

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**BİR YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ İÇİN
ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİ DİZAYNI VE MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdem ACAR

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**BİR YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ İÇİN
ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ DİZAYNI VE MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Erdem ACAR
(301051004)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Üner ÇOLAK

MAYIS 2014

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün **301051004** numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Erdem ACAR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BİR YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ İÇİN ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİ DİZAYNI VE MODELLEMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Üner ÇOLAK**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN**

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Coşkun FIRAT

İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2014**

Savunma Tarihi : **27 Mayıs 2014**

ÖNSÖZ

Enerji, insan için vazgeçilmezdir. Tüm yaşamsal ve endüstriyel faaliyetlerin yerine getirilmesinde enerji kullanılmaktadır. Dolayısıyla enerjinin sosyal, kültürel, çevresel, siyasal, ekonomik vb. birçok alanda etkisi vardır. Sanayileşme, nüfus artışı ve kentleşme enerjiye olan talebi giderek arttırmıştır. Zamanla gelişen teknoloji ile birlikte daha fazla tüketim ve üretim sonucu enerjiye olan bu aşırı talep, meydana getirdiği çevresel etkiler düşünülmeden her türlü enerji üretim ve dönüşüm teknolojisinin kullanılmasına neden olmuştur. Bu durum beraberinde birçok sorunu da getirmiş, çevresel sorunlar hızla artmış (küresel iklim değişikliği, hava kirliliği gibi) ve ekolojik denge bozulmaya başlamıştır.

Fosil enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, kullanılan enerji üretim ve dönüşüm teknolojilerinin doğal çevrede geri dönülmez tahribatlara yol açması ve insanların enerjiye erişiminin en elverişli koşullarda sağlanması, “sürdürülebilir enerji” kavramının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Toplumların ihtiyacı olan enerjinin, günümüzde ve gelecekte sürekli temini için kısa vadede enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik tedbirler alınmalı ve fosil enerji kaynakları için çevreye olası zararları en az olan üretim ve dönüşüm teknolojilerinin kullanılması teşvik edilmelidir. Uzun vadede ise yenilenebilir enerji kaynaklarının arz çeşitliliğinin artırılmasına ve kullanımının yaygınlaştırılmasına öncelik ve destek veren enerji politikaları uygulanmalıdır.

Bu tez çalışmasında; birçok sanayi tesisinde mevcut olan düşük sıcaklıktaki atık ısıların geri kazanımında ve yenilenebilir enerji kaynaklı güç santrallerinde kullanıldığında, çevre kirliliği yaratmadan ekonomik bir şekilde elektrik üretilmesini sağlayan ve enerji dönüştürme teknolojileri arasında gelişiminde önemli bir potansiyel olan Organik Rankine Çevrimi (ORÇ)’nin, bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali için dizaynı ve modellemesi yapılmıştır.

Yüksek Lisans Tez çalışmam süresince bana yol gösteren tez danışmanım ve hocam Sayın Prof. Dr. Üner Çolak’a, ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2014

Erdem Acar
Gemi İnşaatı ve Deniz Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Literatür Araştırması Özeti.....	1
1.2 Organik Rankine Çevrimi (ORÇ).....	4
1.3 Güneş Enerjisi.....	7
1.4 Güneş Enerjisi Dönüştürme Sistemleri.....	8
1.5 Güneş Termal Kolektörler.....	9
1.6 Güneş Termal Enerji Teknolojisi.....	13
1.7 Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Santralleri.....	15
1.8 Parabolik Oluk Kolektör Düzenekleri.....	17
1.8.1 Doğrusal alıcılar tarafından emilen güneş ışınımı.....	21
1.8.2 Direkt normal güneş ışınımı ve geliş açısı.....	22
2. REFERANS GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ	25
2.1 Saguaro Güneş Enerjisi Santrali.....	25
2.1.1 Teknik veriler.....	27
2.1.2 Güç bloğu.....	29
3. GÜNEŞ KOLEKTÖR ALANI DİZAYNI	33
3.1 System Advisor Model (SAM) Programı.....	33
3.2 SAM Programıyla Güneş Kolektör Alanı Dizaynı.....	35
3.2.1 Santral yeri ve meteorolojik veriler.....	35
3.2.2 Güneş kolektör düzenekleri.....	37
3.2.3 Alıcılar.....	38
3.2.4 Güneş kolektör alanı.....	40
3.2.5 Hesaplanan termal enerji miktarları.....	43
4. GÜÇ BLOĞU DİZAYNI VE MODELLEMESİ	47
4.1 Flownex Programı.....	47
4.2 Güç Bloğu Dizaynı.....	48
4.3 Çalışma Akışkanı Seçimi.....	52
4.4 Flownex Programıyla Güç Bloğu Modellemesi.....	56
4.4.1 Kararlı durum için yapılan modelleme.....	56
4.4.2 Dinamik durum için yapılan modelleme.....	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	73
EKLER	77
ÖZGEÇMİŞ	81

KISALTMALAR

ORÇ	: Organik Rankine Çevrimi
OTED	: Okyanus Termal Enerji Dönüşümü
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
STG	: Solar Turbine Group
DNI	: Direkt Normal Işınım
IST	: Industrial Solar Technology
GAD	: Geliş Açısı Düzeltmesi
GKA	: Güneş Kolektör Alanı
APS	: Arizona Public Service
RPS	: Renewable Portfolio Standard
SAM	: System Advisor Model
NREL	: National Renewable Energy Laboratory
GKD	: Güneş Kolektör Düzenegi
GB	: Güç Bloğu
TEDS	: Termal Enerji Depolama Sistemi
YEK	: Yardımcı Enerji Kaynağı
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
IWEC	: International Weather for Energy Calculations
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CHP	: Combined Heat and Power
HR	: Heat Recovery
EPA	: Environmental Protection Agency
CAS	: Chemical Abstracts Service
ODP	: Ozone Depletion Potential
GWP	: Global Warming Potential
VOC	: Volatile Organic Compound
ACGIH	: American Conference of Governmental Industrial Hygienists
TLV	: Threshold Limit Value
OSHA	: Occupational Safety and Health Administration
PEL	: Permissible Exposure Limit
AIHA	: American Industrial Hygiene Association
WEEL	: Workplace Environmental Exposure Level
TWA	: Time Weighted Average
DOT	: Department of Transportation
RCRA	: Resource Conservation and Recovery Act
TSCA	: Toxic Substances Control Act
SNAP	: Significant New Alternatives Program
ASTM	: American Society for Testing and Materials
NPSH	: Net Positive Suction Head

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : ORÇ ile çalışan çeşitli boyutlardaki güç bloklarının başlıca üretici firmaları, uygulama alanları ve güç üretimi aralıkları	7
Çizelge 1.2 : Güneş termal kolektör tipleri.....	10
Çizelge 1.3 : Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinin performans karakteristikleri.....	14
Çizelge 2.1 : Saguaro Güneş Enerjisi Santrali'ne ait teknik veriler.....	27
Çizelge 3.1 : Solargenix SGX-1 parabolik oluk güneş kolektör düzeneğine ait kolektör geometrisi ve optik parametreler	38
Çizelge 3.2 : Schott PTR70 2008 emici tüp için varyasyonlar	39
Çizelge 3.3 : Schott PTR70 2008 emici tüpe ait alıcı geometrisi ve optik-termal parametreler.....	40
Çizelge 3.4 : GKA için seçilen, hesaplanan ve belirlenen dizayn parametreleri ile parazitikler.....	41
Çizelge 3.5 : GKA dizaynında hesaplanan termal enerji miktarları	43
Çizelge 3.6 : GKA için hesaplanan aylık toplam termal enerji miktarları	44
Çizelge 3.7 : GKA için hesaplanan saatlik güç bloğuna aktarılan termal enerji miktarlarının yıl boyunca görülme sayısı ve yüzdeleri	45
Çizelge 4.1 : Turboden 10 CHP/HR için teknik veriler	49
Çizelge 4.2 : R245fa'nın çevresel karakteristikleri ve ABD mevzuat bilgileri	53
Çizelge 4.3 : R245fa'nın fiziksel ve termodinamik özellikleri.....	54
Çizelge 4.4 : Türbin performans eğrilerinden CS=2,49 için hesaplanan değerler	59
Çizelge 4.5 : Pompa performans eğrileri için hesaplanan değerler	61
Çizelge 4.6 : Evaporatör sıcaklıkları için hesaplanan türbin güç ve verim değerleri.....	64
Çizelge A.1 : Isı transfer akışkanı Therminol VP-1'in karakteristik özellikleri.....	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : ORÇ’nde kullanılan bazı çalışma akışkanları ile suya ait sıcaklık-entropi diyagramları	4
Şekil 1.2 : ORÇ için uygun kullanım aralıkları	5
Şekil 1.3 : ORÇ’nde çevrim sıcaklığı-net çevrim verimi ilişkisi	6
Şekil 1.4 : Dünya güneş ışınımı haritası	8
Şekil 1.5 : Temel aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemleri	8
Şekil 1.6 : Düz yüzeyli plaka tipi güneş termal kolektör.....	11
Şekil 1.7 : Yoğunlaştırıcı güneş termal kolektör tipleri.....	12
Şekil 1.8 : Kaliforniya Mojave Çölü’ndeki parabolik oluk kolektör düzenekleri	15
Şekil 1.9 : Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde elektrik üretimi	16
Şekil 1.10: Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde sıcaklık-verim ilişkisi.....	17
Şekil 1.11: Parabolik oluk kolektör düzenekleri	18
Şekil 1.12: Parabolik oluk kolektör düzeneğinin bileşenleri	18
Şekil 1.13: Parabolik oluk kolektörde doğrusal alıcının konumu	19
Şekil 1.14: Parabolik oluk kolektörde kullanılan doğrusal alıcı	20
Şekil 1.15: Pirheliometre	22
Şekil 1.16: Parabolik oluk kolektör yüzeyine gelen direkt güneş ışınımı ve geliş açısı.....	22
Şekil 2.1 : Saguario Güneş Enerjisi Santrali	25
Şekil 2.2 : Saguario Güneş Enerjisi Santrali’nin yapım aşamaları	26
Şekil 2.3 : Saguario Güneş Enerjisi Santrali’nde kullanılan güç bloğu.....	29
Şekil 2.4 : Saguario Güneş Enerjisi Santrali’nde kullanılan güç bloğu elemanları ...	30
Şekil 2.5 : Saguario Güneş Enerjisi Santrali’nde kullanılan güç bloğu için ORÇ	30
Şekil 3.1 : SAM programındaki fiziksel modelin çalışma prensibi	34
Şekil 3.2 : İzmir için ölçülen güneş ışınımı bileşenlerinin yıllık profili.....	35
Şekil 3.3 : İzmir için ölçülen DNI’nın yıllık profiline geliş açısı’nın etkisi.....	36
Şekil 3.4 : İzmir için ölçülen geliş açısı ile geliş açısı düzeltmesi, sıra gölgesi ve uç kaybı katsayılarının yıllık profili.....	37
Şekil 3.5 : Solargenix SGX-1 parabolik oluk güneş kolektör düzeneği.....	37
Şekil 3.6 : Schott PTR70 2008 emici tüp	39
Şekil 3.7 : Güneş kolektör alanı yerleşim düzeni.....	41
Şekil 3.8 : GKA için hesaplanan toplam termal kayıplar ile toplam termal enerji miktarlarının yıllık profili	43
Şekil 4.1 : ORÇ ile çalışan bir güç bloğu (Turboden 10 CHP/HR)	49
Şekil 4.2 : Dizaynı yapılan güç bloğu için ORÇ.....	50
Şekil 4.3 : Dizaynı yapılan güç bloğundaki elemanların belirlenen özellikleri.....	51
Şekil 4.4 : R245fa’ya ait sıcaklık-entropi diyagramı	55
Şekil 4.5 : R245fa’ya ait basınç-hacim diyagramı	55
Şekil 4.6 : R245fa’ya ait basınç-entalpi diyagramı	56
Şekil 4.7 : Türbin için düzeltilmiş kütle akışı-basınç oranı performans eğrileri.....	58

Şekil 4.8 : Türbin için düzeltilmiş kütle akışı-izantropik verim performans eğrileri	58
Şekil 4.9 : Pompa için hacimsel debi-basınç artışı performans eğrisi	60
Şekil 4.10 : Pompa için hacimsel debi-NPSH performans eğrisi	60
Şekil 4.11 : Dizaynı yapılan güç bloğunun kararlı durumdaki ORÇ modellemesi	62
Şekil 4.12 : Dizaynı yapılan güç bloğunun kararlı durumdaki ORÇ modellemesinde R245fa'ya ait sıcaklık-entropi diyagramı	63
Şekil 4.13 : Evaporatöre giren termal enerji-türbinde üretilen brüt güç eğrisi.....	66
Şekil 4.14 : Evaporatöre giren termal enerji-brüt çevrim verimi eğrisi.....	67
Şekil 4.15 : 9 Temmuz günü için GKA'ndan güç bloğuna aktarılan (evaporatöre giren) tahmini saatlik termal enerji değerlerinin profili	68
Şekil 4.16 : 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında türbinde üretilen brüt güç ...	68
Şekil 4.17 : 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında türbin girişindeki sıcaklık ...	69
Şekil 4.18 : 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında türbin girişindeki basınç	69
Şekil 4.19 : 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında evaporatör ve kondenser çıkışındaki kütleli debi	69
Şekil 4.20 : 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında pompadaki hacimsel debi ...	70

