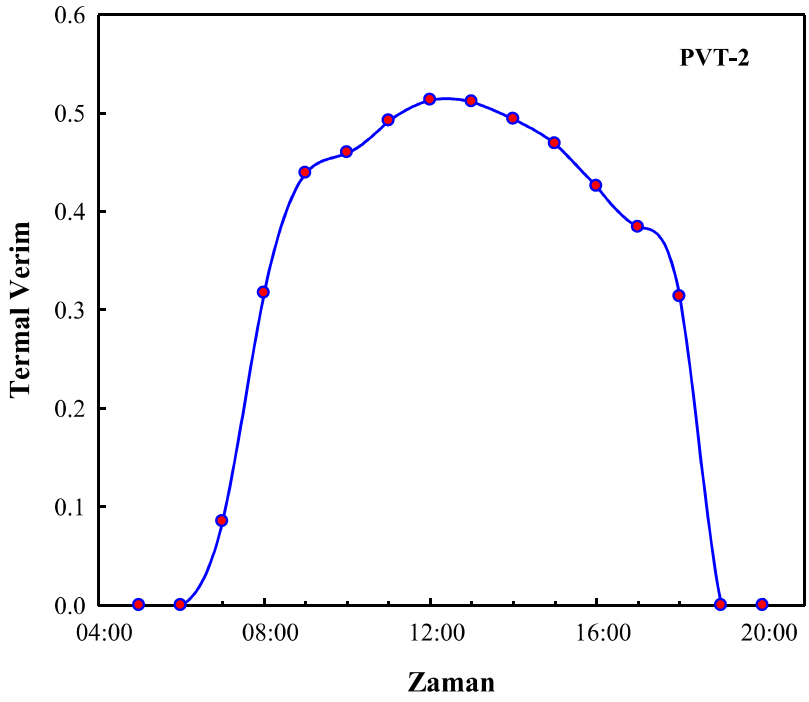
Numune Adı	Termal Enerji Verim Denklemleri	
	Debi = 0.045 kg/s	Debi = 0.07 kg/s
PVT-1	0,504-7,58 $\Delta T^*/G$	0,505-8,77 $\Delta T^*/G$
PVT-2	0,517-7,05 $\Delta T^*/G$	0,530-8,77 $\Delta T^*/G$
PVT-3	0,550-7,18 $\Delta T^*/G$	0,567-8,85 $\Delta T^*/G$
PVT-4	0,526-6,93 $\Delta T^*/G$	0,545-8,58 $\Delta T^*/G$
PVT-5	0,492-8,00 $\Delta T^*/G$	0,488-8,58 $\Delta T^*/G$

Temmuz ayında gün boyunca birer saatlik aralıkla yapılan ölçüm sonuçları kullanılarak, her bir PV/T modül için termal verim değerleri hesaplanmış ve her bir zamana ait aylık ortalamaları belirlenmiştir. Belirlenen Temmuz ayı ortalama termal verim değerlerinin zamana bağlı olarak değişim grafikleri sırası ile, PVT-1 için Şekil 4.49'da, PVT-2 için Şekil 4.50'de, PVT-3 için Şekil 4.51'de, PVT-4 için Şekil 4.52'de ve PVT-5 için Şekil 4.53'de verilmektedir. Maksimum termal verim değerleri ise, PVT-1 için % 50.1, PVT-2 için % 51.3, PVT-3 için % 54.3, PVT-4 için % 51.8 ve PVT-5 için % 49.2 bulunmuştur.

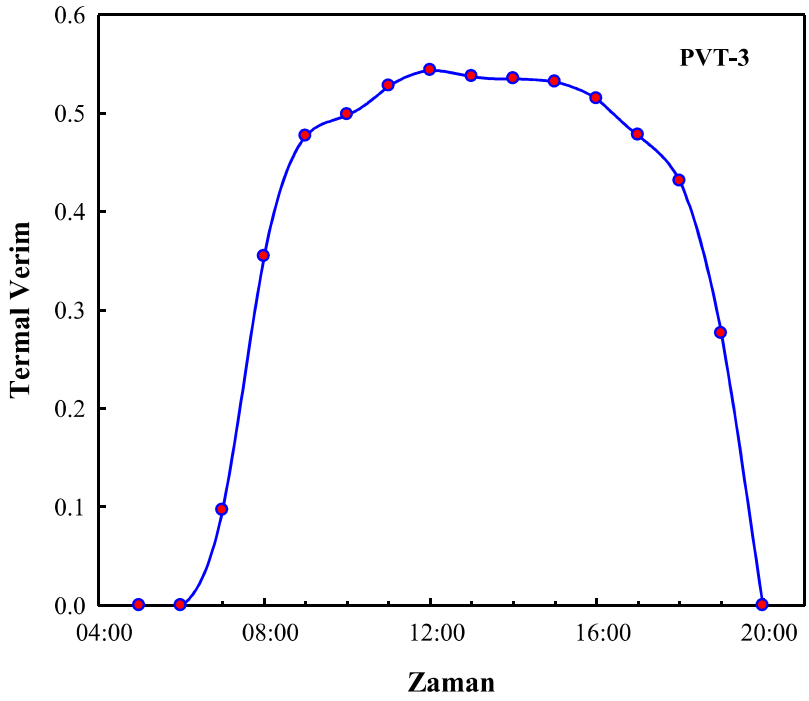
Şekil 4.49, Şekil 4.50, Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'de görüldüğü üzere sabahın ilk saatleri ile akşam saatlerinde ışınım değerlerinin düşük olmasından dolayı verim değerleri düşük çıkmaktadır. Ancak, saat 08:00 ile saat 18:00 arası ışınım değerleri daha stabil olduğu için verim değerleri daha belirleyicidir. Öğle saatlerinde ise termal verim, ışınımın günün en yüksek değerlerinde olması sebebi ile, maksimum değerlerdedir.



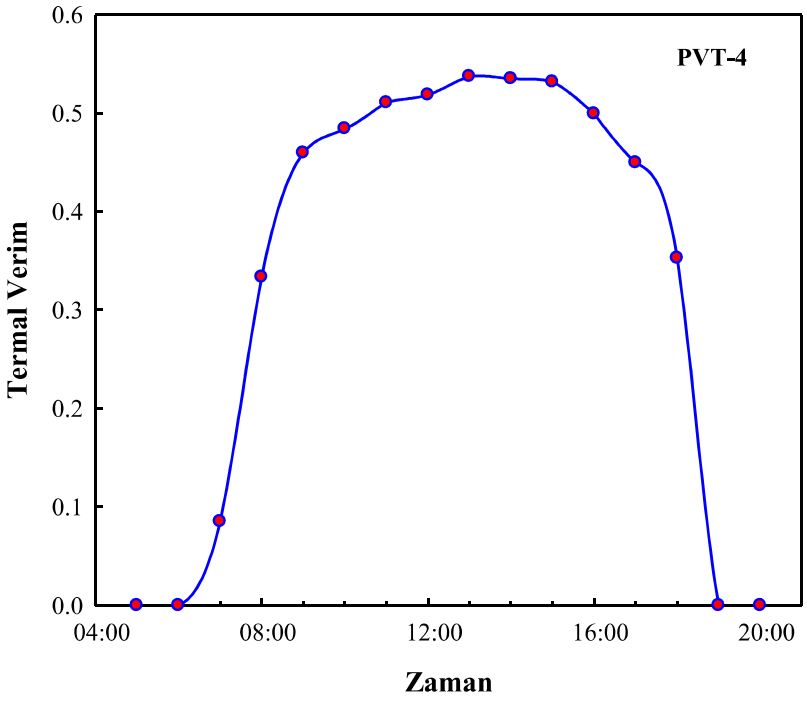
Şekil 4.49. PVT-1 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi.



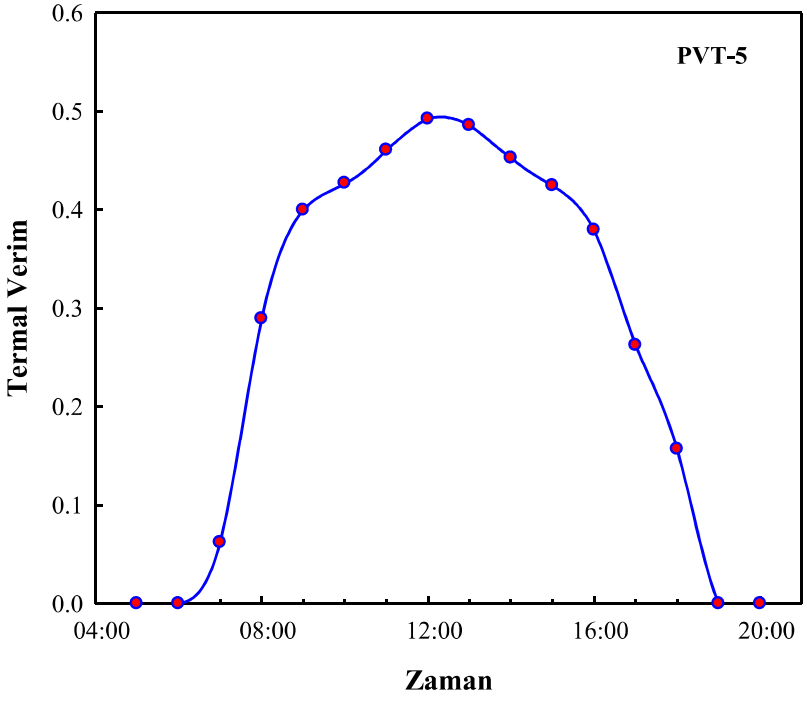
Şekil 4.50. PVT-2 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi.



Şekil 4.51. PVT-3 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi.



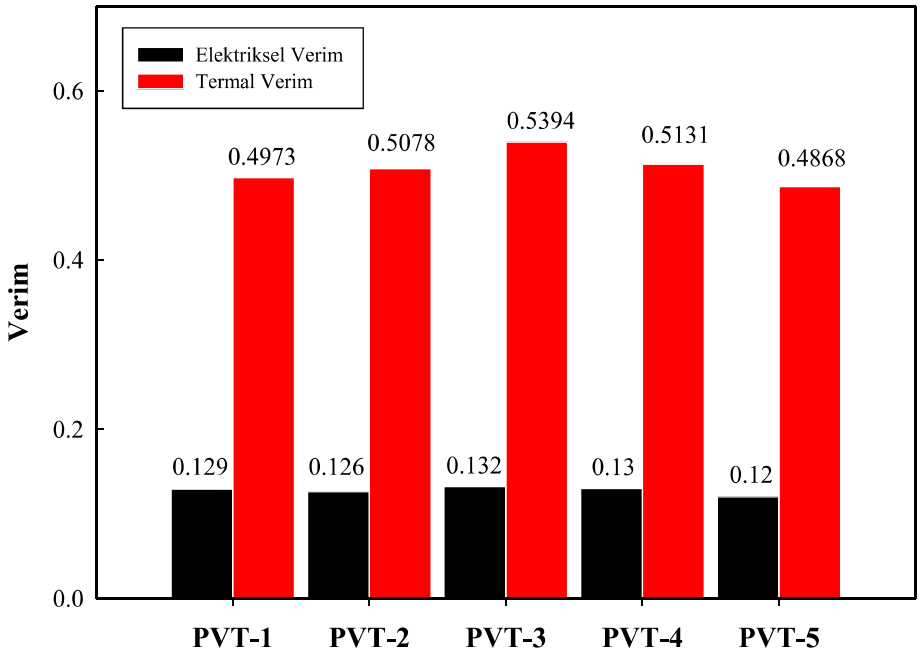
Şekil 4.52. PVT-4 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi.