BİR YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ İÇİN ORGANİK RANKINE ÇEVİRİMİ DİZAYNI VE MODELLEMESİ

ÖZET

Güneş enerjisini kullanılabilir bir enerji formuna dönüştüren farklı türde pek çok pasif veya aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemi vardır. Aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemlerindeki en önemli unsur olan güneş kolektörleri (termal veya fotovoltaik), üzerlerine gelen güneş ışınımını yakalar ve onu kullanılabilir bir enerji formuna (ısı ya da elektrik) dönüştürürler. Güneş termal kolektörler yüzeylerine düşen güneş ışınımını, tiplerine ve yüzey özelliklerine göre belli oranda emerek ya da yansıtarak ısıya dönüştürürler ve bu ısıyı, kolektör boyunca uzanan boru veya borular içinden akan bir ısı transfer akışkanına transfer ederler. Güneş enerjisinden dönüştürülen kullanılabilir enerjinin özellikle termal enerjinin sıcaklık seviyesini yükseltmek, ısı kayıpları olan kolektör yüzeyini küçülterek kolektörün verimini arttırmak, daha ucuz ve kullanışlı bir kolektör oluşturmak için yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörler kullanılır.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri, çeşitli tip yansıtıcı yüzey ve alıcıdan oluşan kolektör düzenekleri kullanarak güneş enerjisini yüksek sıcaklıklarda ısıya dönüştürür ve bu ısıdan geleneksel bir buhar türbini ve jeneratör aracılığıyla elektrik üretir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri temelde iki ana kısımdan oluşur. Bunlar: güneş enerjisinin toplandığı ve ısıya dönüştürüldüğü güneş kolektör alanı (varsa termal enerji depolama sistemini de içerir) ve ısı enerjisinin bir termodinamik güç çevrimi ile elektriğe dönüştürüldüğü güç bloğudur.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde kullanılan yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörler, yalnızca yüzeylerine gelen direkt güneş ışınımını yakalar ve onu yansıtarak bir alıcıda yoğunlaştırır. Üzerinde yoğunlaştırılan güneş ışınımını emerek ısınan alıcı, bu ısıyı içindeki ısı transfer akışkanına transfer eder. Varsa termal enerji depolama sisteminden geçen ısı transfer akışkanı, borular aracılığıyla taşınarak güç bloğundaki ısı değiştiricisine ulaşır ve ısınıp güç çevriminde kullanılan çalışma akışkanına transfer eder. Isınarak buhar fazına geçen çalışma akışkanı da türbin-jeneratör sistemini çalıştırır ve böylece elektrik üretilir.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde en çok tercih edilen tür teknoloji ise bugün mevcut güneş termal enerji teknolojileri içinde en olgun ve en düşük maliyetli teknoloji olan, parabolik oluk kolektör teknolojisidir. Parabolik oluk kolektörlerin kullanıldığı yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde, güneş kolektör alanının boyutuna ve yerleşim planına bağlı olarak belli boyutta ve sayıda parabolik oluk kolektör düzenekleri kullanılır.

Bu tez çalışmasında, düşük sıcaklıklarda çalışan ve sınırlı bir çıkış gücü ($< 1 \text{ MW}_e$) olan yenilenebilir enerji kaynaklı güç santrallerinde kullanıldığında ekonomik bir şekilde elektrik üretilmesini sağlayan Organik Rankine Çevrimi (ORÇ)'nin, İzmir'de

kurulacağı varsayılan bir parabolik oluk kolektörlü yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali için dizaynı ve modellemesi yapılmıştır. Bu amaçla “System Advisor Model (SAM)” adlı program kullanılarak güneş kolektör alanı dizaynı, “Flownex” adlı simülasyon programı kullanılarak da güç bloğu dizaynı ve modellemesi yapılmıştır. Referans olarak, ABD’nin Arizona eyaletinde yer alan, ORÇ ile çalışan bir güç bloğunun kullanıldığı ve 1 MW net elektrik üretim kapasitesine sahip olan “Saguaro” adlı parabolik oluk kolektörlü yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali kullanılmıştır.

Yenilenebilir enerji güç sistemleri projeleri için yapılan modellemelerde sistem dizayn parametrelerini kullanarak, kurulum ve işletim maliyetlerini de göz önünde bulundurarak, saatlik sistem performansı ve enerji maliyeti tahminleri yapan SAM programıyla; kolektör düzenekleri tarafından emilen, güneş kolektör alanından çıkan ve güç bloğuna aktarılan saatlik, aylık ve yıllık tahmini toplam termal enerji miktarları hesaplanmıştır.

Güç bloğundaki ORÇ’nde kullanılmak üzere; termodinamik, çevre, emniyet ve proses ile ilgili olan değerlendirme kriterleri göz önünde bulundurularak, çalışma akışkanı olarak R245fa (pentafloropropan) seçilmiştir. Bir düşük sıcaklık çalışma akışkanı olan ve ağırlıklı olarak atık ısı geri kazanımı uygulamalarında kullanılan R245fa, ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) onaylı ve Montreal Protokolü kapsamında kullanımına izin verilen hidroflorokarbon (HFC) soğutucuları ailesinin bir üyesidir.

Birçok çeşit termal ve akışkan sistemin kararlı ve dinamik durumları için dizayn, analiz ve optimizasyon yapılmasını sağlayan Flownex simülasyon programıyla da güç bloğunun, kararlı durum ve dinamik durum için ORÇ modellemesi yapılmıştır. Oluşturulan türbin ve pompa performans eğrileri kullanılarak kararlı durum için yapılan ORÇ modellemesinde, güç bloğu için çalışma sıcaklığı aralığı belirlenmiş ve güç bloğunda üretilecek tahmini yıllık brüt elektrik miktarı hesaplanmıştır. Kararlı durumda çalışan güç bloğunun bileşenlerinde oluşacak herhangi bir değişim durumunda; türbinde üretilen brüt güç, sıcaklık, basınç, kütleli debi gibi parametrelerde meydana gelecek değişimleri önceden görebilmek amacıyla oluşturulacak senaryolar için, 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasındaki zaman dilimi seçilmiş ve bir dinamik durum modellemesi yapılmıştır.

DESIGN AND MODELING OF ORGANIC RANKINE CYCLE FOR A CONCENTRATED SOLAR THERMAL POWER PLANT

SUMMARY

There are many different types of passive and active solar energy conversion systems that convert solar energy into a useful form of energy. Solar energy is captured and converted by solar thermal collectors into heat which is then supplied to a demand for thermal energy such as domestic heating, hot water heating, or heat for industrial processes. If the demand to be met is electricity rather than heat, there are two common methods of converting solar energy into electricity. One method is by collecting solar energy as heat and converting it into electricity using a typical power plant or engine; the other method is by using photovoltaic cells to convert solar energy directly into electricity.

Solar thermal collectors are special kinds of heat exchangers that transform solar radiation energy to internal energy of the transport medium. The solar thermal collector is the key element in an active solar energy conversion system. This is a device that absorbs the incoming solar radiation, converts it into heat, and transfers the heat to a fluid (usually air, water, or oil) flowing through the collector. Flat plate solar thermal collectors are the most commonly used type of solar collector. Their construction and operation are simple. A large plate of blackened material is oriented in such a manner that the solar energy that falls on the plate is absorbed and converted to thermal energy thereby heating the plate. Tubes or ducting are provided to remove heat from the plate, transferring it to a liquid or gas, and carrying it away to the thermal energy. One or more transparent (glass or plastic) plates are often placed in front of the absorber plate to reduce heat loss to the atmosphere. Likewise, opaque insulation is placed around the backside of the absorber plate for the same purpose. Operating temperatures up to 125 °C are typical.

When higher temperatures are required, concentrating solar thermal collectors are used. Solar energy falling on a large reflective surface is reflected onto a smaller area before it is converted into heat. This is done so that the surface absorbing the concentrated energy is smaller than the surface capturing the energy and therefore can attain higher temperatures before heat loss due to radiation and convection wastes the energy that has been collected. Most concentrating solar thermal collectors can only concentrate the parallel insolation coming directly from the sun's disk (direct normal insolation), and must track the sun's path across the sky.

Parabolic trough collector technology has been proven to be the most mature and lowest cost solar thermal energy technology to generate heat for solar thermal electricity generation or process heat applications available today. As a result, most of the projects for the construction of commercial solar thermal power plants are based on this type of collectors and several parabolic trough solar thermal power plants are going to be constructed in USA, Spain, Northern Africa, Middle East, etc.

Parabolic trough collectors can effectively produce heat at temperatures between 60 °C and 400 °C. Parabolic trough collectors are made by bending a sheet of reflective material into a parabolic shape. A black metal tube, covered with a glass tube to reduce heat losses, is placed along the focal line of the receiver. A parabolic trough collector concentrates incoming solar radiation onto a line running the length of the trough. A receiver tube carrying heat transfer fluid is placed along this line, absorbing concentrated solar radiation and heating the fluid inside, thus transforming the solar radiation into useful heat. It is sufficient to use a single axis tracking of the sun; therefore, long collector modules are produced. Because the surface area of the receiver tube is small compared to the trough aperture area, temperatures up to 400 °C can be reached without major heat loss.

Concentrating solar thermal power plants produce electricity by converting the sun's energy into high temperature heat using various mirror configurations. The heat is then channeled through a conventional generator. The plants basically consist of two main parts: solar collector area that collects solar energy and converts it to heat, and power block that converts heat energy to electricity. Concentrating solar thermal power systems can be sized 10 kW or grid connected applications up to 100 MW. Some systems use thermal storage during cloudy periods or at night. Concentrating solar thermal power plant technologies is based on four basic elements: concentrator, receiver, transport-storage, and turbine-generator. The collector captures and concentrates solar radiation, which is then delivered to the receiver. The receiver absorbs the concentrated sunlight, transferring its heat energy to a working fluid which would be synthetic oil. The transport-storage system passes the fluid from the receiver to the turbine-generator.

In this thesis, APS (Arizona's serving electricity utility) Saguaro Power Plant facility located in Arizona, USA was used as a reference solar thermal power plant. The Saguaro Power Plant was initially have 10340 square meters of parabolic trough solar field supplied by Solargenix and it was be nominally a 1 MW_e generating capacity Organic Rankine Cycle (ORC) system with wet cooling supplied by Ormat. The Saguaro Power Plant was designed for possible expansion of the solar field and addition of thermal storage at some point in the future.

The Rankine cycle is the most commonly used cycle in conventional power plants. The ORC is generally used in heat recovery applications at low temperature. ORC technology is similar to the steam cycles technology; a working fluid is pumped to a tank where it is evaporated, and it is heated to vaporization by solar thermal energy. The steam is then expanded in a turbine to produce mechanical energy and then electricity through a generator. This steam is then condensed to close the thermodynamic cycle. The difference between a conventional cycle and an organic cycle is that the working fluid in organic cycle is an organic fluid. The working fluids that are most appropriate in ORC units are dry fluids, which must have a relatively low temperature and critical pressure.

General criteria taken into consideration to identify the most suitable organic fluids include thermodynamic properties, stability of the fluid, compatibility with materials in contact with the fluid, safety and environmental aspects, availability, and costs. After analysis related to security, availability and environmental compatibility (ODP and GWP), working fluids are considered; R245fa (pentafluoropropane) was selected as a working fluid in ORC for this thesis.

In this thesis, System Advisor Model (SAM) program was used for the solar collector area design. SAM is a performance and financial model for renewable energy power systems and projects. SAM makes performance predictions and cost of energy estimates for grid connected power projects based on installation and operating costs and system design parameters that are specified as inputs to the model. SAM is developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) in collaboration with Sandia National Laboratories, and the University of Wisconsin, at first used internally by the US Department of Energy's Solar Energy Technologies Program for systems based analysis of solar technology improvement opportunities within the program. SAM's performance model makes hour by hour calculations of a power system's electric output, generating a set of 8760 hourly values that represent the system's electricity production over a single year.

In this thesis, Flownex simulation program was used for the power block design and modeling. Flownex provides a complete thermal-fluid design and analysis solution; it is developed by M-Tech Industrial, South Africa. Flownex combines a very extensive range of simulation (include both steady state and dynamic simulations) capabilities to provide the most complete solution for system and sub-system level simulations currently available. Flownex is an integrated systems CFD code used for the design, simulation and optimization of complete thermal-fluid systems. The analysis of thermal-fluid networks is based on the numerical solution of the governing equations of fluid dynamics and heat transfer. Flownex solves the partial differential equations for mass, momentum and energy conservation to obtain the mass flow rate, pressure and temperature distributions throughout a network.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı ve Literatür Araştırması Özeti

Bu tez çalışmasının amacı; güneş enerjisini elektriğe dönüştüren güç üretim sistemlerinde de kullanılabilen Organik Rankine Çevrimi (ORÇ)'nin, herhangi bir yerde kurulabilecek bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali için "Flownex" adlı bir simülasyon programı (termal ve akışkan sistemlerin modellenmesinde kullanılan) ile modellenmesi ve sistemde meydana gelebilecek geçici ve/veya ani değişim olaylarında sistem bileşenlerinde oluşacak değişimlerin önceden (sistem dizayn aşamasındayken) analiz edilebilmesine olanak sağlanarak, sisteme destek olacak yardımcı enerji kaynağının veya termal enerji depolama sisteminin ya da sisteme entegre edilecek kontrol sisteminin doğru bir şekilde belirlenmesinin mümkün olduğunu göstermektir. Böylelikle, gelecekte kurulabilecek olası güneş termal enerji sistemlerinde ORÇ'i teknolojisinin kullanımının tercih edilmesini sağlamaktır.

Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının arz çeşitliliğinin artırılarak kullanımlarının yaygınlaştırılması için yenilikçi ve ekonomik enerji dönüştürme teknolojilerinin geliştirilmesi gereklidir. Birçok sanayi tesisinde mevcut olan düşük sıcaklıktaki atık ısıların geri kazanımında kullanıldığında çevre kirliliği yaratmadan ekonomik bir şekilde elektrik üretilmesini sağlayan ORÇ, yenilenebilir enerji kaynaklı güç santrallerindeki uygulamalar için de oldukça uygundur ve gelişiminde önemli bir potansiyel mevcuttur. Kavramsal olarak geleneksel Rankine çevrimi ile benzer olan, düzen olarak ise geleneksel Rankine çevrimine göre biraz daha basit olan ORÇ; buharlaştırılan yüksek basınçlı bir sıvının, daha düşük bir basınca genişletilmesiyle mekanik iş elde edilmesi prensibine dayanır. Dolayısıyla ORÇ ile çalışan bir güç üretim sistemi, geleneksel bir buhar güç santrali ile temelde aynı bileşenlerden oluşur. Bu bileşenler; bir boyler, bir iş üreten genişletici, bir kondenser ve bir pompadır. Düşük sıcaklıktaki ısıyı elektriğe dönüştürmek için kullanılan ORÇ

teknolojisi, geleneksel güç çevrimlerinin aksine merkezi olmayan ve küçük ölçekli güç üretimi için olanak sağlar. Ayrıca ORÇ ile çalışan bir güç üretim sistemi, sistemde yapılacak küçük değişikliklerle aynı anda farklı ısı kaynaklarıyla bağlantılı olarak da kullanılabilir. ORÇ, geleneksel Rankine çevrimine göre daha basit ve sınırlı çevrim mimarisi varyasyonlarına sahip olmasına rağmen, hedef uygulamaya bağlı olarak kolayca uyarlanabilir ve optimize edilebilir [1]. Başlıca ORÇ uygulamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir [2]:

- Modüler güneş termal enerji sistemleri
- Güneş gölet güç sistemleri
- Güneş ters osmoz tuzdan arındırma sistemleri
- Dupleks-Rankine soğutma sistemleri
- Okyanus termal enerji dönüşümü sistemleri
- Düşük sıcaklık atık ısı geri kazanımı uygulamaları
- Biyokütle kombine ısı-güç santralleri
- Jeotermal enerji santralleri

Modüler güneş termal enerji ve güneş gölet güç sistemleri, kanıtlanmış olmalarına rağmen henüz yaygın olarak benimsenmemiştir. Güneş ters osmoz tuzdan arındırma sistemleri, hala araştırma aşamasındadır. Dupleks-Rankine soğutma sistemleri, soğurma için daha az hareketli parça gerektiren soğutma sistemlerinin ve daha çevre dostu malzemelerin kullanımının tercih edilmesiyle nerdeyse terk edilmiştir. Okyanus termal enerji dönüşümü (OTED) sistemleri, yoğun olarak araştırılmıştır ve deniz suyu termodinamik karakteristikleri elverişli olan izole edilmiş adalar için geleceğin büyük teknolojisidir. Düşük sıcaklık atık ısı geri kazanımı uygulamaları, sanayide ve kombine çevrimli güç santrallerindeki büyük potansiyeli ile mevcut ORÇ uygulamaları içinde en hızlı büyüyen alandır. Biyokütle kombine ısı-güç ve jeotermal enerji santralleri, zaten olgun durumdadır.

Güneşin gün boyu takip edilerek ışınımının çeşitli tip ve boyutlardaki kolektörler aracılığıyla yansıtılarak bir doğru ya da bir nokta üzerinde yoğunlaştırılmasıyla elde edilen yüksek sıcaklıktaki ısının, (bir güç çevrimiyle elektrik üretiminde kullanılmak amacıyla) bir akışkana transfer edilmesi şeklinde tanımlanabilen yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojisi, iyi bilinen ve kanıtlanmış bir teknolojidir. Üç ana tür yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojisi vardır [1]. Bunlar;

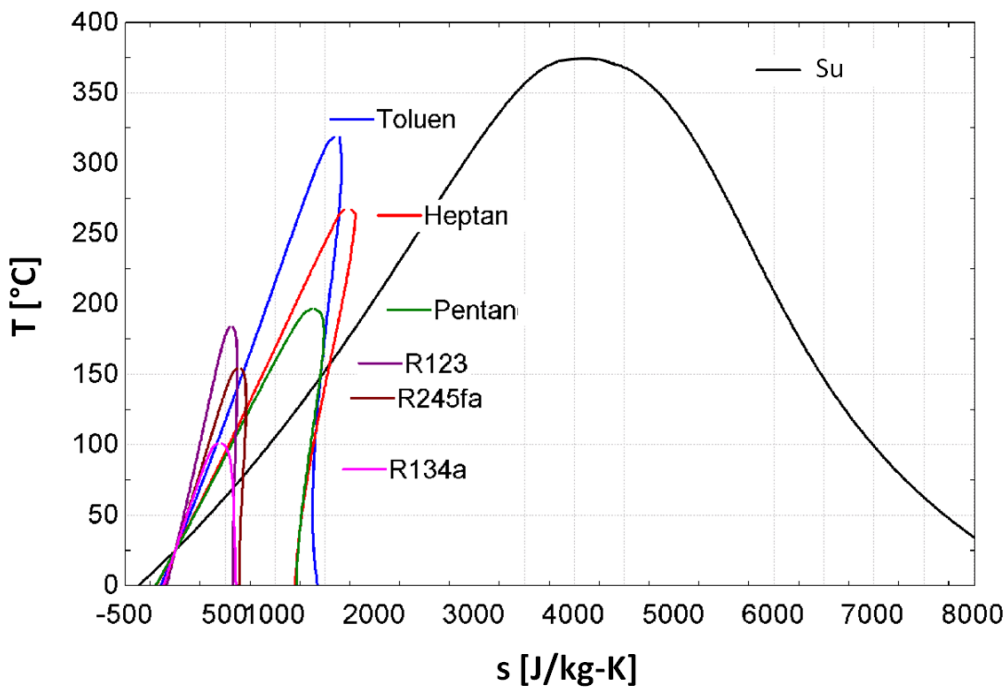
- Parabolik çanak kolektör
- Merkezi kule alıcı
- Parabolik oluk kolektör

'dür. Güneş ışınımının noktasal olarak yoğunlaştırıldığı parabolik çanak kolektör ve merkezi kule alıcı teknolojileriyle (yüksek yoğunlaştırma oranı dolayısıyla) daha yüksek sıcaklıklara ulaşılır. Bu tür teknolojiler için en uygun güç çevrimleri; Stirling motoru (küçük ölçekli santraller için), buhar çevrimi ve kombine çevrimdir (merkezi kule alıcılar için). Güneş ışınımının doğrusal bir alıcı üzerinde yoğunlaştırıldığı parabolik oluk kolektör teknolojisi ise görece daha düşük (< 400 °C) çalışma sıcaklıkları için uygundur. Parabolik oluk kolektör teknolojisinin kullanıldığı yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde, şimdiye kadar ağırlıklı olarak yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gerektiren buhar çevrimi kullanılmıştır. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri, olgun durumdaki biyokütle ve jeotermal enerji kaynaklı güç santralleri ile aynı sınırlamalara tabi olduğundan, karlı olabilmeleri için güç üretim kapasiteleri (> 10 MW_e) yüksek olan büyük ölçekli santraller şeklinde kurulmuştur. Düşük çalışma sıcaklıkları için geleneksel Rankine çevrimine göre daha uygun olan ORÇ, güç üretim kapasiteleri kW mertebesinde olan (özellikle Fresnel doğrusal yansıtıcı tip kolektör teknolojisi uygundur) küçük ölçekli yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinin kurulmasına olanak vermesiyle, güneş termal enerji sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerini azaltmak için umut vaat eden bir teknolojidir. Şimdiye kadar kurulmuş olan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri içinde, ORÇ teknolojisini kullanan çok az sayıda yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali mevcuttur [1]. Bunlar;

- 2006'da ABD'nin Arizona eyaletinde Solargenix Energy tarafından kurulan, 1MW net elektrik üretim kapasitesine sahip olan, parabolik oluk kolektörlü bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali,
- 2009'da ABD Hawaii'de ElectraTherm tarafından devreye sokulan, 100 kW_e üretim kapasiteli bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali,
- 2010'da Lesotho'nun elektrik şebekesine bağlı olmayan uzak kırsal alanlarında STG International tarafından kurulan, çok küçük ölçekli (1 kW_e gibi) mikro yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleridir.

1.2 Organik Rankine Çevrimi (ORÇ)

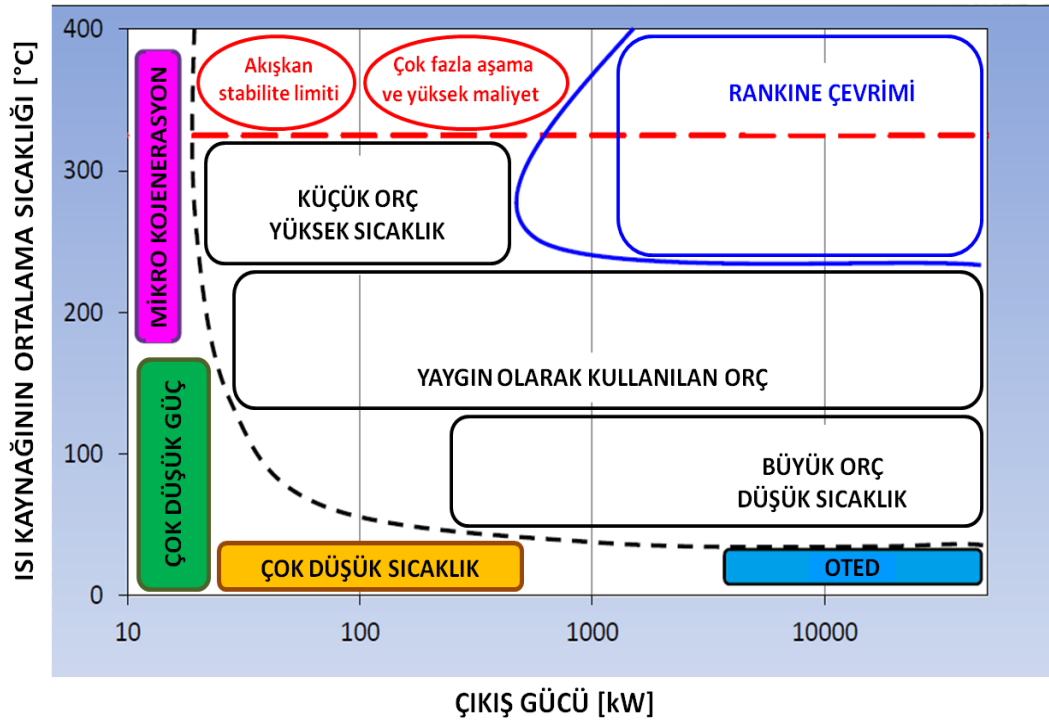
Geleneksel Rankine çevrimi ile benzer olan ORÇ; çalışma akışkanı olarak, sudan daha yüksek molekül kütlesine sahip ve suya göre daha düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen karbon esaslı organik bileşiklerin kullanıldığı bir termodinamik çevrimdir. ORÇ'nin farklı uygulama alanları için kullanılacak pek çok sayıda çalışma akışkanı mevcuttur [2,3]. ORÇ'nde kullanılan bazı (toluen, heptan, pentan, R123, R245fa, R134a) çalışma akışkanları ile suya ait sıcaklık-entropi diyagramları Şekil 1.1'de gösterilmiştir [4].



Şekil 1.1: ORÇ'nde kullanılan bazı çalışma akışkanları ile suya ait sıcaklık-entropi diyagramları.