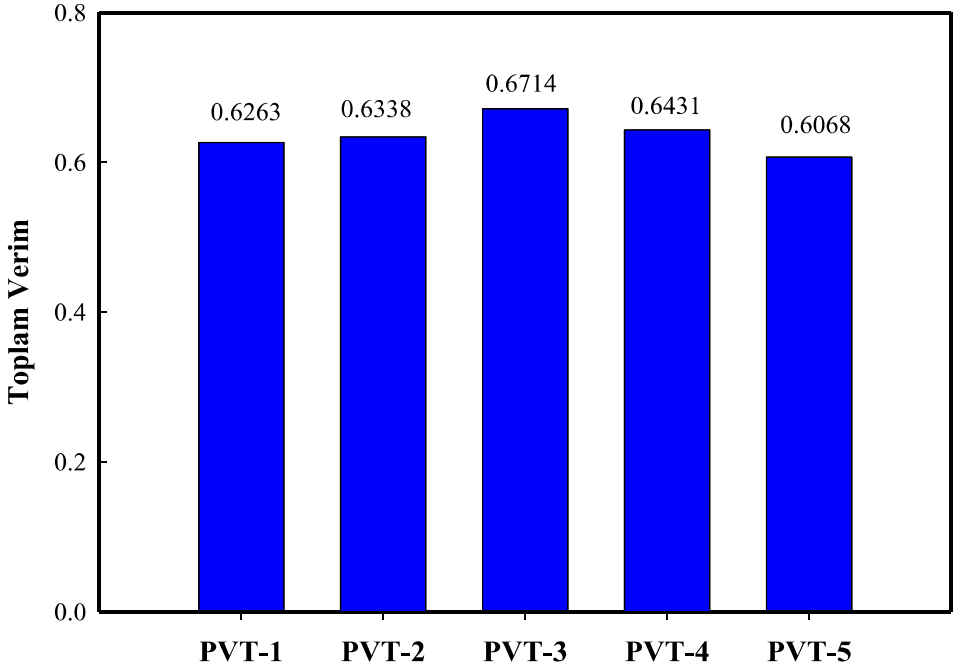
Şekil 4.53. PVT-5 modülü için Temmuz ayı ortalama termal verim değişimi.

Chow et al. (2007), Tripanagnostopoulos et al. (2005), yapmış oldukları çalışmalarda PV/T modülün termal verimlerini % 38 ile % 48 arasında bulmuşlardır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada ise termal verim, debi değerine bağlı olarak % 49-56 arasında bulunmuştur. Bu sonuçlar hem literatürde yapılan çalışmaları destekler niteliktedir, hem de fotovoltaik hücrelerin soğurucu tabaka ile birlikte lamine edilmesinin verimi arttırdığını göstermiştir.

Tüm PV/T modüller için bulunan, hem termal hem de elektriksel maksimum verim değerleri Şekil 4.54'de, maksimum toplam verim değerleri ise Şekil 4.55'de verilmiştir. Şekil 4.54'den görüldüğü üzere maksimum elektriksel verim değerleri % 12 ile % 13.2 aralığındadır. Bunun yanında sistemin maksimum termal verimleri ise % 48 ile % 54 civarında olup elektriksel verimden daha yüksektir. Şekil 5.54'den de görülebileceği gibi ısıl verim, elektriksel verime nazaran daha fazla dalgalanma göstermektedir. Bu dalgalanmanın sebebi, ısıl verimin sadece ışınıma bağlı olmayıp bununla beraber ortam sıcaklığına, çevreye olan ısı kayıplarına ve diğer meteorolojik parametrelere bağlı olmasındandır. Bu faktörlere bağlı olarak sistemin ısıl verimliliği değişkenlik göstermektedir.



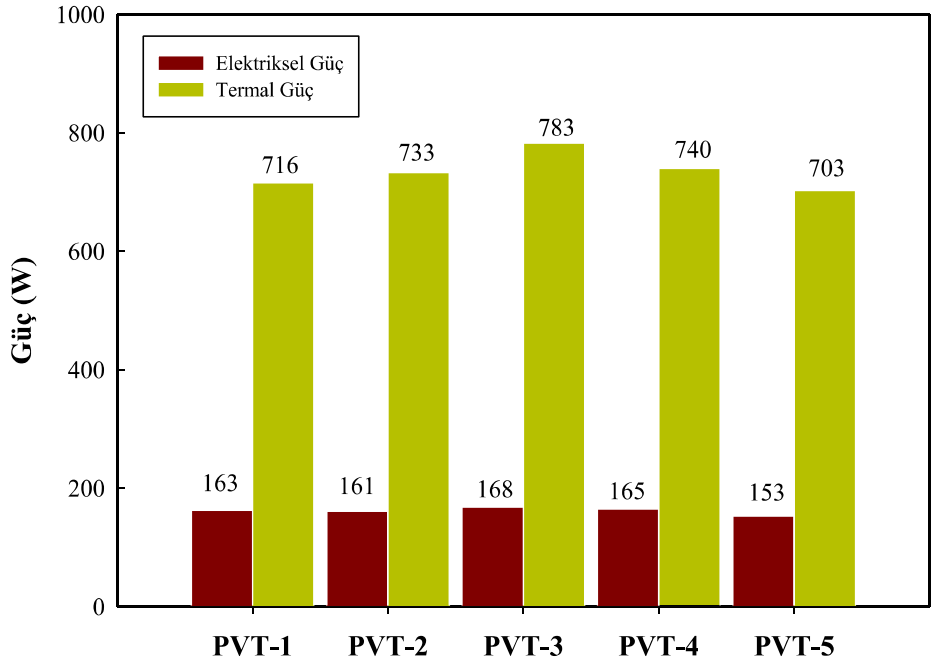
Şekil 4.54. PV/T modüller için maksimum elektriksel ve termal verimler.



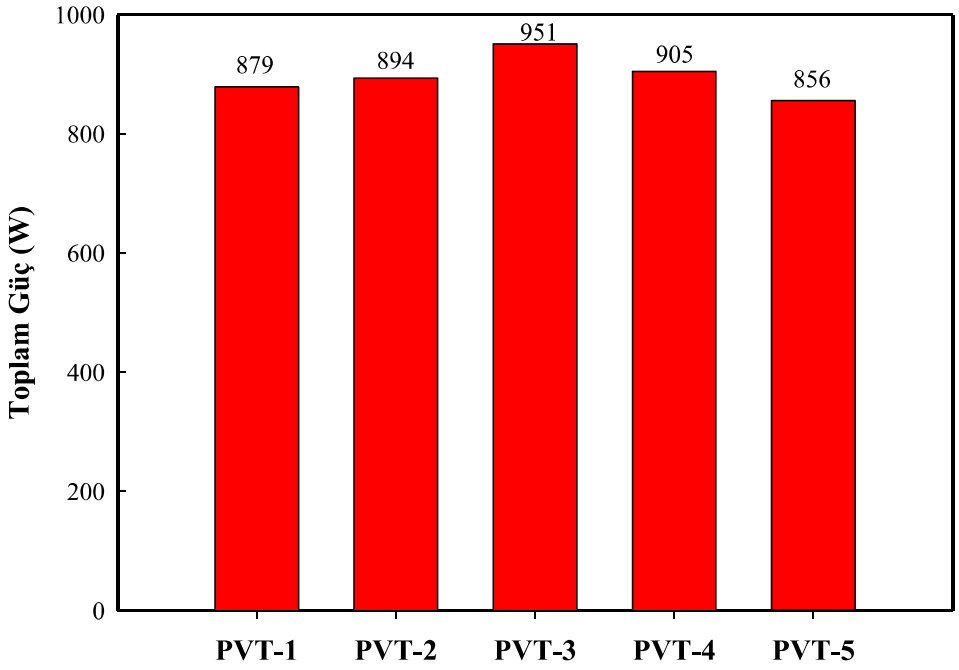
Şekil 4.55. PV/T modüller için toplam maksimum verimler.

Toplam verim yönüyle karşılaştırıldığında, PVT-1 modülünden maksimum % 62.63, PVT-2 modülünden maksimum % 63.38, PVT-3 modülünden maksimum % 67.14, PVT-4 modülünden maksimum % 64.31 ve PVT-5 modülünden maksimum % 60.68 verim elde edilmiştir. Bu sonuçlardan da görülebileceği üzere PVT-3 modülünün verimi, diğer PV/T modüllere nazaran daha yüksektir.

PV/T modüllerin anlık maksimum elektrik ve termal güç değerleri Şekil 4.56'da, toplam (elektrik+termal) maksimum güç değerleri de Şekil 4.57'de verilmektedir. Maksimum termal enerji dönüşüm değerleri 703 W ile 783 W arasında, elektriksel enerji dönüşüm değerleri ise 153 W ile 168 W arasındadır. Toplam maksimum güç değerleri ise 856 W ile 951 W arasında olup en fazla dönüşüm PVT-3 modülünden elde edilmiştir.



Şekil 4.56. PV/T modüller için maksimum elektriksel ve termal güç değerleri.



Şekil 4.57. PV/T modüller için toplam maksimum güç değerleri.

PVT-3 modülünün diğerlerine kıyasla daha verimli olmasının temel nedeninin absorber soğurucuda 12 adet absorber boru kullanılmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. PVT-3'te her bir PV hücrenin alt kısmından homojen şekilde 2'şer adet absorber boru geçmektedir. Bu da boruların metal absorber yüzeye olan temasını, dolayısıyla ısı transferini artırmıştır. Absorber boru çaplarının 8 mm olarak seçilmiş olması da ısı transfer hızını artırmıştır. 18 mm çapındaki taşıyıcı boruya eklenmiş 12.7 mm çapındaki ilave taşıyıcı boru sayesinde absorber boru boylarının daha uzun olması sağlanmıştır. Böylece, en üst ve alt sıradaki hücrelerin absorber borulara olan temasının en iyi şekilde olması sağlanmıştır. Ayrıca, H tipi abserber üretiminin serpantin tipi absorber üretimine göre daha kolay olduğu bilinmektedir. Üretim kolaylığı açısından da bir kıyaslama yapıldığında, PVT-3 modülünün kolay üretimi yönüyle de avantajlı olduğu düşünülmektedir.

PVT-4 kolektörde kullanılan absorber tasarımı serpantin şekilde olduğundan hücrelerden geçen boru sayısı PVT-3'e kıyasla daha az homojendir. Ayrıca, absorber borularının, PV kısmının en alt ve en üst sıralarındaki hücrelere teması daha azdır. Serpantin yapıdan dolayı hücrelerin eş zamanlı ve yakın değerlerde soğutulması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, bazı hücrelerin sıcaklıklarındaki azalmanın daha az olduğu ve bu etkinin PV/T modülün verimliliğini azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca, PVT-4'ün PVT-3'e kıyasla daha az verimli olmasının nedeninin, taşıyıcı borular arasındaki merkez mesafelerinden de anlaşılacağı üzere, absorber soğurucu tabakaya olan temasının daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

PVT-2 modülde ise serpantin tipli absorber soğurucu kullanılmıştır. PVT-4'e kıyasla daha az verimli çıkmasının sebebinin alt ve üst hücrelere yakın boruların soğurucu tabakaya temas etmiyor oluşundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Taşıyıcı boruların merkez mesafelerindeki düşüklükten de bu görülebilmektedir. Serpantin tipli soğurucu tasarımı kullanılan PVT-2, PVT-4 ve PVT-5'te 10 mm çapında absorber boru ve 22 mm çapında taşıyıcı boruların kullanılmış olması ısı transfer hızını da azaltmaktadır.