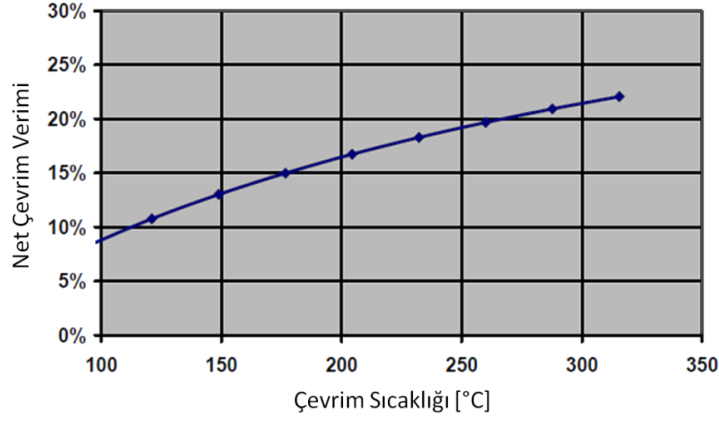
Su için negatif bir eğimi olan doymuş buhar eğrisi, organik bileşikler için ise çok daha diktir. Dolayısıyla, geleneksel Rankine çevriminde mevcut olan genişleme prosesinin sonundaki buhar kalitesi sınırlamasının ortadan kalktığı ORÇ'nde, buhar fazındaki çalışma akışkanının türbine girmeden önce aşırı ısıtılmasına gerek yoktur. Doymuş sıvı ve doymuş buhar eğrileri arasındaki entropi farkı suya göre çok daha küçük olan organik bileşiklerin buharlaşma entalpisi de sudan daha küçüktür. Bu yüzden evaporatör aracılığıyla aynı termal gücü elde etmek için, ORÇ'nde kullanılan çalışma akışkanlarının kütle akış hızlarının suya göre daha yüksek olması gerekir. Bu durum ORÇ'nde daha yüksek pompa sarfiyatına neden olur.

Farklı uygulama alanları mevcut olan ORÇ, 1970'lerin sonundan beri iyi bilinen ve bugüne kadar ağırlıklı olarak çeşitli endüstri (demir-çelik, alüminyum, çimento, rafineri, gıda, cam, kimya gibi) tesislerindeki yanma sistemlerinde, proseslerde ve soğutmalarda oluşan atık ısıların geri kazanımı uygulamalarında ya da yenilenebilir enerji (biyokütle, jeotermal, güneş termal gibi) güç üretim sistemlerinde kullanılan bir teknolojidir. Önümüzdeki yıllarda ise özellikle güneş termal enerji ve atık ısı geri kazanımı uygulamalarında büyük artışlar beklenmektedir. ORÇ, geleneksel Rankine çevrimine göre daha düşük verimli olmasına rağmen sahip olduğu birçok avantajla düşük sıcaklıklardaki (özellikle 100 °C ila 320 °C aralığında) atık ısı geri kazanımı ve sınırlı bir çıkış gücü (< 1 MW_e) olan yenilenebilir enerji güç sistemleri için ekonomik bakımdan daha uygundur. Bununla birlikte organik çalışma akışkanının maliyeti ve zamanla bileşiminde oluşan ayrışmalar ile çalışma sıcaklığı aralıkları, ORÇ'nin birincil dezavantajlarıdır [5,6,7]. ORÇ'nin kullanımının uygun olduğu sıcaklık ve güç aralıkları, Şekil 1.2'de gösterilmiştir [8].



Şekil 1.2: ORÇ için uygun kullanım aralıkları.

ORÇ'nde çevrim sıcaklığı ile değişen net çevrim verimi de, Şekil 1.3'te gösterilmiştir [5].



Şekil 1.3: ORÇ’nde çevrim sıcaklığı-net çevrim verimi ilişkisi.

ORÇ ile çalışan bir güç bloğunun teknik ve operasyonel avantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir [9].

Teknik avantajları:

- Düşük basınçta çalışma
- Yüksek çevrim verimi
- Çok yüksek türbin verimi (% 90’a kadar)
- Türbinin düşük çevresel hızı nedeniyle, türbinde düşük mekanik gerilme
- Düşük devirli türbinin, dişli olmadan doğrudan jeneratöre bağlanabilmesi
- Türbinin buhar nozullarında nem olmaması sayesinde, türbin kanatlarının aşınmaması

Operasyonel avantajları:

- Basit çalıştırma ve durdurma işlemleri
- Otomatik ve kesintisiz çalışabilme
- Operatör gerektirmeme
- Sessiz çalışma
- Yüksek kullanılabilirlik
- Kısmi yükte çalışırken bile yüksek verim
- Düşük işletim ve bakım gereksinimleri
- Uzun ömür (20 yıldan fazla)

ORÇ ile çalışan ve farklı uygulama alanları için farklı güç üretim kapasitelerine sahip olan çeşitli boyutlardaki güç bloklarının başlıca üretici firmaları, Çizelge 1.1’de verilmiştir [8,10].

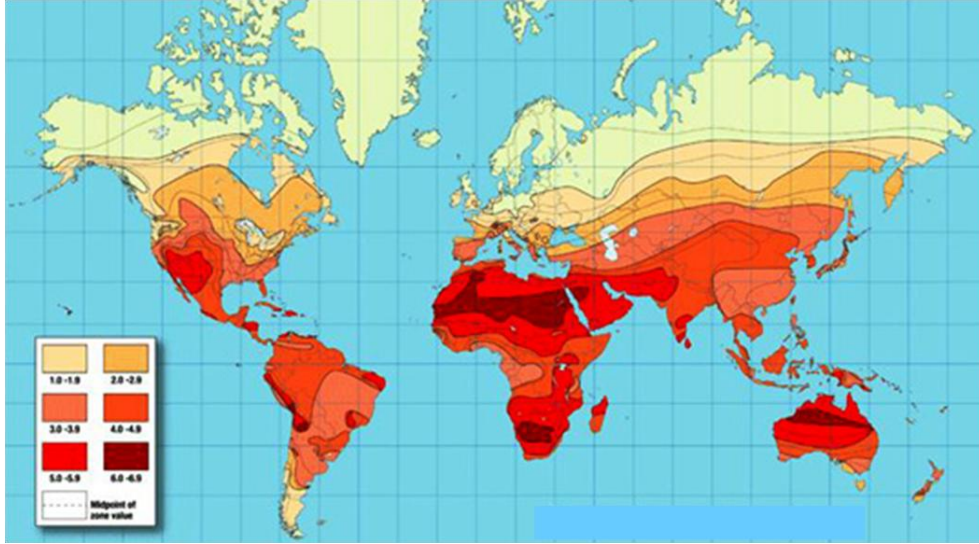
Çizelge 1.1: ORÇ ile çalışan çeşitli boyutlardaki güç bloklarının başlıca üretici firmaları, uygulama alanları ve güç üretimi aralıkları.

Üretici Firma	Uygulama Alanı	Güç Üretimi [kW]
Infinity Turbine	Jeotermal, Atık ısı	10-250
Barber-Nichols	Jeotermal, Atık ısı, Güneş termal	15-6000
ElectraTherm	Atık ısı, Biyogaz, Güneş termal	35-110
Tri-O-Gen	Biyokütle, Biyogaz, Atık gaz	95-160
Calnetix (GE)	Atık ısı	125
Turboden	Biyokütle, Jeotermal, Atık ısı	200-15000
Ormat	Jeotermal, Atık ısı, Güneş termal	250-20000
UTC Power	Jeotermal, Atık ısı	280
Adoratec	Biyokütle	300-2400
GMK	Biyokütle, Jeotermal, Atık ısı	500-15000

1.3 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşte meydana gelen nükleer füzyon (hidrojen çekirdeklerinin birleşerek helyum'a dönüşmesi) tepkimeleri sonucu açığa çıkar ve tüm dünyada mevcuttur (Dünya güneş ışınımı haritası Şekil 1.4'te gösterilmiştir). Ancak, güneş ışınımı dünya atmosferi dışında görece sabit (ortalama olarak 1367 W/m^2) olmasına rağmen coğrafi konum ve bölgesel iklim koşulları, dünya yüzeyine ulaşan güneş ışınımında büyük farklılıklara neden olur. Ayrıca güneşin dünyaya göre göreceli hareketi, aynı yerde farklı yönlerdeki yüzeylerle farklı miktarlarda güneş enerjisi yakalanmasına olanak verir.

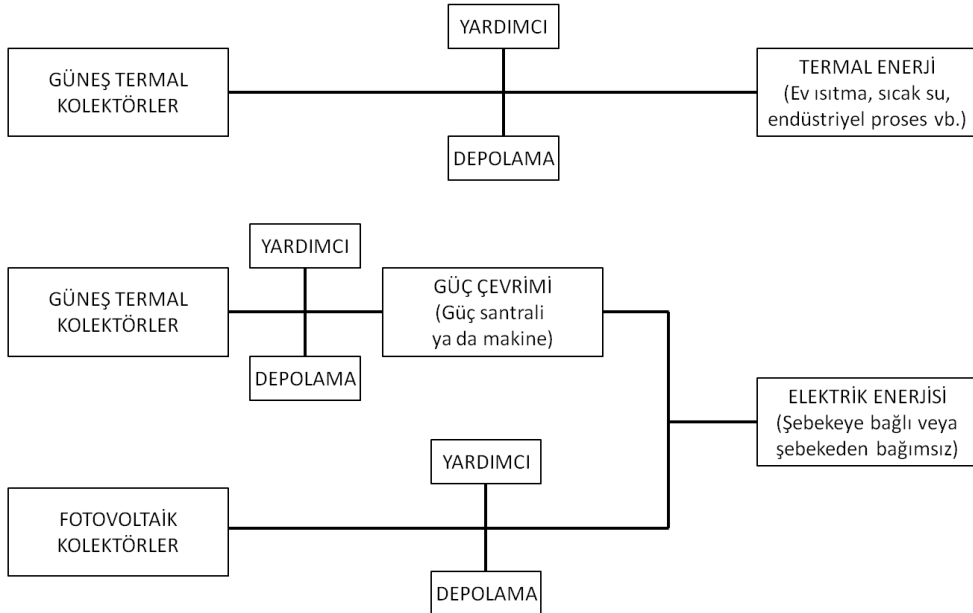
Herhangi bir yerde kurulması planlanan bir güneş enerjisi dönüştürme sisteminin tasarım sürecindeki en önemli faktör, güneş enerjisinden elde edilecek kullanılabilir enerjinin ekonomik olup olmayacağıdır. Bu yüzden sistemi kurmak için seçilen yerde belirli konumlarda mevcut olan güneş enerjisinin miktarı ve kalitesi hakkında bilgi sahibi olmak, bir güneş enerjisi dönüştürme sistemi tasarımı için birinci derecede öneme sahiptir [11].



Şekil 1.4: Dünya güneş ışınımı haritası [12].

1.4 Güneş Enerjisi Dönüştürme Sistemleri

Güneş enerjisi; ev-işyeri ısıtmasında, sıcak su ihtiyacının karşılanmasında, elektrik üretiminde ve hidrojen yakıtı üretiminde kullanılabilir. Güneş enerjisini kullanılabilir bir enerji formuna dönüştüren farklı türde pek çok pasif veya aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemi vardır. Aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemleri içinde en temel üç tür, blok diyagramı olarak Şekil 1.5'te gösterilmiştir [11].



*YARDIMCI: Yardımcı enerji kaynağı

Şekil 1.5: Temel aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemleri.

Şekil 1.5'te ilk olarak gösterilen tür aktif güneş enerjisi dönüştürme sisteminde, güneş enerjisi termal kolektörler aracılığı ile yakalanır ve ev ısıtma, sıcak su, endüstriyel proses vb. için talep edilen termal enerji ihtiyacını sağlamak üzere ısıya dönüştürülür. Genelde bu tip sistemler güneş ışığının olmadığı zamanlarda talebi karşılayabilmek için yardımcı bir enerji kaynağı ile desteklenir ve/veya tercihe göre termal depolama da içerebilir.

Diğer iki tür aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemi de eğer talep edilen, ısı yerine elektrik ise güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Yöntemlerden birincisi termal kolektörler aracılığı ile ısı olarak toplanan güneş enerjisinin ısı değiştirici, türbin ve jeneratör kullanılarak bir güç çevrimiyle elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. İkinci yöntem ise fotovoltaiik hücrelerden oluşan kolektörler kullanılarak güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesidir.

Elektrik iletim şebekelerine çift yönlü olarak bağlı olan aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemleri için hiç bir depolama veya yardımcı enerji kaynağına gerek yoktur. Eğer aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemi şebekeden bağımsız ise hem depolama hem de yardımcı enerji kaynağı ile desteklenebilir. Termal sistemler ile elektrik üretiminde, elektrik depolama yerine ısı depolama seçilirse sistemin faaliyet süresi uzatılabilir. Yardımcı enerji kaynağı, sisteme enerji dönüşümünden önce ısı ya da sonra elektrik olarak verilebilir. Fotovoltaiik sistemler ile elektrik üretiminde ise ihtiyaçtan fazla üretilen elektrik, akülerde depolanabilir ve böylece sistemin faaliyet süresi uzatılabilir. Sistem yardımcı bir enerji kaynağı ile desteklenmek istenirse de tek seçenek, harici bir elektrik kaynağıdır.