PVT-1 modül, içerisinde H tipi absorber soğurucu kullanılmasına rağmen hazırlanan numuneler arasında verimlilik açısından değerlendirildiğinde 4. sırada yer almaktadır. PV/T modüldeki absorber boru sayısının 6 adet gibi az sayıda olmasının bu sonucu ortaya çıkardığı düşünülmektedir. Her ne kadar absorber

boruların 12.7 mm çapındaki ikincil bir taşıyıcı boruya bağlantılarının yapılması, PV kısmına daha uzun temas yüzeyi kazandırarak bir avantaj sağlasa da, söz konusu avantajın, her bir hücreye ancak 1 absorber boru gelmesi dezavantajından dolayı yetersiz olduğu değerlendirilmektedir. PVT-1'in, PVT-5'e kıyasla daha verimli çıkma sebebinin ise, H tipi absorber soğurucunun homojen soğutmaya imkan sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

PVT-5 modülünün diğerlerinden daha düşük verimli sonuç vermesinin en önemli nedeninin, kullanılan serpantin tipi soğurucuda diğerlerine kıyasla çok daha kısa absorber boru kullanımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, taşıyıcı borulara absorber boruların girişi, ortadan sağlandığından bazı hücrelere absorber boru teması olmamaktadır. Bu da, serpantin tipli absorber soğurucunun dezavantajını daha kötü duruma getirmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, özdeş fotovoltaik (PV) hücrelerin kullanıldığı, ancak boru çapları, boru sayıları, boru dizilimleri ve tabaka tipleri yönüyle farklı olan 5 adet PV/T modülün üretimi yapılmıştır. Üretim esnasında, termal kısım ile PV modül laminasyon tekniği kullanılarak birleştirilmiştir. Söz konusu farklı tasarıma sahip PV/T modüllerin termal ve elektriksel verimlilikleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca, özdeş PV hücreler kullanılarak 1 adet PV modül üretilmiş ve bu PV modülün dış ortam koşullarındaki performansı, PV/T modüllerin performansları ile karşılaştırılmıştır.

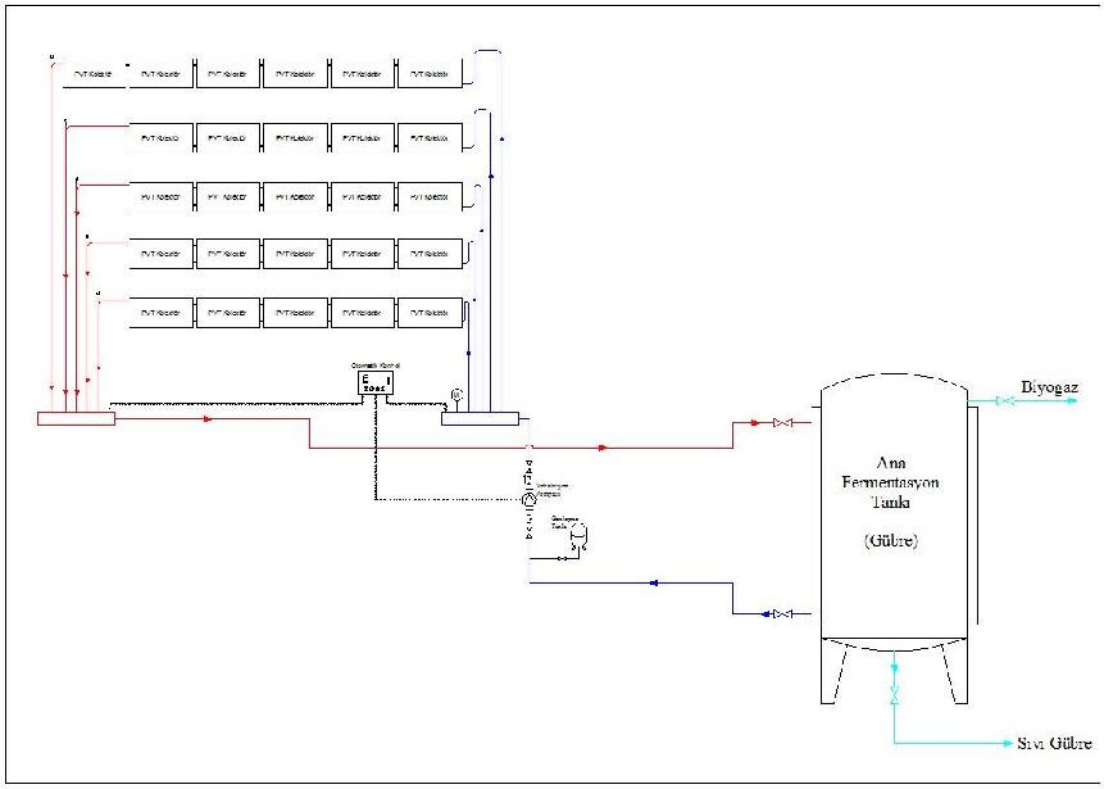
Üretimi gerçekleştirilen söz konusu 6 adet numunenin Standart Test Koşullarındaki (STC) elektriksel verimleri, % 12.56 ile %12.68 arasında bulunmuştur. Dış ortam koşullarında ise PV/T modüllerin toplam verimlilikleri (elektrik+termal) % 60.68 ile % 67.14 arasında bulunmuştur. PV/T modüller içerisinde en yüksek verim değerine sahip modül, % 67.14 toplam verim değeri ile PVT-3 olarak belirlenmiştir. En düşük verime sahip modül ise PVT-5 olmuştur.

PV/T'ler ile PV modül elektriksel verimlilikleri bakımından karşılaştırıldığında, PV modüldeki hücrelerin, PV/T'lerdeki hücrelere göre daha fazla ısınmasından dolayı, PV verimliliğinin önemli oranda azaldığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada, soğurucu tabakada kullanılan bakır şerit yerine, günümüzde termal soğuruculardа daha yaygın olarak kullanılmaya başlanılan alüminyum şeritler tercih edilebilir. Alüminyum şeritlerden üretilmiş farklı tipteki PV/T modüllerle ilgili araştırmaların da ilgi çekeceği düşünülmektedir. Alüminyumun maliyetinin bakıra göre daha düşük olması, soğurucu tabaka kalınlığının daha büyük seçilmesine imkan sağlar. Böylece, PV modül ile termal kısmın birleştirilmesinde kullanılan laminasyon işleminde PV hücrelerin zarar görmesi engellenmiş olur.

Bir biyogaz tesisinde fermentörde bulunan atığın, gaz çıkışının sağlanması için ısıtılması gerekmektedir. Genellikle gaz çıkışı için atığın 35-40 ^{0}C aralığında olması gerekmektedir. Küçük ve ısıl enerji üretimi için tasarlanan biyogaz sistemlerinde, cidarlı tank kullanılarak atığın ısıtılması bir yöntemdir. Cidarda dolaştırılan su vasıtasıyla atık ısıtılır ve gaz çıkışı sağlanmış olur. Bu tez kapsamında incelenen PV/T kolektörler ile de su ısıtılması mümkündür. PV/T kolektörlerden elde edilecek sıcak su fermantasyon tankı cidarlarında dolaştırılarak atığın 35-40 ^{0}C sıcaklık aralığında ısıtılması sağlanır. Şekil 5.1'de bu amaç için önerilen bir biyogaz sisteminin blok diyagramı verilmektedir.

PV/T kolektörlerden elde edilen sıcak su fermentasyon tankı cidarlarında sirkülasyon pompası vasıtasıyla dolaştırılmaktadır. Bu sayede güneş enerjisinden elde edilen suyun ısısı tank cidarından atığa aktarılmaktadır. Ayrıca PV/T kolektörlerden elde edilen elektrik sayesinde tesisatta kullanılan ekipmanların (pompalar, otomatik kontrol vb.) elektrik enerjileri de bu yolla karşılanabilmektedir.



Şekil 5.1. PV/T modüllerin kullanıldığı bir biyogaz sisteminin blok diyagramı.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Aste, N., Leonforte, F. and Pero C. D., 2015, Design, modeling and performance monitoring of a photovoltaic–thermal (PVT) water collector, *Solar Energy* 112:85-99 pp.

Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P. and Rehman, S., 2013, rformance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions, *Energy*, 59: 445-453 pp.

Bhattacharya P., 1994. Semiconductor Optoelectronic Devices, Prentice Hall, New Jersey, 535 p.

Boer, K. W. and Tamm, G., 2003, Solar conversion under consideration of energy and entropy, *Solar Energy*, 74:525-532 pp.

Bucher, E., 1986. Photovoltaic Power, Physcis Technology 17, Printed in Great Britain, London, 152 p.

Carlson, D. E., 2003, Monolithic amorphous silicon alloy solar modules, *Solar Energy Material & Solar cells,* 78:627-645 pp.

Ceylan, İ., Gürel, A. E., Demircan, H. and Aksu, B., 20014, Cooling of photovoltaic module with temperature controlled solar collector, *Energy and Buildings,* 72:96-101 pp.

Chandrasekar, M., Suresh, S., Senthilkumar, T. and Ganesh, M., 2013, Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures, *Energy Conversion and Management,* 71: 43-50 pp.

Charalambous, P. G., Maidment, G. G., Kalogirou, S. A. and Yiakoumetti, K., 2007, Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review, *Applied Thermal Engineering,* 27:275-286 pp.

Charalambous, P. G., Kalogirou, S. A., Maidment, G. G. and Yiakoumetti, K., 2011, Optimization of the photovoltaic thermal (PV/T) collector absorber, *Solar Energy*, 85:871-880 pp.

Chow, T. T., He, W. and Ji, J., 2007, An experimental study of facade-integrated photovoltaic/water-heating system, *Applied Thermal Engineering,* 27:37-45 pp.

Chow, T., Chan, A., Fong, K., Lin, Z., He, W. and Ji, J., 2009, Annual performance of building integrated photovoltaic/water heating system for warm climate application, *Applied Energy*, 86:689-696 pp.

Chow, T. T., 2010, A rewiew on photovoltaic/thermal hybrid solar thecnology, *Applied Energy*, 87:365-379 pp.

Coventry, S. J., 2005, Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy*, 78:211-222 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Decher R., 1997, Direct Energy Conversion: Fundamentals of Electric Power Production, Oxford University Press, Oxford, 258 p.

Duffie J. A. and Beckman W., A., 1991, Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, New York, 919 p.

Duffie, J. A. and Beckman, W., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons Inc., New York, 908 p.

Dupeyrat, P., Ménézo, C. and Fortuin, S., 2014, Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system, Energy and Buildings, 68:751-755 pp.

Dupeyrat, P., Ménézo, C., Wirth, H. and Rommel, M., 2011, Improvement of PV module optical properties for PV-thermal hybrid collector application, *Solar Energy Materials and Solar Cells,* 95:2028-2036 pp.

Elswijk, M. J., Jong, M. J. M., Strootman, K. J., Braakman J. N. C., Lange, E. T. N. and Smit, W. F., 2004, Photovoltaic/thermal collectors in large solar thermal system, *19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Paris, 1-6 pp.

Erdil, E., İlkan, M. and Egelioğlu, F., 2008, An experimental study on energy generation with a photovoltaic (PV)-solar thermal hybrid system, *Energy*, 33:1241-1245 pp.

Shan, F., Tang, F., Cao, L. and Fang, G., 2014, Performance evaluations and applications of photovoltaic–thermal collectors and systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33:467-483 pp.