1.5 Güneş Termal Kolektörler

Aktif güneş enerjisi dönüştürme sistemlerindeki en önemli unsur olan güneş kolektörleri (termal veya fotovoltaiik), üzerlerine gelen güneş ışınımını yakalar ve onu kullanılabilir bir enerji formuna (ısı ya da elektrik) dönüştürürler. Güneş termal kolektörler yüzeylerine düşen güneş ışınımını, tiplerine ve yüzey özelliklerine göre belli oranda emerek ya da yansıtarak ısıya dönüştürürler ve bu ısıyı, kolektör boyunca uzanan boru veya borular içinden akan bir ısı transfer akışkanına (genelde hava, su ya da termal yağlar kullanılır) transfer ederler. Bir çeşit ısı değiştiricisi olan

güneş termal kolektörler ile güneş ışınımından sonuçta elde edilen kullanılabilir ısı enerjisi, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\text{Kullanılabilir Isı Enerjisi} = \text{Kolektör Yüzeyine Düşen Güneş Işınımı} \times \text{Kolektör Yüzeyinin Verimliliği} - \text{Isı Transferi Sırasında Olan Kayıplar}$$

Güneş termal kolektörler temelde, hareketlerine ve çalışma sıcaklıklarına göre Çizelge 1.2’de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.

Çizelge 1.2: Güneş termal kolektör tipleri [13].

Hareket	Kolektör Tipi	Alıcı Yüzey	Yoğunlaştırma Oranı*	Çalışma Sıcaklığı Aralığı [°C]
Sabit	Düz Plaka Kolektör	Düz	1	30-80
Sabit	Vakumlu Tüp Kolektör	Düz	1	50-200
Sabit	Bileşik Parabolik Kolektör	Doğru	1-5	60-240
Tek Eksenli İzleme	Bileşik Parabolik Kolektör	Doğru	5-15	60-300
Tek Eksenli İzleme	Fresnel Doğrusal Yansıtıcı	Doğru	10-40	60-250
Tek Eksenli İzleme	Silindirik Oluk Kolektör	Doğru	15-50	60-300
Tek Eksenli İzleme	Parabolik Oluk Kolektör	Doğru	10-85	60-400
İki Eksenli İzleme	Parabolik Çanak Kolektör	Nokta	600-2000	100-1500
İki Eksenli İzleme	Merkezi Kule Alıcı ve Heliostat Alan	Nokta	300-1500	150-2000

*Yoğunlaştırma oranı = Açıklık alanı / Alıcı yüzey

Çevre sıcaklığı ve rüzgar hızı; yere, zamana ve atmosfer koşullarına bağlı olarak değişir. Bu nedenle güneş termal kolektörlerin yüzeylerine düşen belli bir değerdeki güneş ışınımından elde edilen kullanılabilir ısı enerjisini arttırmak için;

- Çevreye olan ısı kayıpları azaltılabilir.
- Kolektör yüzeyinin verimliliği artırılabilir.
- Isı transfer akışkanına olan ısı transferi artırılabilir.

Güneş termal kolektörler içinde en yaygın kullanılan tip, bir örneği Şekil 1.6’da gösterilen düz yüzeyli plaka tipi güneş termal kolektörlerdir. Bu tip kolektörlerin konstrüksiyonları basit, kurulumları kolay ve işletim maliyetleri azdır. Maksimum güneş enerjisi alacak biçimde genelde sabit ve eğimli (kuzey yarıkürede güneye doğru eğimli) olarak yerleştirilen düz yüzeyli plaka tipi güneş termal kolektörlerin yüzeyleri; krom, nikel, bakır, alüminyum gibi malzemelerden yapılmış, koyu renkli, ince, emici plakalar ile kaplıdır. Bu plakalar, üzerlerine düşen güneş ışınımını emerek ısı enerjisine dönüştürürler. Çevreye olan ısı kaybını azaltmak ve opak yalıtım sağlamak için de emici plakaların önüne ve arkasına, bir veya daha fazla şeffaf (cam veya plastik) plaka yerleştirilir.



Şekil 1.6: Düz yüzeyli plaka tipi güneş termal kolektör [14].

Düz yüzeyli güneş termal kolektörler ile sadece kolektör yüzeyine gelen direkt güneş ışınımından değil, aynı zamanda difüze güneş ışınımından da faydalanılır. Difüze güneş ışınımı; güneş ışınımının, dünya atmosferine girdikten sonra hava, su molekülleri ve atmosfer içindeki toz tarafından yayılmış kısmıdır.

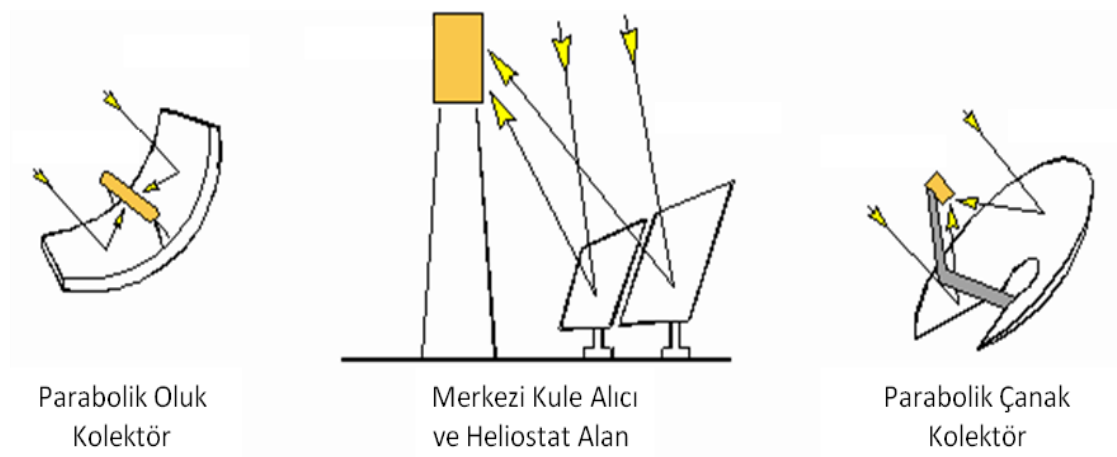
Güneş termal kolektörlerden, üzerlerine düşen güneş ışınımından maksimum oranda faydalanması beklenir. Bu yüzden düz yüzeyli güneş termal kolektörlerin yanında güneş ışınımını yoğunlaştıran güneş termal kolektörler önemli bir yer tutar [15].

- Güneş enerjisinden dönüştürülen kullanılabilir enerjinin, özellikle termal enerjinin sıcaklık seviyesini yükseltmek,

- Isı kayıpları olan kolektör yüzeyini küçülterek kolektörün verimini arttırmak,
- Daha ucuz ve kullanışlı bir kolektör oluşturmak

için yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörler kullanılabilir. Düz yüzeyli güneş termal kolektörler için kullanılan kavram ve tanımlar yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörler için de kullanılabilir. Bununla birlikte bazı yeni kavramların göz önüne alınması ve yeni tanımların yapılması da gereklidir.

Güneş termal kolektörlerde güneş ışınlarının düştüğü net alana açıklık alanı, güneş ışınımının emilerek diğer bir enerji formuna dönüştürüldüğü yüzeye alıcı yüzey denilmektedir. Düz yüzeyli güneş termal kolektörlerde açıklık alanı ile alıcı yüzey birbirine eşittir (yani yoğunlaştırma oranı = 1'dir). Yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörlerde ise güneş ışınımı alıcı yüzeye gelmeden önce optik olarak yoğunlaştırılır ve böylece açıklık alanından daha küçük bir alıcı yüzey yeterli olur. Alıcı yüzeyin küçültülmesiyle de ısı kayıpları azaltılabilir. Aynı açıklık alanına gelen güneş ışınımından, düz yüzeyli güneş termal kolektörlerle yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörlerden daha fazla miktarda faydalanılabilir. Ancak yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörlerle, tipine bağlı olarak değişmekle birlikte daha yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir. Bu şekilde sıcaklık seviyesinin artmasıyla da ısı enerjisi olarak kullanılabilir enerji artar. Yüksek sıcaklıklara ulaşmak için güneş enerjisini yoğunlaştıran güneş termal kolektörlerden, yaygın olarak kullanılan üç tip Şekil 1.7'de gösterilmiştir [11].



Şekil 1.7: Yoğunlaştırıcı güneş termal kolektör tipleri.

Yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörlerle kolektör yüzeyine gelen direkt güneş ışınımı, yansıtıcı veya ışın-kırıcı yüzey ile bir noktaya ya da bir doğruya yoğunlaştırılabilir. Noktaya yoğunlaştırmada küresel simetri vardır ve yüksek sıcaklık istenen durumlarda kullanılır. Doğruya yoğunlaştırma ise silindirik simetriye sahiptir ve orta derecede sıcaklık istenen durumlarda kullanılır. İstenen sıcaklığın yanında, izleme mekanizması da yoğunlaştırıcı güneş termal kolektör tipinin seçiminde önemli rol oynar. Güneş ışınımını bir noktaya yoğunlaştırmak için güneş ışınlarının gün boyunca takip edilmesi ve dolayısıyla iki serbestlik dereceli izleme mekanizması gerekirken, güneş ışınımını bir doğru üzerinde yoğunlaştırmak için bir boyutlu hareketle güneşi takip etmek yeterli olur.

Teorik olarak düz yüzeyli güneş termal kolektörlerden daha ucuz ve kullanışlı olacağı düşünülen yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörlerin, sahip oldukları donanımlardan (optik ve izleme mekanizmaları gibi) dolayı maliyetlerinin artması kullanılmalılarını sınırlar. Dolayısıyla yoğunlaştırıcı güneş termal kolektörler, güneşlenme süresinin uzun olduğu yerlerde ve yüksek sıcaklık istenen durumlarda kullanıldıklarında ekonomik olabilirler [15].

1.6 Güneş Termal Enerji Teknolojisi

18. yüzyılda Avrupa’da demir-bakır gibi metalleri eritmek için kullanılan çeşitli güneş fırınları ile güneş enerjisinin kullanılabilir enerjiye dönüştürülmesinin ilk uygulamaları arasında yer alan güneş termal enerji sistemlerine olan ilgi, 1970’lerdeki petrol kriziyle birlikte fosil yakıtları desteklemek için başlayan alternatif enerji kaynakları arayışına kadar ihmal edilebilir boyutta olmuştur. O zamana kadar daha çok küçük ölçekli mekanik uygulamaları (çıkış gücü 100 kW’a kadar olan su pompalama sistemleri gibi) olan güneş termal enerji sistemleriyle elektrik üretmek amacıyla ABD’de, deneysel olarak büyük ölçekli birkaç tane yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali inşa edilmiş ve işletilmiştir. Bu santrallerden başarılı sonuçlar alınması, yapılan araştırmalar ve teknolojik gelişmelerle birlikte son yıllarda, dünyanın değişik yerlerinde (ABD, İspanya, Kuzey Afrika, Orta Doğu gibi) birbirinden farklı tür teknoloji kullanan ve farklı miktarlarda elektrik üretim kapasitesine sahip, birçok ticari yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali kurulmuş ve kurulmaya devam etmektedir [16].

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan başlıca teknolojiler;

- Parabolik oluk kolektör
- Fresnel doğrusal yansıtıcı
- Merkezi kule alıcı ve Heliostat alan
- Parabolik çanak kolektör

‘dür. Bu teknolojilere ait performans karakteristikleri Çizelge 1.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 1.3: Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinin performans karakteristikleri [17].

Teknoloji	Kapasite Aralığı [MW]	Yoğunlaştırma Oranı	Güneş Enerjisinden Maksimum Faydalanma [%]	Faydalanılan Güneş Enerjisinden Üretilen Elektrik [%]	Kullanılan Alan [m ² /MWh-yıl]
Parabolik Oluk Kolektör	10-200	70-80	21	10-15	6-8
Fresnel Doğrusal Yansıtıcı	10-200	25-30	20	9-11	4-6
Merkezi Kule Alıcı Heliostat Alan	10-150	300-1000	20	8-10	8-12
Parabolik Çanak Kolektör	0,01-0,4	1000-3000	29	16-18	8-12

1984 ve 1990 yılları arasında ABD Kaliforniya Mojave Çölü’nde inşa edilen; 14 MW_e (1 adet), 30 MW_e (6 adet) ve 80 MW_e (2 adet) üretim kapasitelerine sahip olan toplam 9 ticari yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralinde, parabolik oluk kolektör teknolojisi (Şekil 1.8’de gösterilmiştir) kullanılarak elde edilen termal enerjiden, geleneksel Rankine çevrimiyle yaklaşık 0,10 \$/kWh’e elektrik üretilebilmektedir. Fosil kaynaklı enerji üretim maliyetleri ise 0,04-0,06 \$/kWh arasında değişmektedir. Dolayısıyla parabolik oluk kolektör teknolojisi, bugün mevcut olan güneş termal enerji teknolojileri içinde en olgun ve en düşük maliyetli teknolojidir [18,19].