Foukal P. V., 1990, Solar Astrophysics, John Wiley and Sons Inc., New York, 496 p.

Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M.H., Ibrahim, A. and Kazem, H.A., 2014, Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors, *Energy Conversion and Management*, 78:641-651 pp.

Garg, H. P. and Agarwal, R. K., 1995, Some aspects of a PV/T collector / forced circulation flat plate solar water heater with solar cells, *Energy Conversion and Management*, 36: 87-99 pp.

Goetzberger A. and Christopher H., 2000, Photovoltaic materials, past, present, future, *Solar Energy Materials & Solar Cells, 62*:1-19 pp.

Green, A. M., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E. D., 2015, Solar cell efficiency tables (version 46), *Progress in Photovoltaics: Res. Appl.*, 23:805-812 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hazi, A., Hazi, G., Grigore, R. and Vernica, S., 2014, Opportunity to use PVT systems for water heating in industry, *Applied Thermal Engineering*, 63:151-157 pp.

He, W., Chow, T. T., Ji, J., Lu, J. P., Pei, G. and Chan, L. S., 2006, Hybrid photovoltaic and thermal solar collector designed for natural circulation of water, *Applied Energy,* 83:199-210 pp.

He, W., Zhang, Y. and Ji, J., 2011, Comparative experiment study on photovoltaic and thermal solar system under natural circulation of water, *Applied Thermal Engineering*, 31:3369-3376 pp.

Hegazy, A. A., 2000, Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors, *Energy Convers. Mgmt.*, 41:861-881 pp.

Hendrie, S. D., 1982, Photovoltaic/thermal collector development program-final report. Report, MIT.

Hottel, H. C. and Willier, A., 1958, Evaluation of flat-plate solar collector Performance, Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy, vol. 2, University of Arizona Press, Tucson, Arizona.

Iqbal M., 1983, An introduction to Solar Radiation, Academic Press, Toronto, 390 p.

Ito, S., Miura, N. and Wang, K., 1997, Heat pump using collector with photovoltaic modules on the surface, *Solar Energy*, 65:189-196 pp.

Ji, J., Chow, T. and He, W., 2003, Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong, *Building and Environment*, 38:1327-1334 pp.

Ji, J., Lu, J. P., Chow, T. T., He, W. and Pei, G., 2007, A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation, *Applied Energy*, 84: 22-237 pp.

Kalogirou, S. A., 2001, Use of TRANSYS for modelling and simulation of a hybrid PV-thermal solar system for Cyprus, *Renewable Energy*, 23:247-260 pp.

Koçar, G., Eryaşar, A., Ersöz, Ö., Arıcı, Ş. ve Durmuş, A., 2010, Biyogaz Teknolojileri, Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir.

Koçar, G. ve Eryaşar, A., 2010, Kırsal kesime yönelik paket tip biyogaz üretim ünitesinin oluşturulması, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, Proje No:03-GEE-010, İzmir.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Koçar, G., Eryaşar, A., İllez, B., Atayol, A., 2007, Güneş enerjisi destekli biyogaz Sistemleri, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir.

Kumar, A., Baredar, P. and Qureshi, U., 2015, Historical and recent development of photovoltaic thermal (PVT) technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:1428-1436 pp.

Liang, R., Zhang, J., Ma, L. and Li, Y., 2015, Performance evaluation of new type hybrid photovoltaic/thermal solar collector by experimental study, *Applied Thermal Engineering*, 75:487-49 pp.

Mishra, U. K. and Singh, J., 2008, Semiconductor Device Physics and Design, Springer, Netherlands, 156 p.

Möller H. J., 1993, Semiconductors for Solar Cells, Artech House Inc., USA, 343 p.

Neamen D. A., 1992, Semiconductor Physics and Devices Basic Princibles, Richard D. Irwin, Inc., USA, 741 p.

Nukolić, N. and Lukić, N., 2015, Theoretical and experimental investigation of the thermal performance of a double exposure flat-plate solar collector, *Solar Energy*, 119:100-113 pp.

Pearsall, N. M. and Hill, R., 2001, Photovoltaic Modules, Systems and Applications, University of Northumbria, Newcastle, 1-42 p.

Perlin, J., 2013, Let It Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy, New World Library, CA, USA.

Prakash, J., 1994, Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water, *Energy Conversation Management*, 35:967-972 pp.

PublicLab, 2015, http://publiclab.org/ (Erişim tarihi: 27.08.2015).

Radziemska, E., 2003, Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review, *Progressing Energy Combustion Science*, 29:407-424 pp.

Ramsey W. J., 2003. Thermal Environmental Engineering, Univeristy of Minnesota, ME 5103, 1-14 pp.

Ratlamwala, T. A. H., Gadalla, M. A. and Dincer, I., 2011, Performance assessment of an integrated PV/T and triple effect cooling system for hydrogen and cooling production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36:11282-11291 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Rejeb, O., Dhaou, H. and Jemni, A., 2015, A numerical investigation of a photovoltaic thermal (PV/T) collector, *Renewable Energy,* 77:43-50 pp.

Renewable Energy policy Network for The 21ST Century (REN21), , 2015, *Renewables 2015 Global Status Report*, France.

Roberts S., 1991, Solar Electricity, Prentice Hall, New Jersey, 434 p.

Rüther R. and Klesis G., 1996, Advantages of thin Film Solar Modules in Façade, Sound Barrier and Roof-Mounted PV sytems, Eurosun'96, Freiburg.

Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H. and Behzadmehr, A., 2010, Exergetic performance assesment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Energy and Buildings*, 42:2184-2199 pp.

Sze S.M., 1981, The Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, New Jersey.

Teo, H. G., Lee, P. S. and Hawlader, M. N. A., 2012, An active cooling system for photovoltaic modules, *Applied Energy,* 90:309-315 pp.

Tiwari, G. N. and Dubey, S., 2010, Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications, RCS Publishing, Cambridge, 398 p.

Tripanagnostopoulos, Y., Souliotis, M., Battisti, R. and Corrado, A., 2005, Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13:235–250 pp.

Uyarel, Y. ve Öz, E. S., 1987, Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Birsen yayınevi, İstanbul, 239 p.

Wikipedia, 2015, http://tr.wikipedia.org/wiki/Biyogaz, (Erişim tarihi: 14 Eylül 2015)

Vokas, G., Christandonis, N. and Skittides, F., 2006, Hybrid photovoltaic/thermal systems for domestic heating and cooling-A theoretical approach, *Solar Energy*, 80:607-615 pp.

Wolf M., 1976, Performance analysies of combined heating and photovoltaic power systems for residences, *Energy Convers*, 16:79-90 pp.

Woyte A., 2003, Grid Connection of Photovoltaic Systems, Leuven University, Leuven, 48 p.

Wronski, C. R., 1996, Amorphous silicon technology: Coming of age, *Solar Energy Materials&Solar cells*, 41/42:427-439 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wu, S.Y., Zhang, Q. L., Xiao, L. and Guo, F. H., 2011, A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation, *Energy and Buildings*, 43:3558-3567 pp.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Türkiye Global Radyasyon Değerleri ve Güneşlenme süreleri, http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx (Erişim tarihi: 27.08.2015).

Zondag, H. A., De Vries, D. W., Van Helden, G. J., Van Zolingen, R. J. C. and Van Steenhoven, A. A., 2002, The thermal and electrıcal yield of a PV-thermal collector, *Solar Energy*, 72:113-128 pp.

Zondag, H.A., 2008, Thermal collectors and systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:891-959 pp.

ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Konya'da doğan Halil İbrahim DAĞ, ilk, orta ve lise öğrenimini Konya'da tamamladı. 2001 yılında Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Yüksek lisansını Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında 2009 yılında tamamladı. 2010 yılında, Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji Teknolojisi Anabilim Dalında Doktora öğrenimine başladı. 2001 ile 2003 yılları arasında 2 yıl boyunca New York-ABD'de yabancı dil eğitimi, bilgisayar eğitimi ile mikro ve makro ekonomi kursları aldı. 2002 yılında ortakları ile birlikte Solimpeks Enerji A.Ş.'yi kurdu. 2002 ile 2003 yılları arasında şirketin Amerika Satış Sorumlusu görevini yürüttü. 2004 ile 2007 yılları arasında şirketin Üretim Müdürü görevini yapmıştır. 2004 yılında İsveç'de Sunstrip Co. firmasında imalat eğitimi almıştır. 1 Ocak 2007 tarihinden itibaren kurucusu olduğu şirketin Genel Müdürlüğü görevini yapmakta olan DAĞ, aynı zamanda şirketin Yönetim Kurulu üyesidir. Nisan 2009'da Konya'da kurulan güneş enerjisi mühendislik firması olan Seiso A.Ş.'nin kurucu ortaklarındandır. Yine aynı tarihte Münih-Almanya'da faaliyetlerine başlamış olan Solimpeks Solar GmBH şirketinin kurucu ortağı ve Genel Müdürü olup, Haziran 2012'de İzmir'de kurulan Solimpeks Pazarlama Ltd. Şti'nin kurucu ortaklarındandır. Güneş Enerjisi ile ilgili çok sayıda ulusal ve uluslararası kongre, seminer, kurs ve fuara katılmıştır. Biri tamamlanmış ve biri devam eden iki adet TÜBİTAK-TEYDEB projesinin yürütücülüğünü yapmıştır. Ayrıca, bir adet uluslararası projenin yürütücülüğünü yapmış, bir adet uluslararası projede ise araştırıcı olarak görev almıştır. Makina Mühendisleri Odası Üyesi, Enerji Verimliği Derneği Konya Şubesi Yönetim Kurulu Üyesi, GÜNDER Yönetim Kurulu Üyesi olup, 2009-2013 yılları arasında Konya Sanayi Odası 13. Komite Başkanlığı görevini yürütmüştür.

Ulusal ve Uluslararası Toplantılarda Sunulan Bildiriler:

1. Dağ, H. İ. and Koçar, G., Application Areas of PV/T (Hybrid) Collectors and Business Trend in the World, SOLARTR-2014 Solar Conference and Exhibition, 19-20 November 2014, Izmir, Turkey.

ÖZGEÇMİŞ (devam)

2. Dağ, H. İ., Koçar, G. and Yüksel, Ö.F., Design, fabrication and analysis of Photovoltaic/Thermal (PV/T) hybrid collector, International Conference on Solar Energy for World Peace, 17-19 August 2013, Istanbul, Turkey. (**Invited Speaker**)
3. H. İ. Dağ, G. Koçar, Ö.F. Yüksel, Analysis of energy conversion performance of Photovoltaic/Thermal (PV/T) collector and photovoltaic (PV) module, International Conference on Solar Energy for World Peace, 17-19 August 2013, Istanbul, Turkey.
4. Halil İbrahim DAĞ and Günnur KOÇAR, Low temperature solar thermal market in the world and need for a strong soalr thermal policy, 6th International Ege Energy Symposium and Exhibition", 28-30 June 2012, Izmir, Turkey .
5. H. İ. Dağ, G. Koçar, Düşük sıcaklık üreten güneş kolektörleri için dünya pazarı ve Türkiye'de teşvik gereksinimi, Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu Türkiye Bölümü, 19 Aralık 2012, Ankara, Turkey.