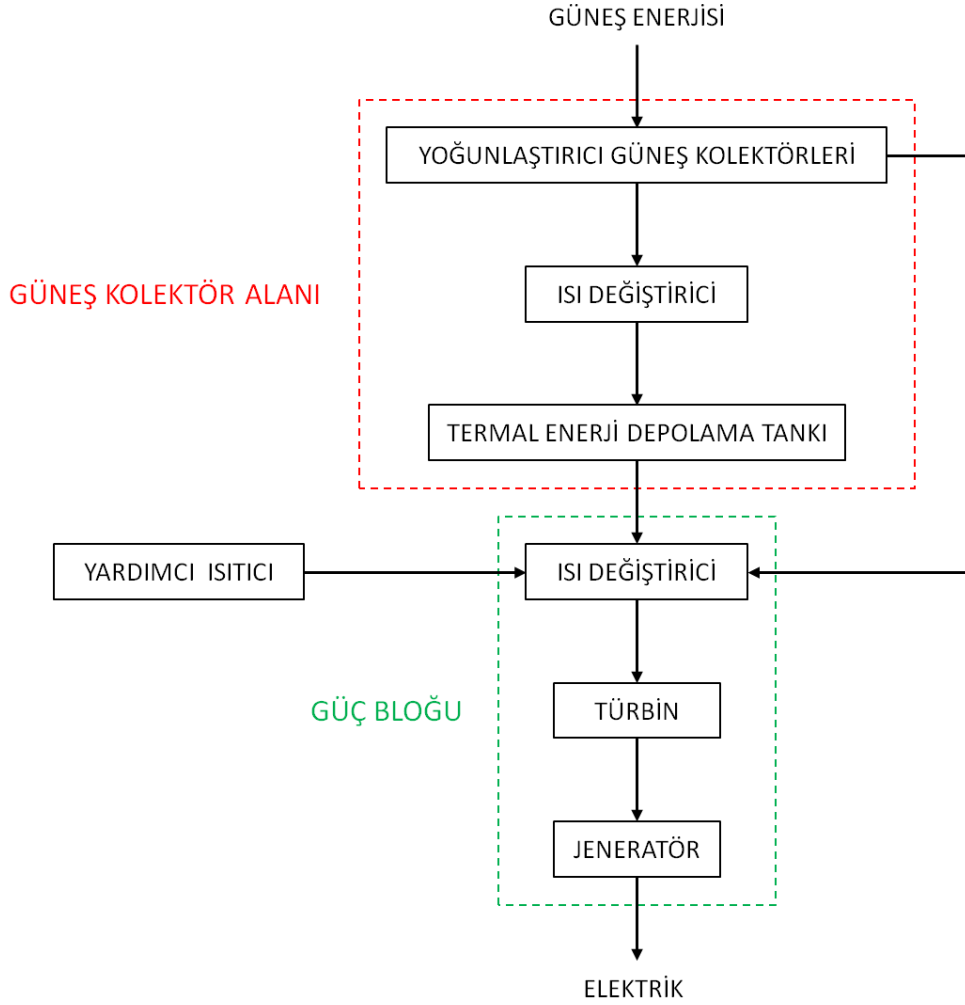


Şekil 1.8: Kaliforniya Mojave Çölü'ndeki parabolik oluk kolektör düzenekleri [20].

1.7 Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Santralleri

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri, çeşitli tip yansıtıcı yüzey ve alıcıdan oluşan kolektör düzenekleri kullanarak güneş enerjisini yüksek sıcaklıklarda ısıya dönüştürür ve bu ısıdan geleneksel bir buhar türbini ve jeneratör aracılığıyla elektrik üretir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri temelde iki ana kısımdan oluşur. Bunlar; güneş enerjisinin toplandığı ve ısıya dönüştürüldüğü güneş kolektör alanı (seçime bağlı olarak termal enerji depolama sistemini de içeren) ve ısı enerjisinin bir termodinamik güç çevrimi ile elektriğe dönüştürüldüğü güç bloğudur. Eğer gerekiyorsa güç bloğu yardımcı bir enerji kaynağı ile desteklenebilir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerindeki elektrik üretimi, blok diyagramı olarak Şekil 1.9'da gösterilmiştir [21].

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde kullanılan yoğunlaştırıcı güneş kolektörleri, yalnızca yüzeylerine gelen direkt güneş ışınımını yakalar ve onu yansıtarak bir alıcıda yoğunlaştırır. Üzerinde yoğunlaştırılan güneş ışınımını emerek ısınan alıcı, bu ısıyı içindeki ısı transfer akışkanına transfer eder. Varsa termal depolama sisteminden geçen ısı transfer akışkanı, borular aracılığıyla taşınarak güç bloğundaki ısı değiştiricisine ulaşır ve ısınıp güç çevriminde kullanılan çalışma akışkanına transfer eder. Isınarak buhar fazına geçen çalışma akışkanı da türbin-jeneratör sistemini çalıştırır ve böylece elektrik üretilir.

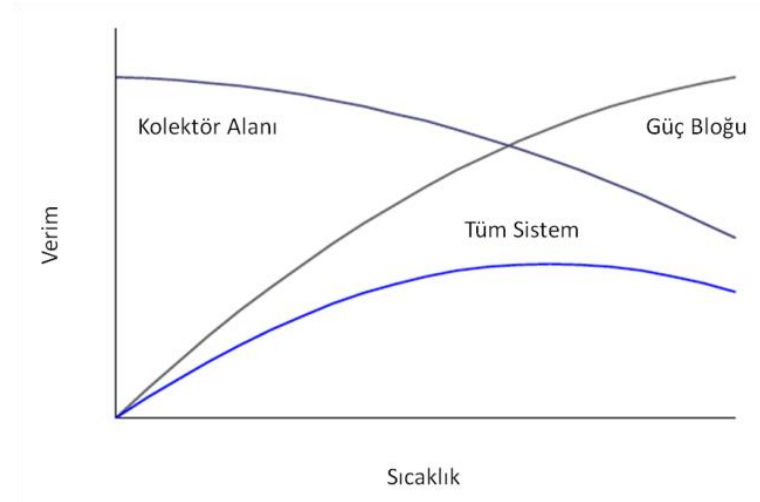


Şekil 1.9: Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde elektrik üretimi.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri, şebekeden bağımsız ya da şebekeye bağlı olarak 10 kW'tan 100 MW'a kadar farklı elektrik üretim kapasitelerinde olabilirler. Ayrıca doğalgaz, jeotermal gibi enerji kaynakları ile kombine edilebilirler. Şebekeden bağımsız olan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri, güneş ışımının çok olduğu zamanlarda ürettikleri fazla termal enerjiyi çeşitli yöntemlerle depolayarak, gündüzleri güneş ışığının yeterli olmadığı zamanlarda ve geceleri kullanarak daha verimli olabilirler [22].

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinin tasarımındaki en büyük zorluk ise sistem için optimum çalışma sıcaklığını belirlemektir. Çalışma sıcaklığı arttıkça güç bloğunun verimi artarken, kolektör alanının verimi azalır (Şekil 1.10'da eğri şeklinde gösterilmiştir). Bu yüzden güç bloğundaki türbin için istenilen giriş sıcaklığını sağlayacak sayıda yoğunlaştırıcı güneş kolektör düzeneği kullanılmalıdır. Belirlenen

çalışma sıcaklığına ulaşmak için de yoğunlaştırıcı güneş kolektör düzenekleri ile elde edilen ısının, güneş kolektör alanındaki ısı kayıplarından fazla olması gerekir.



Şekil 1.10: Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde sıcaklık-verim ilişkisi [23].
Güneş kolektör alanındaki kolektör düzenekleri ile elde edilen net ısı miktarı, aşağıdaki parametrelere bağlı olarak değişir [19]:

- Direkt normal güneş ışınımı (DNI)
- Çevre sıcaklığı
- Rüzgar hızı
- Kolektör düzeneklerinin boyutu ve sayısı
- Güneşin konumu ve kolektör düzeneklerinin güneşi takip hareketi
- Isı transfer akışkanının tipi, kolektör alanına giriş sıcaklığı ve hacimsel akış oranı
- Termal, optik ve parazitik kayıplar

Belirlenen çalışma sıcaklığına ulaşıldığı zaman da güneş kolektör alanında üretilen termal enerji, borularla güç bloğuna aktarılır.

1.8 Parabolik Oluk Kolektör Düzenekleri

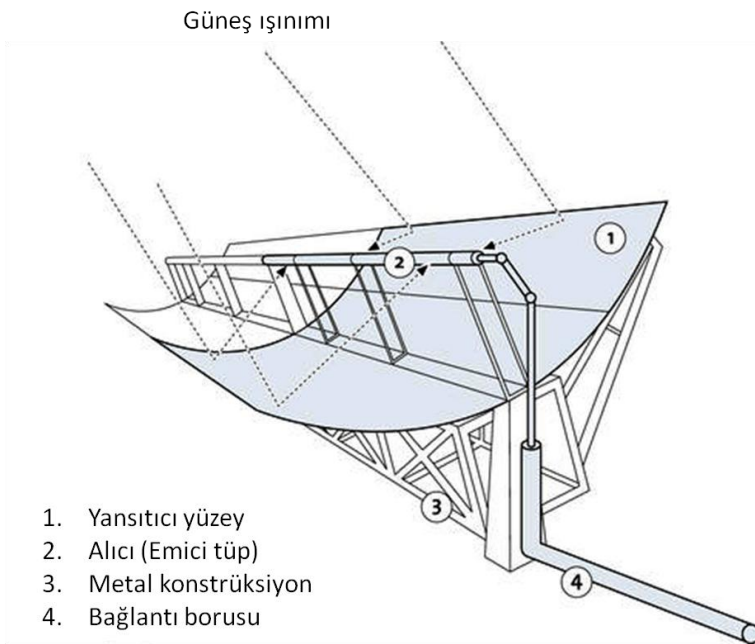
Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde en çok tercih edilen tür teknoloji, parabolik oluk kolektör teknolojisidir. Parabolik oluk kolektörlerin kullanıldığı yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde, güneş kolektör alanının boyutuna ve yerleşim planına bağlı olarak belli boyutta ve sayıda parabolik oluk kolektör

düzenekleri (Şekil 1.11’de gösterildiği gibi) kullanılır. Bir parabolik oluk kolektör düzeneğini oluşturan bileşenler de Şekil 1.12’de gösterilmiştir.

Mevcut yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde kullanılan parabolik oluk kolektör düzenekleri; Luz, EuroTrough (European Commission Project), Acciona Solar Power (Solargenix Energy), Flagsol (Solar Millennium), Sener, Albiasa Solar, Solel Solar, Solarlite, IST Solucar (Abengoa), SkyFuel, Sopogy ve Siemens tarafından üretilen kolektörlerdir [24].



Şekil 1.11: Parabolik oluk kolektör düzenekleri [25].

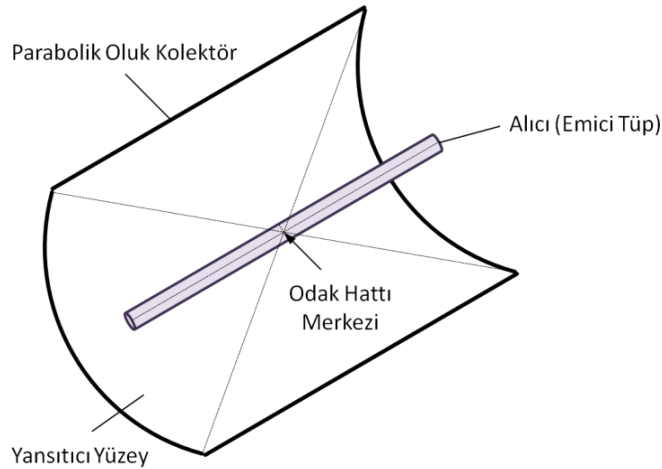


Şekil 1.12: Parabolik oluk kolektör düzeneğinin bileşenleri [26].

Parabolik oluk kolektör düzeneğinin yapısal iskeleti olan metal konstrüksiyon;

- Yansıtıcı yüzey ve alıcıyı destekleyerek optik hizada kalmalarını sağlar.
- Rüzgar gibi dış kuvvetlere karşı dayanıklılık sağlar.
- Yansıtıcı yüzey ve alıcının güneşi takip edebilmesi için kolektörün hareket etmesini sağlar.

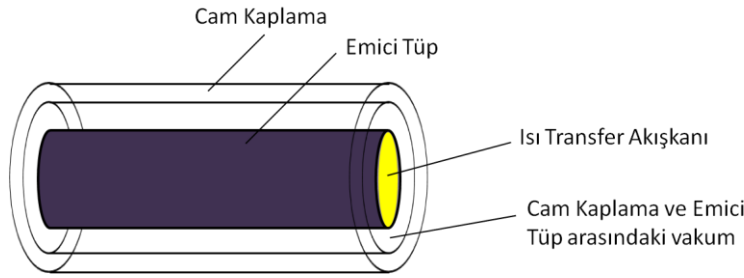
Parabolik oluk kolektör düzeneğinin en belirgin özelliği olan parabol şeklinde kavislendirilmiş yansıtıcı yüzey, kolektör yüzeyine gelen DNI'nın, kolektörün odak hattından geçen doğrusal alıcıda yoğunlaştırılmasını sağlar (Şekil 1.13'te gösterildiği gibi). Günümüzde geçerli olan tüm parabolik oluk kolektörlerde yansıtıcı yüzey olarak; Flabeg tarafından üretilen, alt yüzeyi 0,85 mm kalınlığında yansıtıcı gümüş bir film tabakasıyla kaplanmış olan, 4 mm kalınlığında ve yüksek geçirgenliğe sahip beyaz cam paneller kullanılmaktadır. Parabolik cam panelin alt yüzeyindeki yansıtıcı gümüş film tabakası, özel tip çok katmanlı boya kaplamasıyla da korunmaktadır. Bu yansıtıcı yüzeyler, üzerlerine gelen direkt güneş ışınımını yaklaşık olarak % 93,5 oranında yansıtmaktadırlar [27,28].



Şekil 1.13: Parabolik oluk kolektörde doğrusal alıcının konumu.

Parabolik oluk kolektörlerin yüksek verimliliğinin başlıca sebeplerinden biri, üzerinde yoğunlaştırılan güneş ışınımını yüksek derecede emen ve düşük ısı yayma özelliğine sahip olan doğrusal alıcıdır. Kolektörün ısı toplayıcı elemanı olan alıcı; güneş ışınımını seçici-emici dış yüzey kaplamasına sahip, silindirik simetride, paslanmaz çelikten bir emici tüptür ve yansıtıcı olmayan, içi vakumlu bir camla kaplıdır (Şekil 1.14'te gösterilmiştir). Emici tüpün içinde ısı transfer akışkanı vardır. Güneş enerjisiyle ısınan emici tüp, çevreye ve cam kaplamaya olan kayıplar

dışındaki ısını, ısı transfer akışkanına transfer eder. Vakumlu cam kaplamayla, yüksek çalışma sıcaklıklarındaki ısı kayıpları önemli ölçüde azaltılırken, emici tüpün seçici-emici dış yüzey kaplaması da oksitlenmeye karşı korunur. Cam kaplama ile emici tüp arasındaki vakumu muhafaza etmek ve termal genleşme farklarını karşılamak için de alıcının uç kısımlarında, özel contalar ve metal körükler kullanılır. Günümüzdeki önde gelen doğrusal alıcı üreticileri; Schott Glass, Solel Solar ve Siemens'tir [19,27].



Şekil 1.14: Parabolik oluk kolektörde kullanılan doğrusal alıcı.

Güneş kolektör alanındaki parabolik oluk kolektör düzeneklerinin, dengeli ve düzenli bir şekilde çalışmasını sağlayan unsurlar ise şunlardır [27]:

- Ayaklar ve temel (Kolektörü destekleyen metal konstrüksiyonun ayakları, kolektörün kendi ağırlığını taşıyacak ve üzerine etkiyen rüzgar kuvvetlerine karşı dayanıklı olacak şekilde, yeterli derinlikte olan beton bir temel üzerine monte edilir)
- Sürücü (Her bir kolektör düzeneğinde bulunan sürücü, gün boyunca güneşi takip etmek için kolektörü konumlandırır)
- Kontrolör (Her bir kolektör düzeneği, kolektörün çalışmasını kontrol eden kendi yerel kontrolörüne sahiptir)
- Kolektörlerin bağlantısı (Her biri bağımsız olarak hareket eden kolektör düzeneklerinin, doğrusal alıcılarını birbirine ve kolektör sıralarının sonundaki bağlantı borularına bağlamak için yalıtılmış esnek hortumlar ya da bilyeli eklem düzenekleri kullanılır)

Hangi tür olursa olsun tüm güneş enerjisi dönüştürme sistemlerinde, kullanılan kolektörlerin; yüksek performanslı, düşük maliyetli, güvenilir ve dayanıklı olması istenir. Bu hedeflere ulaşmak için bir parabolik oluk kolektör düzeneğinin sahip olması gereken özellikler ise şunlardır [28]:

- Yüksek optik ve takip hassasiyeti
- Düşük ısı kayıpları
- Üretim kolaylığı
- Azaltılmış ağırlık
- Rüzgar kuvvetleri için yüksek burulma ve eğilme rijitliği
- Azaltılmış bileşen sayısı
- Korozyon dayanımı
- Daha kompakt taşıma yöntemleri
- Azaltılmış konstrüksiyon montajı maliyeti
- Büyük açıklık alanı (Azaltılmış sürücü, kontrolör ve güç gereksinimleri)

1.8.1 Doğrusal alıcılar tarafından emilen güneş ışınımı

Parabolik oluk kolektörler, üzerlerine gelen güneş ışınımından yalnızca direkt güneş ışınımını yansıtarak doğrusal alıcı üzerinde yoğunlaştırırlar. Parabolik oluk kolektör düzeneklerinden oluşan bir güneş kolektör alanında, doğrusal alıcılar tarafından emilen güneş ışınımı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [19]:

$$\dot{Q}_{emilen} = DNI \cdot \cos(\theta) \cdot GAD \cdot \text{Sıra gölgesi} \cdot \text{Uç kaybı} \cdot \eta_{yüzey} \cdot \eta_{alıcı} \cdot GKA_{faydalanılan} \quad (1.1)$$

\dot{Q}_{emilen} : Doğrusal alıcılar tarafından emilen güneş ışınımı [W/m²]

DNI: Direkt normal güneş ışınımı [W/m²]

θ : Geliş açısı [derece]

GAD: Geliş açısı düzeltmesi (Geliş açısı arttıkça oluşan ek kayıplar için)

Sıra gölgesi: Sabah erken ve akşam geç saatlerde, birbirlerini gölgeleyen paralel kolektör sıraları için hesaplanmış olan performans katsayısı

Uç kaybı: Doğrusal alıcıların uçlarındaki kayıplar için hesaplanmış olan performans katsayısı

$\eta_{yüzey}$: Yansıtıcı yüzeylerdeki optik kusur ve kayıplardan hesaplanan yüzey verimliliği

$\eta_{alıcı}$: Doğrusal alıcılardaki optik kusur ve kayıplardan hesaplanan alıcı verimliliği

$GKA_{faydalanılan}$: Güneş kolektör alanında çalışır durumda bulunan ve faydalanılan kolektör oranı

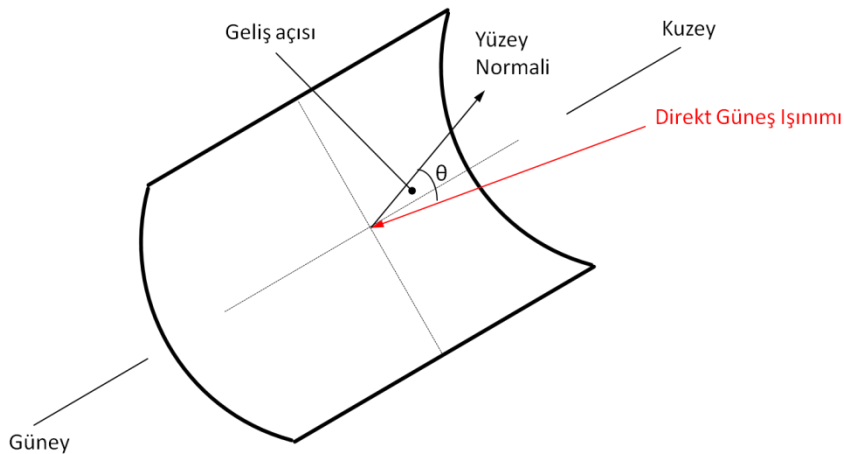
1.8.2 Direkt normal güneş ışınımı ve geliş açısı

DNI, Pirheliometre (Pyrheliometer) denilen bir cihaz kullanılarak ölçülür. 280-3000 nm arasındaki dalga boylarına duyarlı bir geniş bant cihazı olan Pirheliometre, güneş ışınlarına dik bir yüzey üzerine gelen güneş ışınımının direkt bileşenini ölçer. Ölçüm yapabilmek için daima güneşi hedef alması gereken bu cihaz, sahip olduğu izleme mekanizmasıyla sürekli güneş takip eder. Bir Pirheliometre cihazı örneği, Şekil 1.15'te gösterilmiştir [29].



Şekil 1.15: Pirheliometre.

Geliş açısı, kolektör yüzeyine gelen direkt güneş ışınımının kolektör yüzeyinin normali ile yaptığı açıdır ve Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



Şekil 1.16: Parabolik oluk kolektör yüzeyine gelen direkt güneş ışınımı ve geliş açısı.

Gün boyunca (ve aynı zamanda yıl boyunca) güneşin gökyüzündeki konumu, değişen atmosfer koşulları ve hava kütlesi nedeniyle atmosfer içinde yayınan (difüze) güneş ışınımı miktarı değişir. Bu yüzden kolektör yüzeyine gelen direkt güneş ışınımının yönü de miktarı da zamanla değişir. Kolektörlerin üzerlerine gelen direkt güneş ışınımından maksimum oranda faydalanabilmesi için kolektörün yüzey normalinin, kolektörün yüzeyine gelen direkt güneş ışınımı ile aynı doğrultuda olması (yani $\theta = 0^\circ$) gerekir. Bu nedenle geliş açısı mümkün olduğu kadar minimize edilmelidir. Kolektörlerin performansı üzerinde büyük etkisi olan geliş açısını minimize etmek için kolektör düzenekleri, sahip oldukları tek ya da iki eksenli izleme mekanizmalarıyla sürekli güneş takip ederler [19].

Dikey eğimi olmayan düz bir zemine, kuzey-güney doğrultusunda yatay olarak yerleştirilen ve doğu-batı doğrultusunda tek eksenli izleme mekanizmasına sahip olan parabolik oluk kolektör düzenekleri için geliş açısı, Duffie & Beckman (1991) tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [30]:

$$\cos(\theta) = \sqrt{\cos^2(\theta_z) + \cos^2(\delta) \cdot \sin^2(\omega)} \quad (1.2)$$

θ_z : Zenit açısı (Direkt güneş ışınlarının geliş doğrultusuyla yatay düzlemin normali arasındaki açıdır ve $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$ arasında değişir)

δ : Deklinasyon açısı (Güneş ışınlarının geliş doğrultusunun ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır ve $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ arasında değişir)

ω : Saat açısı (Göz önüne alınan yerin boylamı ile güneşin bulunduğu boylam arasındaki açıdır)

2. REFERANS GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ

Bu bölümde, bu tez çalışmasında yapılan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali dizaynı için referans olarak kullanılan “Saguaro” adlı yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santraline ait bilgiler bulunmaktadır.

2.1 Saguaro Güneş Enerjisi Santrali

ABD'nin Arizona eyaletinde, Tucson şehrinin yaklaşık 50 km kuzeyindeki Red Rock'da yer alan ve 1 MW net elektrik üretim kapasitesine sahip olan Saguaro Güneş Enerjisi Santrali (Şekil 2.1'de gösterilmiştir) [31]; Arizona'nın ilk ticari parabolik oluk kolektör teknolojisi kullanan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralidir. Aynı zamanda 1990 yılından sonra ABD'de bu tipte kurulan ilk santralidir. Güneş termal enerji teknolojisi alanında faaliyet gösteren Solargenix Energy tarafından, Arizona'nın en büyük elektrik sağlayıcı şirketi olan APS için inşa edilen santralin temeli 26 Mart 2004'te atılmış ve 27 Aralık 2005'te santralde elektrik üretimine başlanmıştır. Saguaro Güneş Enerjisi Santrali'nin yapım aşamalarına ait bazı resimler Şekil 2.2'de gösterilmiştir [32,33].



Şekil 2.1: Saguaro Güneş Enerjisi Santrali.



Şekil 2.2: Saguaro Güneş Enerjisi Santrali'nin yapım aşamaları.

2.1.1 Teknik veriler

Saguaro Güneş Enerjisi Santrali'nin genişletilmemiş, başlangıçtaki hali için bazı teknik veriler Çizelge 2.1'de verilmiştir [3,34,35].

Çizelge 2.1: Saguaro Güneş Enerjisi Santrali'ne ait teknik veriler.

Saguaro Güneş Enerjisi Santrali	
Koordinatları	32° 57' 36" Kuzey enlemi ve 111° 32' 30" Batı boylamı
Toplam DNI	2636 kWh/m ² -yıl
Planlanan elektrik üretimi	2000 MWh/yıl
Santral alanı	40000 m ²
Toplam kolektör açıklık alanı	10340 m ²
Kolektör düzeneği sayısı	24
Kolektör düzeneği uzunluğu	97 m
Kolektör düzeneğindeki parabolik oluk modül sayısı	8 veya 12
Kolektör düzeneği üreticisi ve modeli	Starnet LS-2
Kolektör düzeneği sürücü üreticisi	Parker-Hannefin
Yansıtıcı yüzey üreticisi	Flabeg
Alıcı sayısı	528
Alıcı tipi ve uzunluğu	Vakumlu emici tüp – 4 m
Alıcı üreticisi ve modeli	Schott PTR70
Kullanılan ısı transfer akışkanı ve üreticisi	Xceltherm 600 - Radco Industries
Isı transfer akışkanının kolektör alanına giriş sıcaklığı	120 °C
Isı transfer akışkanının kolektör alanına giriş basıncı	104 kPa
Isı transfer akışkanının kolektör alanından çıkış sıcaklığı	300 °C
Isı transfer akışkanının kolektör alanından çıkış basıncı	313 kPa

Çizelge 2.1 (devam): Saguaro Güneş Enerjisi Santrali'ne ait teknik veriler.