Projeler:

1. Ondüleli Metal Hortum Isı Değiştiricisine Sahip Güneş Enerjili Su Isıtma Deposunun Performansına Tasarım Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi ve Tam Ototmatik Test Sistemi Geliştirilmesi, TUBITAK-TEYDEB R&D Project, 7140301, 2014 (**proje yürütücüsü**) (devam ediyor).
2. Hibrit Fotovoltaik/Termal (PV/T) Modülün Tasarımı ve Uygulaması, TUBITAK-TEYDEB R&D Project, 7090758, 2013 (**proje yürütücüsü**).
3. PIPESTORE - A Modular Phase Change Material Thermal Store That Enables Optimal Performance of Renewable Energy Systems, SEVENTH FRAMEWORK PROGRAMME, 262062, 12/2010 – 11/2012 (**proje yürütücüsü**).
4. EAGLE - Development and Demonstration of a Dynamic, Web-Based, Renewable Energy Rating Platform, SEVENTH FRAMEWORK PROGRAMME, 286161, 12/2011, 11/20140 (**araştırıcı**).

Patent ve Faydalı Model:

1. **Faydalı Model**, Seyyar Solar Güç Sistemi, Başvuru Numarası 2013/09572, Başvuru Tarihi 06/08/2013, Tescil Tarihi 21/11/2014.

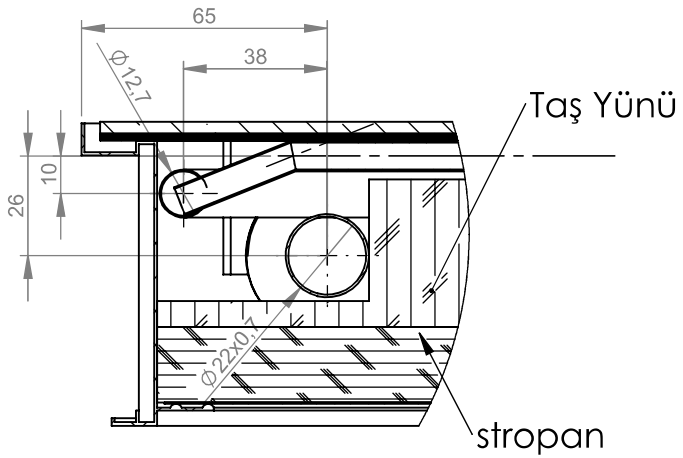
ÖZGEÇMİŞ (devam)

2. **Patent**, Solar Enerji Dönüşüm Modül Üretimi İçin Yöntem ve Bu Yöntemle Üretilen Modül, Başvuru Numarası 2012/13670, Başvuru Tarihi 25/04/2011, Yayın Tarihi 23/12/2013.
3. **Faydalı Model**, Güneş Kolektörleri İçin Esnek Bağlantı Tertibatı, Başvuru Numarası 2009/02809, Başvuru Tarihi 10/04/2009, Tescil Tarihi 21/06/2010.
4. **Faydalı Model**, Güneş Kolektörleri İçin Havşa Başlı Akışkan Giriş-Çıkış Borusu, Başvuru Numarası 2009/02810, Başvuru Tarihi 10/04/2009, Tescil Tarihi 21/04/2010.

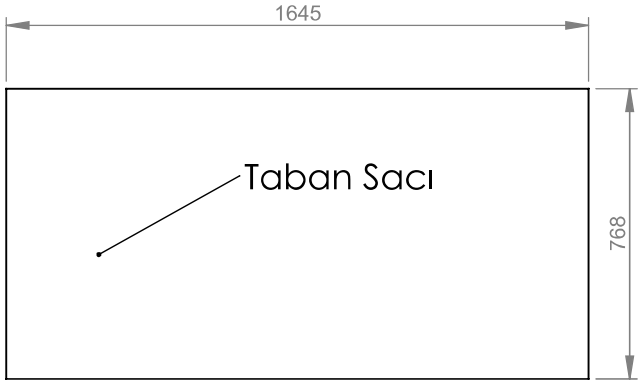
EKLER

Ek 1 PVT-1 Modülünün Termal Kısmının Teknik Resmi
Ek 2 PVT-2 Modülünün Termal Kısmının Teknik Resmi
Ek 3 PVT-3 Modülünün Termal Kısmının Teknik Resmi
Ek 4 PVT-4 Modülünün Termal Kısmının Teknik Resmi
Ek 5 PVT-5 Modülünün Termal Kısmının Teknik Resmi

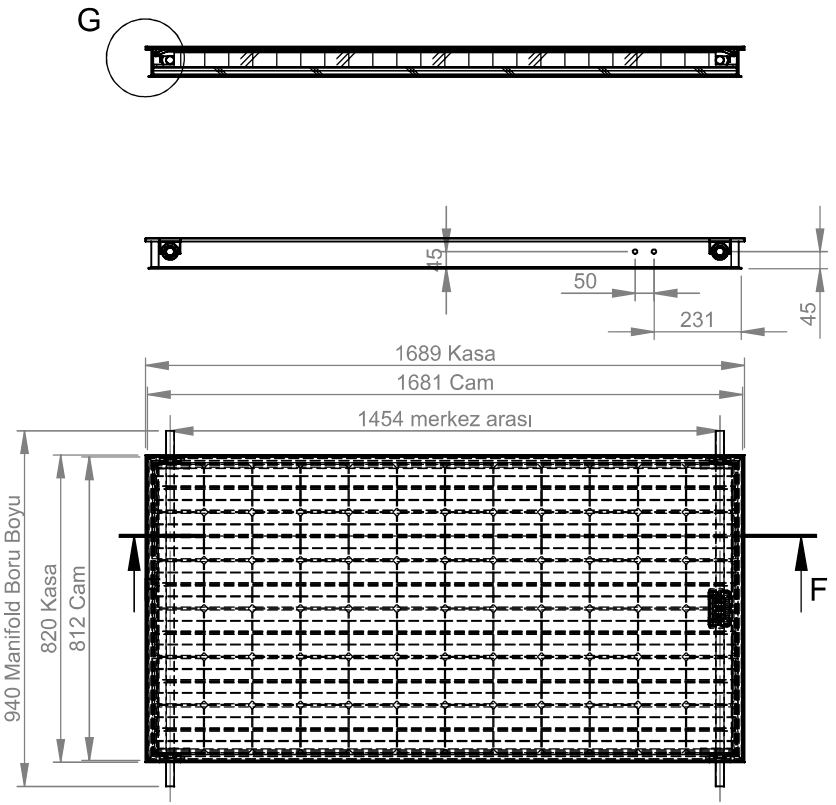
EK 1



DETAY G
ÖLÇEK 1 : 2

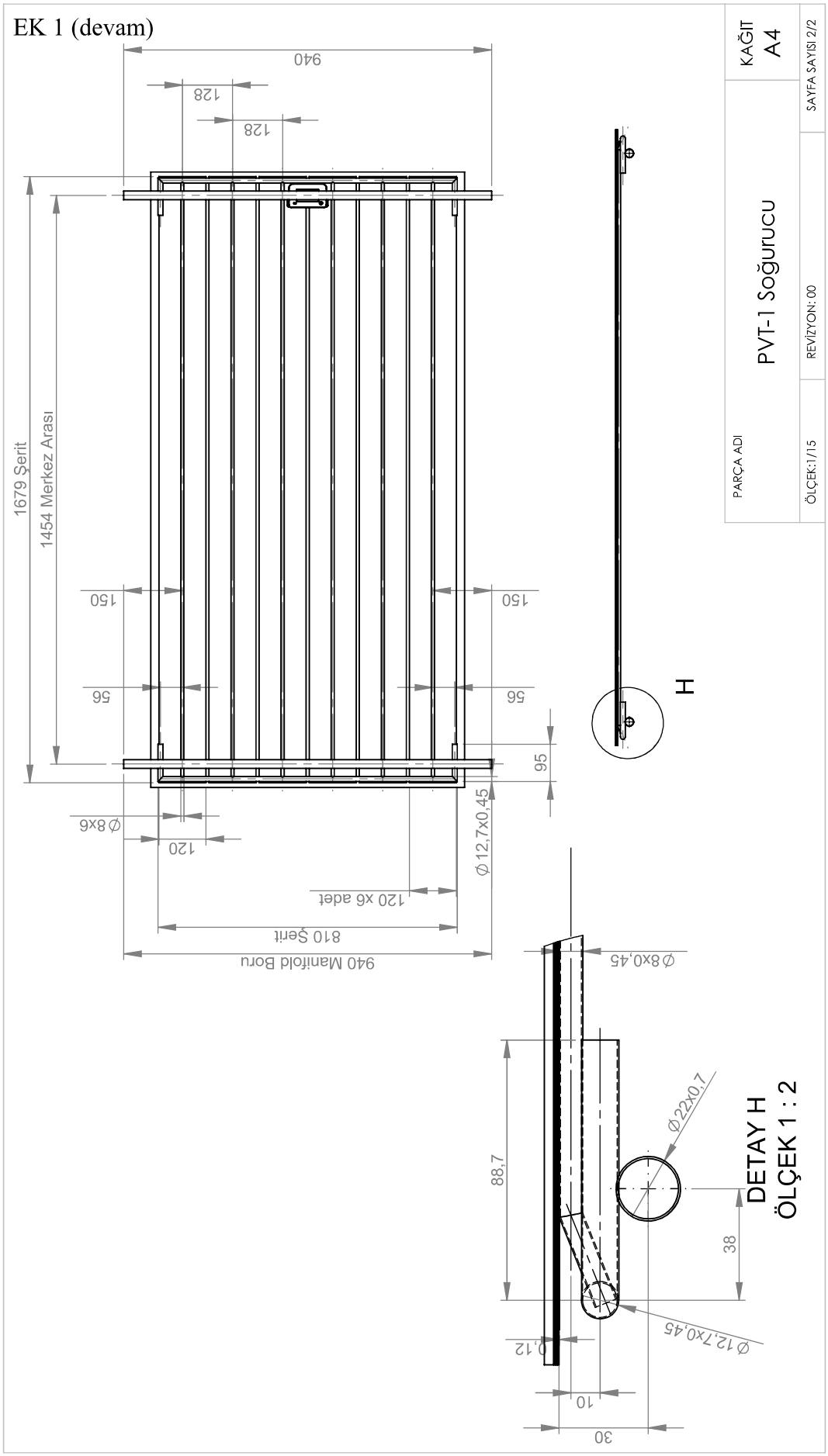


KESIT F-F

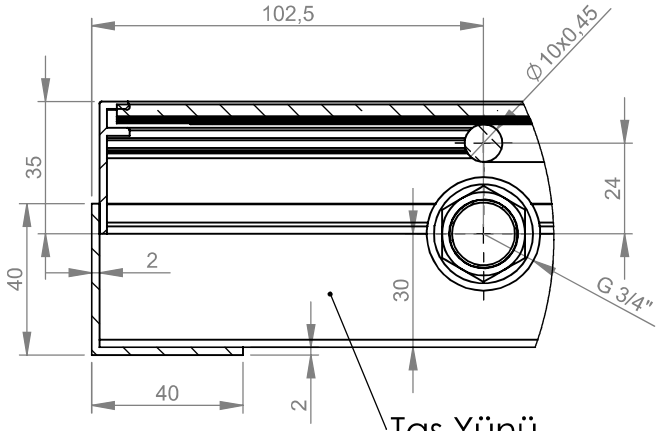


PARÇA ADI		KAĞIT
PVT-1		A4
ÖLÇEK:1/15	REVİZYON: 00	SAYFA SAYISI 1/2

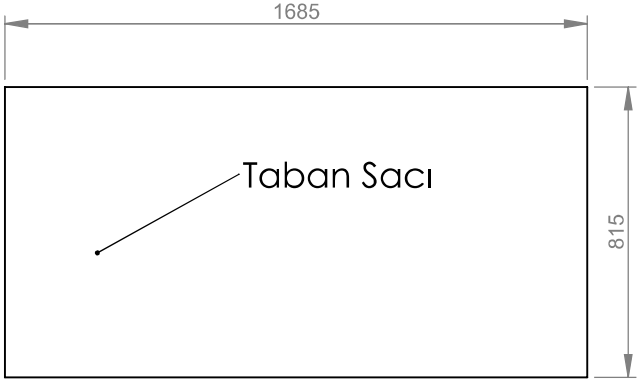
EK 1 (devam)


940
128
128
1679 Şerit
1454 Merkez Arası
150
150
56
56
95
H
Ø8x6
120
120 x6 adet
Ø12,7x0,45
810 Şerit
940 Manifold Boru
Ø8x0,45
88,7
Ø22x0,7
38
Ø12,7x0,45
0,12
10
30
DETAY H
ÖLÇEK 1 : 2
PARÇA ADI
PVT-1 Soğurucu
KAĞIT
A4
ÖLÇEK:1/15
REVİZYON: 00
SAYFA SAYISI 2/2

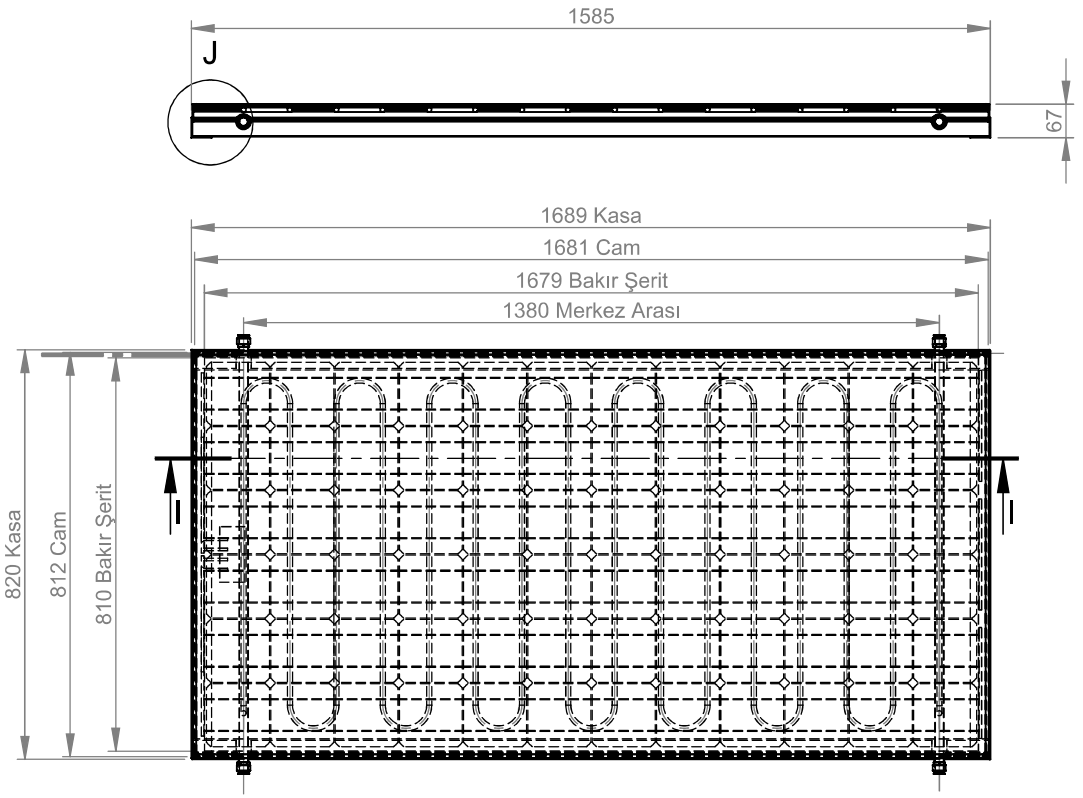
EK 2



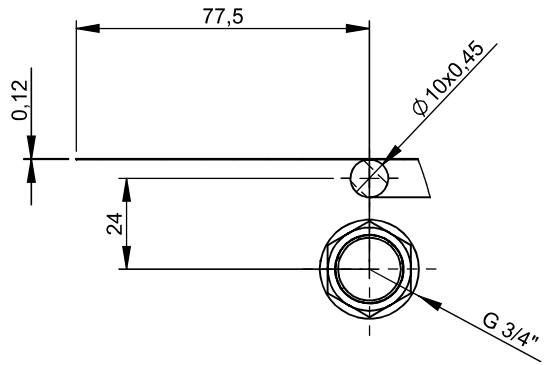
DETAY J
ÖLÇEK 1 : 2



KESIT I-I
ÖLÇEK 1 : 15

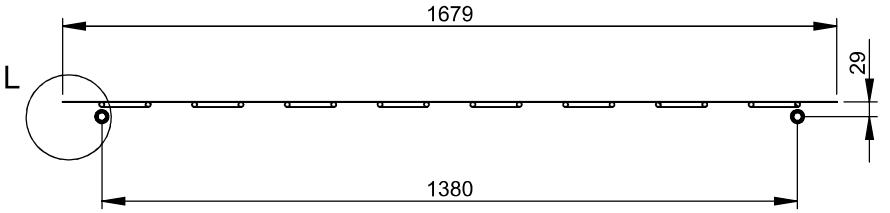


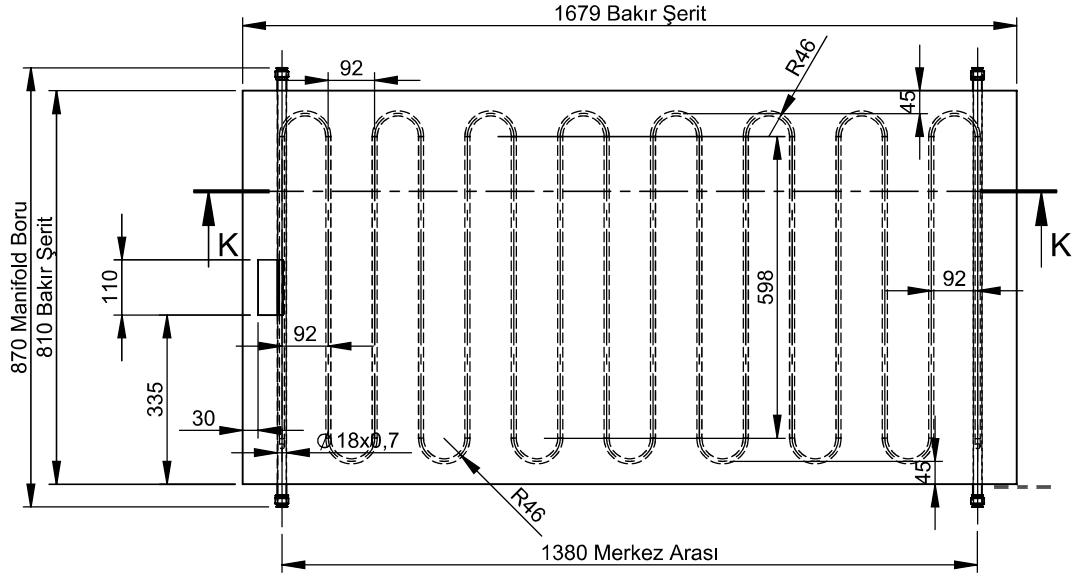
PARÇA ADI		KAĞIT
PVT-2		A4
ÖLÇEK:1/20	REVİZYON: 00	SAYFA SAYISI 1/2



DETAY L
ÖLÇEK 1 : 2

KESIT K-K
ÖLÇEK 1 : 15

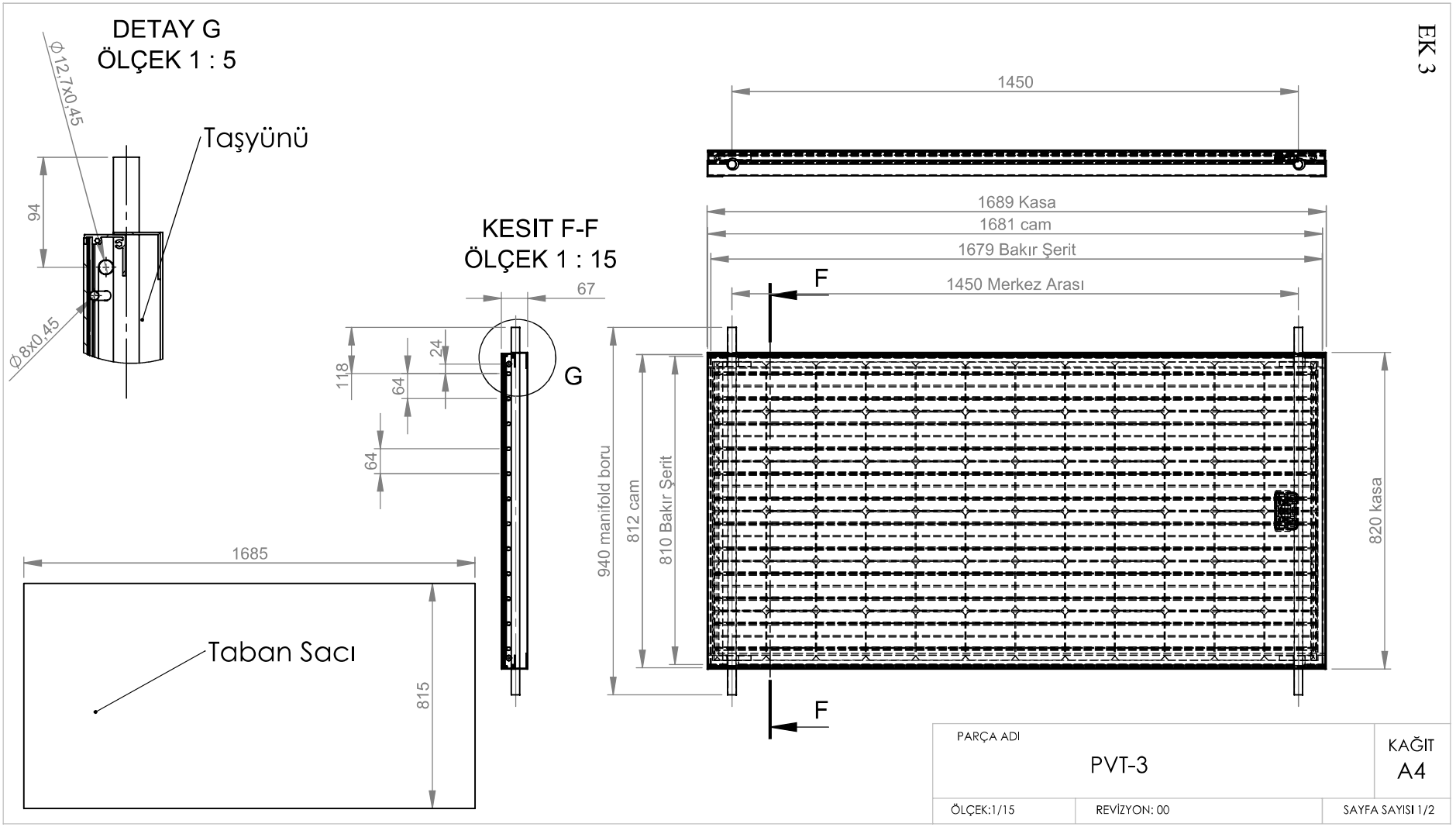




EK 2 (devam)

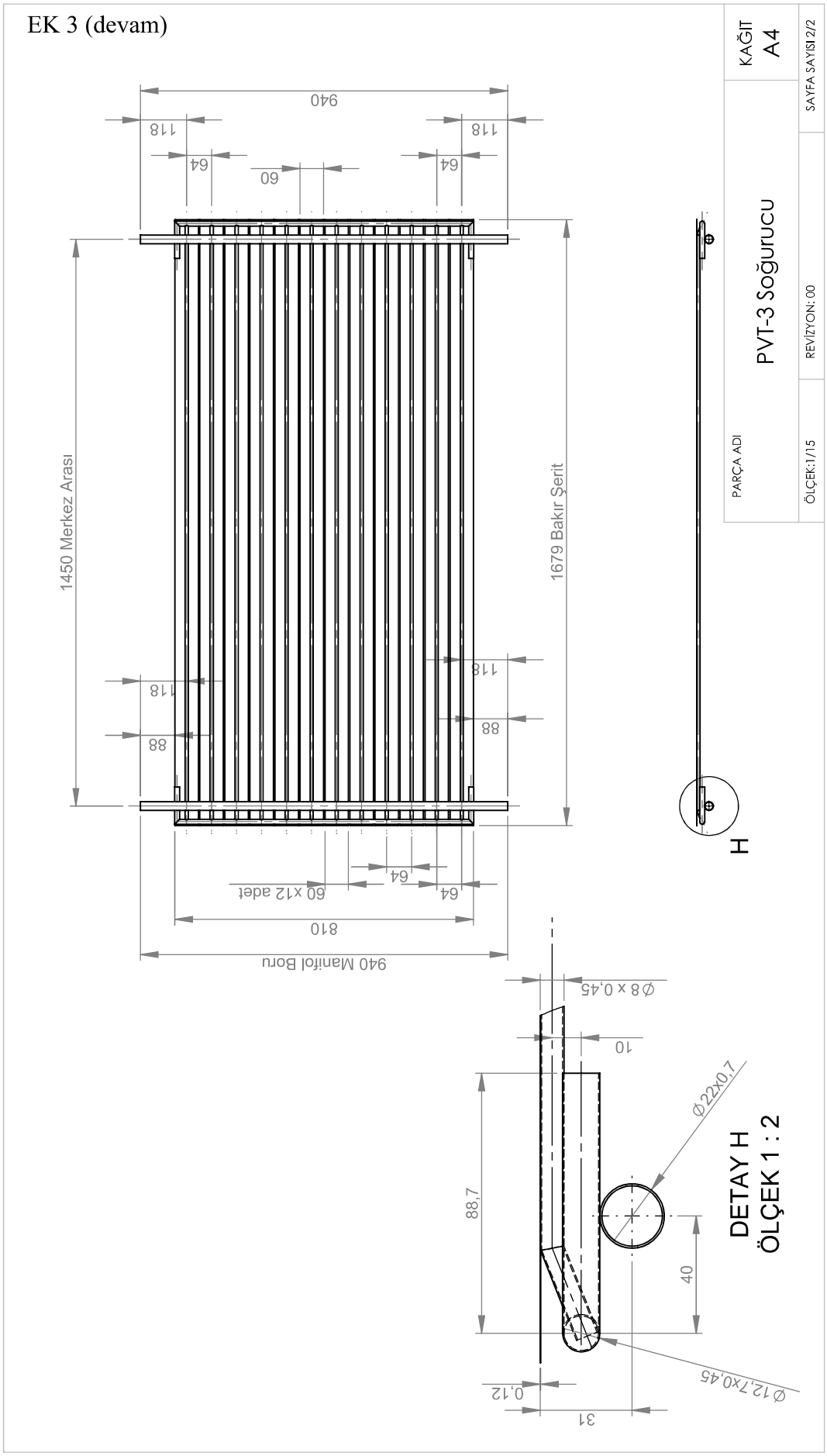
PARÇA ADI		KAĞIT
PVT-2 Soğurucu		A4
ÖLÇEK:1/15	REVİZYON: 00	SAYFA SAYISI 2/2

EK 3

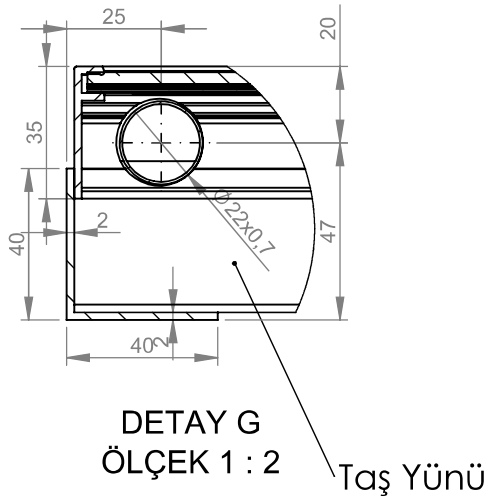


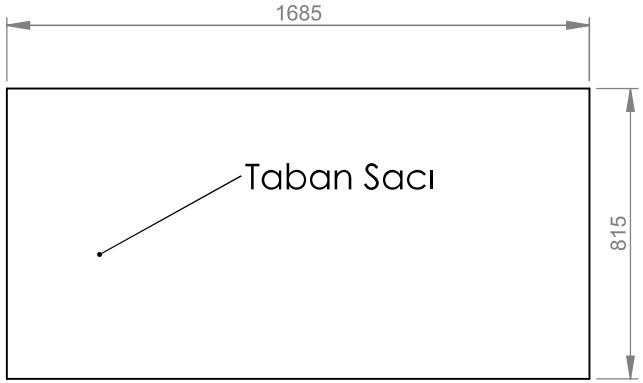
PARÇA ADI		KAĞIT
PVT-3		A4
ÖLÇEK:1/15	REVİZYON: 00	SAYFA SAYISI 1/2

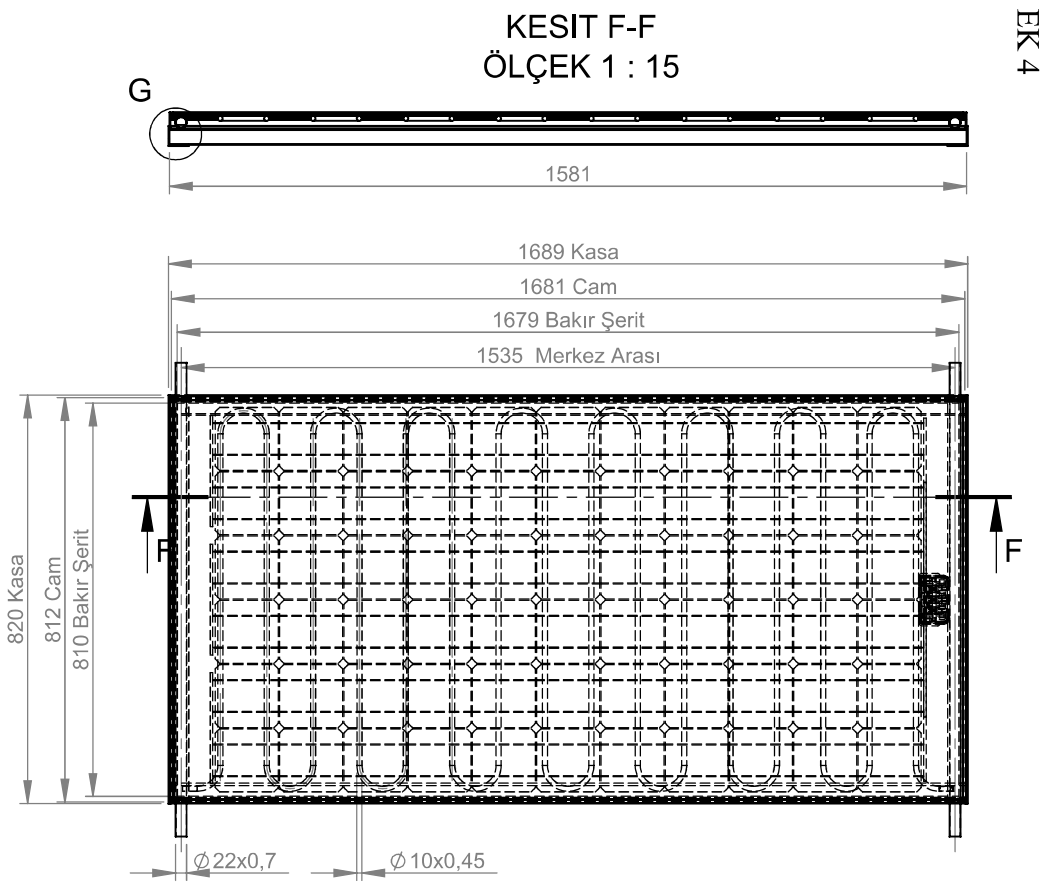
EK 3 (devam)


940
118
118
64
64
60
1450 Merkez Arası
1679 Bakır Şerit
118
118
88
88
64
64
60 x12 adet
810
940 Manifol Boru
H
Ø 8 x 0,45
10
Ø22x0,7
88,7
40
Ø 12,7x0,45
0,12
31
DETAY H
ÖLÇEK 1 : 2
PARÇA ADI
PVT-3 Soğurucu
KAĞIT
A4
ÖLÇEK:1/15
REVİZYON: 00
SAYFA SAYISI 2/2

EK 4

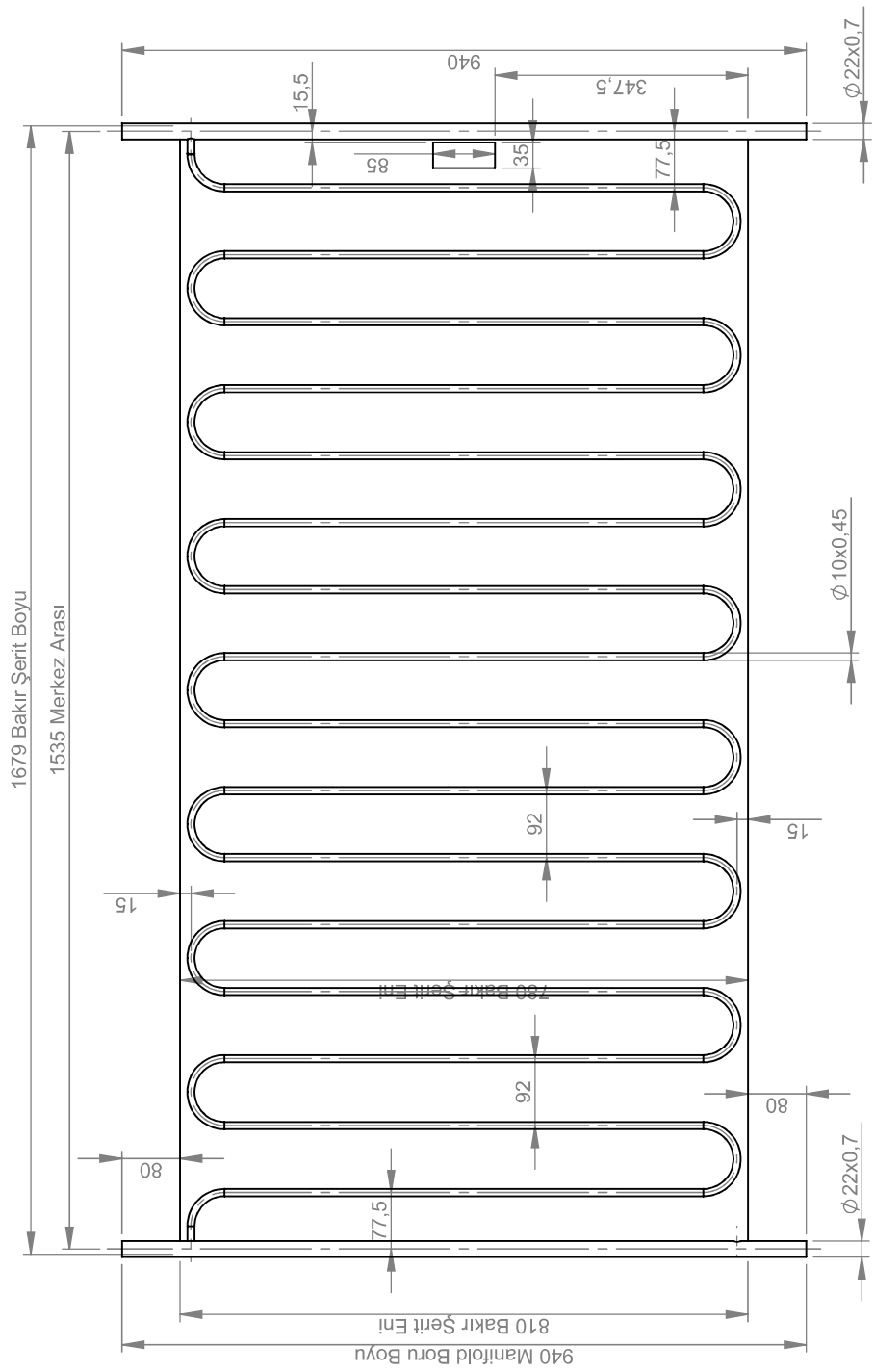




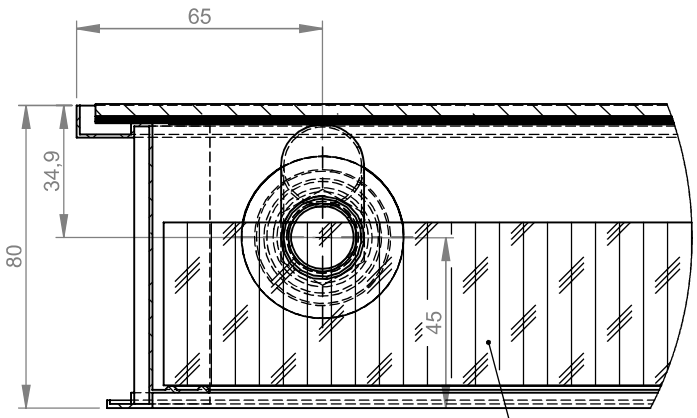


PARÇA ADI		KAĞIT
PVT-4		A4
ÖLÇEK:1/15	REVİZYON: 00	SAYFA SAYISI 2/1

EK 4 (devam)

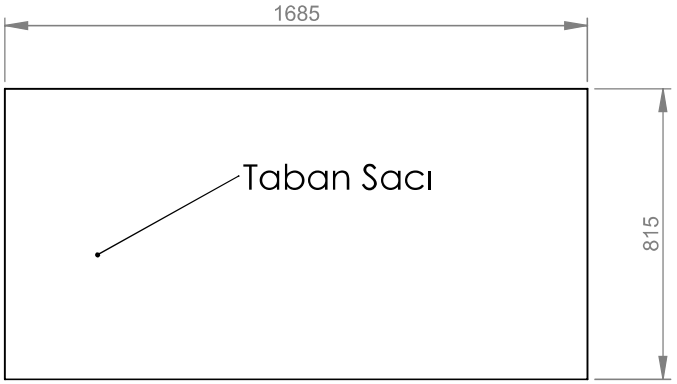

940
347,5
15,5
85
35
77,5
Φ22x0,7
Φ10x0,45
1679 Bakır Şerit Boyu
1535 Merkez Arası
92
15
780 Bakır Şerit Eni
80
810 Bakır Şerit Eni
940 Manifold Boru Boyu
PVT-4 Soğurucu
PARÇA ADI
KAĞIT A4
ÖLÇEK:1/10
REVİZYON: 00
SAYFA SAYISI 2/2

EK 5

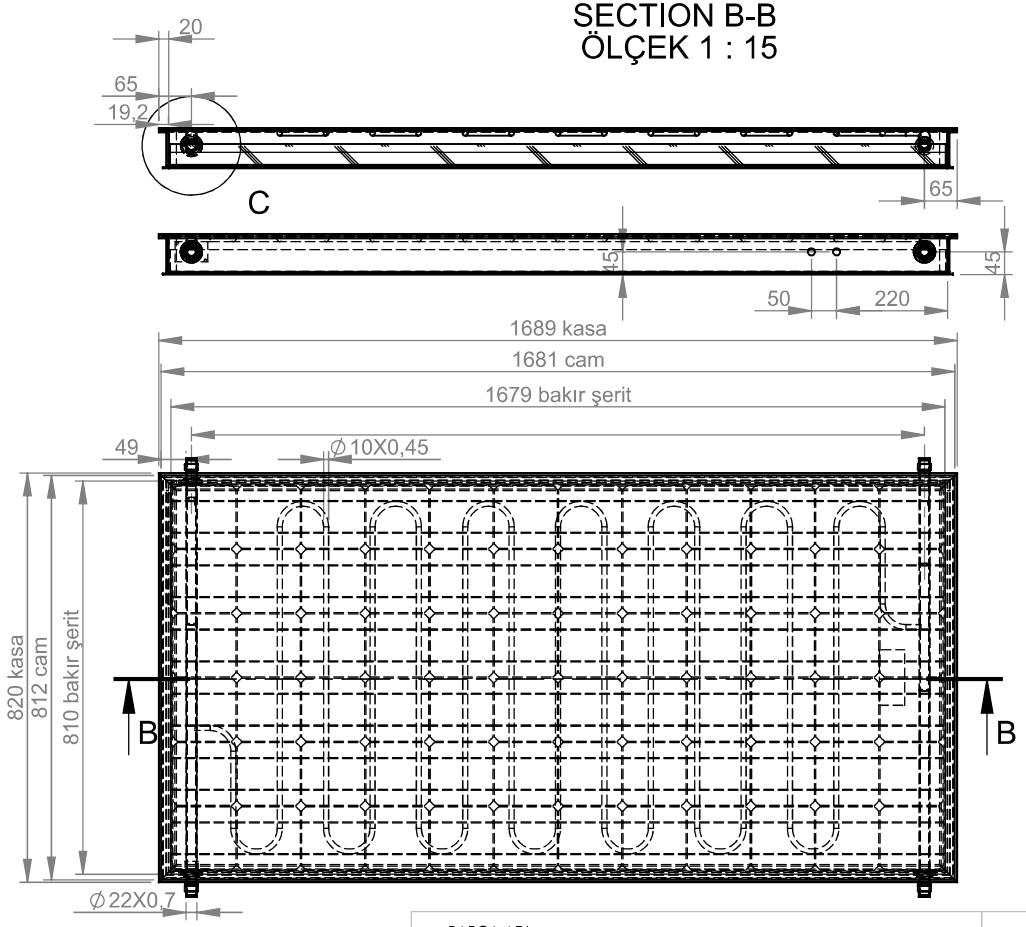


DETAIL C
SCALE 1 : 2

Taş Yünü

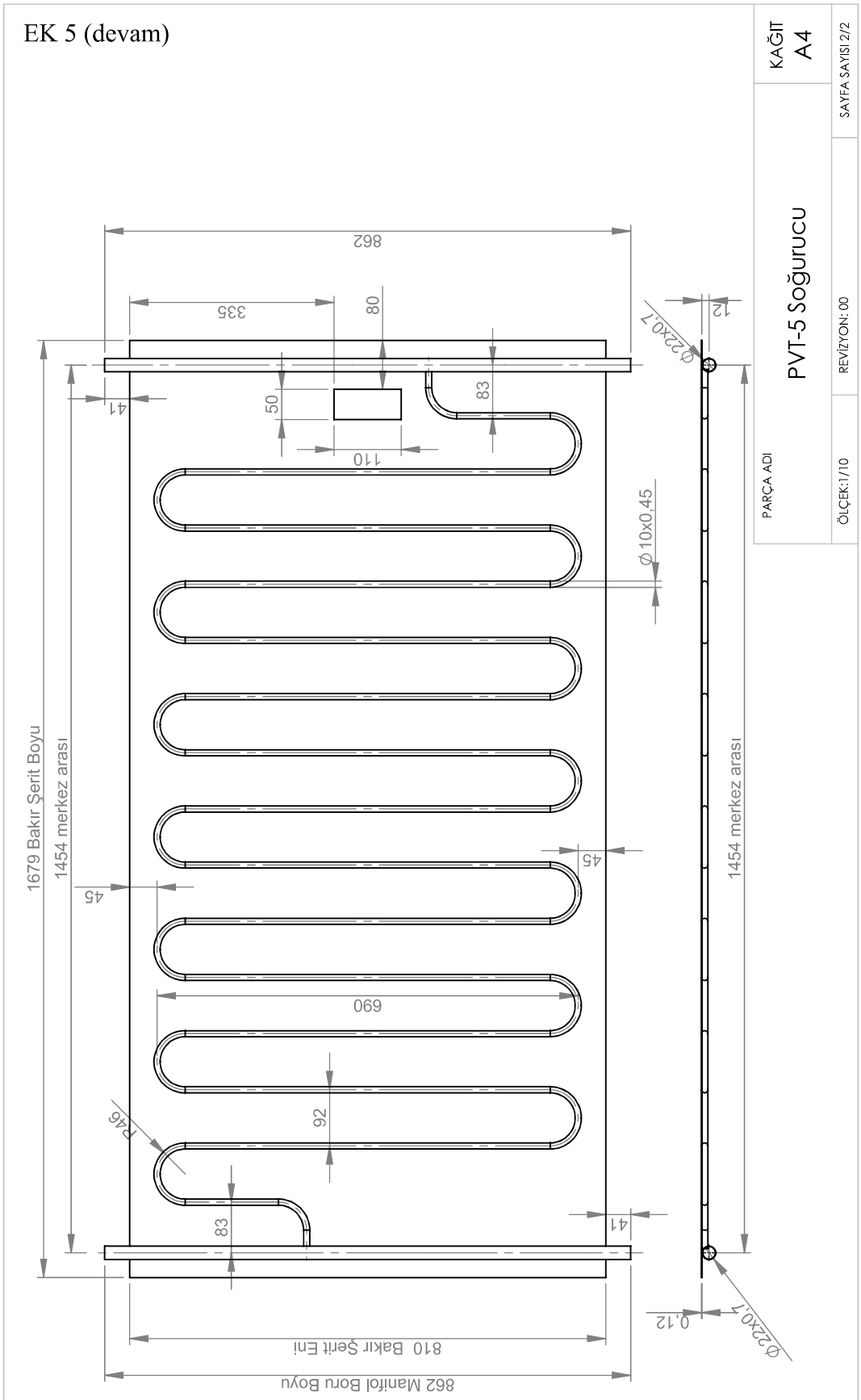


SECTION B-B
ÖLÇEK 1 : 15



PARÇA ADI		KAĞIT
PVT-5		A4
ÖLÇEK:1/15	REVİZYON: 00	SAYFA SAYISI 1/2

EK 5 (devam)


KAĞIT
A4
PVT-5 Soğurucu
PARÇA ADI
ÖLÇEK:1/10
REVİZYON: 00
SAYFA SAYISI 2/2
862
335
80
12
Ø22x0,7
41
50
83
110
Ø10x0,45
1679 Bakır Şerit Boyu
1454 merkez arası
45
690
92
R46
83
41
0,12
862 Manifol Boru Boyu
810 Bakır Şerit Eni