Saguaro Güneş Enerjisi Santrali	
Türbinin brüt elektrik üretim kapasitesi	1,16 MW
Türbinin net elektrik üretim kapasitesi	1,0 MW
Türbinin dönüş hızı	3630 devir/dakika
Türbin üreticisi	Ormat
Kullanılan çalışma akışkanı	n-pentan (R601)
Çalışma akışkanının türbine giriş sıcaklığı	204,4 °C
Çalışma akışkanının türbine giriş basıncı	2227 kPa
Çalışma akışkanının kondensere giriş sıcaklığı	57,7 °C
Çalışma akışkanının kondensere giriş basıncı	74 kPa
Kondenserdeki soğutma metodu	Su ile
Suyun kondensere giriş sıcaklığı	20 °C
Suyun kondensere giriş basıncı	203 kPa
Türbin tam yükteyken çevrim dizayn verimi	% 20,7
Güneş enerjisinden brüt elektrik üretimi dizayn oranı	% 12,1
Yıllık faydalanılan güneş enerjisinden brüt elektrik üretimi oranı	% 7,5
Jeneratör tipi	İndüksiyon, 4160 V
Yardımcı enerji kaynağı	Yok
Termal enerji depolama sistemi	Yok

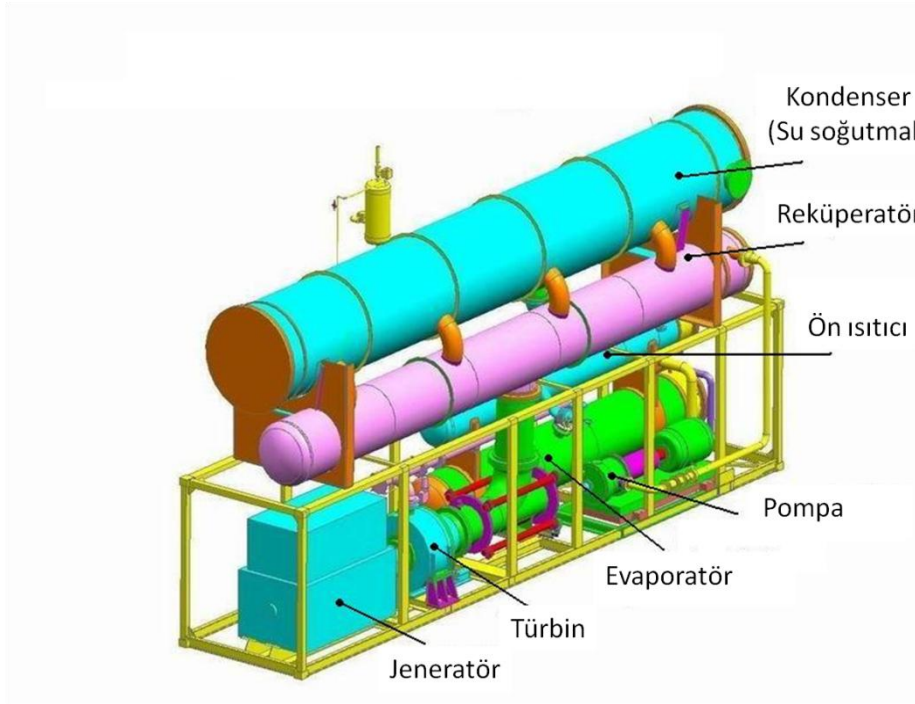
2.1.2 Güç bloğu

Arizona eyaletinin Yenilenebilir Enerji Portföy Standardı (RPS) kapsamındaki yükümlülüğünü yerine getirmek için ürettiği elektriğin bir kısmını güneş enerjisinden elde etmek zorunda olan APS, daha düşük ilk yatırım maliyeti olması nedeniyle nispeten daha düşük çalışma sıcaklığına sahip olan bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali kurmayı planlamıştır. Çünkü parabolik oluk kolektör teknolojisinin ve geleneksel buhar türbinlerinin kullanıldığı yüksek çalışma sıcaklığına sahip olan büyük ölçekli yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri, beraberinde önemli bir ilk yatırım maliyetini de getiriyordu. Böylece hayata geçirilen ve proje bütçesi 6,1 Milyon \$ olan Saguaro Güneş Enerjisi Santrali'nde; Solargenix Energy tarafından sağlanan parabolik oluk kolektör teknolojisiyle birlikte, Ormat tarafından jeotermal enerji üretim sistemleri için geliştirilen ve ORÇ ile çalışan bir güç bloğu (Şekil 2.3'te gösterilen) kullanılmıştır [36].



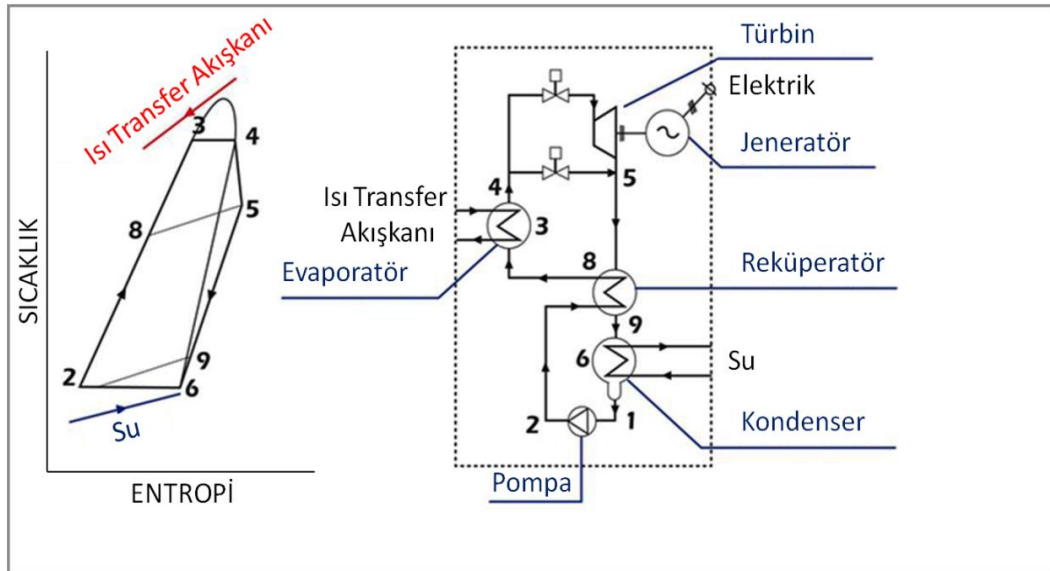
Şekil 2.3: Saguaro Güneş Enerjisi Santrali'nde kullanılan güç bloğu [31].

Kompakt bir yapıya sahip olan bu güç bloğunun elemanları, Şekil 2.4'te gösterilmiştir [37].



Şekil 2.4: Saguro Güneş Enerjisi Santrali'nde kullanılan güç bloğu elemanları.

Bu güç bloğuna ait ORÇ'nin termodinamik çalışma prensibi de Şekil 2.5'te gösterilmiştir [9].



Şekil 2.5: Saguro Güneş Enerjisi Santrali'nde kullanılan güç bloğu için ORÇ.

Güneş kolektör alanında üretilen termal enerji, belirlenen çalışma sıcaklığına ulaşıldığı zaman ısı transfer akışkanı ile güç bloğuna aktarılır. Isı transfer akışkanı sahip olduğu ısıyı, güç bloğundaki ön ısıtıcı ve evaporatör içinden geçerek ORÇ'nde kullanılan çalışma akışkanına transfer eder. Böylece sıvı fazda olan çalışma akışkanının ısıtılması ve buharlaşması sağlanır (8→3→4). Buharlaşan çalışma akışkanı, dişli kutusu olmadan doğrudan jeneratöre bağlı olan türbini döndürür ve elektrik elde edilir (4→5). Türbinden iki fazlı olarak çıkan çalışma akışkanı, reküperatör içinden geçer (5→9) ve pompadan çıkarak reküperatöre giren sıvı fazdaki çalışma akışkanının, evaporatöre girmeden önce ön ısıtmasını sağlar (2→8). Reküperatörden geçtikten sonra su ile soğutulan kondensere giren iki fazlı çalışma akışkanı, burada yoğuşturularak sıvı faza dönüşür (9→6→1). Pompaya girmeden önce yine sıvı faza geçmiş olan çalışma akışkanı, son olarak reküperatör üzerinden evaporatöre pompalanır (1→2). Kapalı bir devre olan çevrim, aynı işlemleri sırasıyla takip ederek bu şekilde çalışmaya devam eder.

3. GÜNEŞ KOLEKTÖR ALANI DİZAYNI

Bu bölümde, İzmir’de kurulacağı varsayılan bir parabolik oluk kolektörlü yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali için “System Advisor Model (SAM)” adlı program kullanılarak yapılan güneş kolektör alanı dizaynı ayrıntılı olarak verilmiştir.

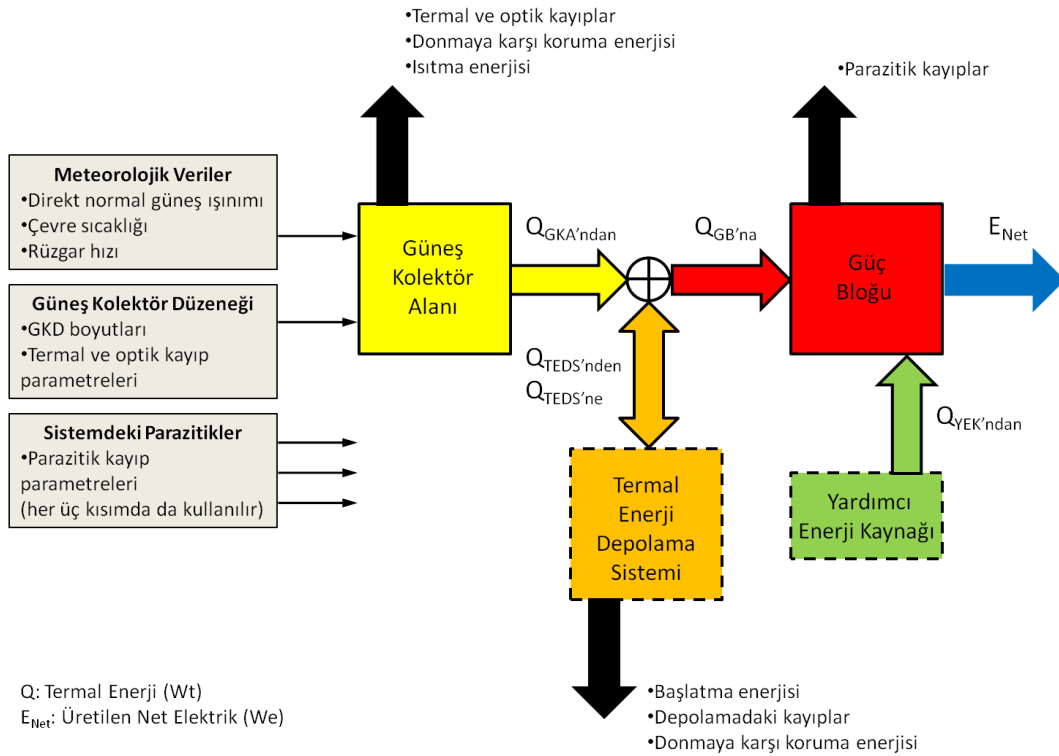
3.1 System Advisor Model (SAM) Programı

Yenilenebilir enerji güç sistemleri (fotovoltaik, güneş termal, rüzgar, jeotermal, biyokütle gibi) projeleri için bir performans ve mali danışma modeli olan SAM programı, 2005’te Solar Advisor Model adıyla ABD Enerji Bakanlığı’nın Güneş Enerjisi Teknolojileri Programı kapsamında Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından Sandia Ulusal Laboratuvarı ve Wisconsin Üniversitesi yardımlarıyla geliştirilen, ücretsiz bir yazılım programıdır. Yıllar içinde kapsamı genişletilen ve adı 2010’da System Advisor Model olarak değiştirilen SAM programı; yenilenebilir enerji güç sistemleri projeleri için yapılan modellemelerde sistem dizayn parametrelerini kullanarak, kurulum ve işletim maliyetlerini de göz önünde bulundurarak, saatlik sistem performansı ve enerji maliyeti tahminleri yapmaktadır [38].

SAM programında, parabolik oluk kolektörlü yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri için ampirik ve fiziksel olmak üzere iki tip model mevcuttur. NREL tarafından yapılan araştırmalarda kullanılmak üzere geliştirilen ampirik model, ABD Kaliforniya Mojave Çölü’nde bulunan parabolik oluk kolektör teknolojisinin kullanıldığı yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde yapılan ölçümlere ait verilerin, regresyon analizi sonucu elde edilmiştir. Dizayn projesi yapılan bir santralin, performansını karakterize etmek için deneysel ölçüm verilerinden türetilen performans eğrilerinin kullanıldığı ampirik model, yeni teknolojiler veya bileşen konfigürasyonları için sınırlı bir tahmin kapasitesine sahip olduğundan ampirik modele ek olarak; santrali oluşturan bileşenlerin performansını, termodinamik ve ısı

transferi ilkelerine göre yapılan ayrıntılı performans hesaplamalarını kullanarak karakterize eden ve SAM programının 2010 yılından itibaren çıkan sürümlerinde bulunan bir fiziksel model geliştirilmiştir. Böylece dizayn projesi yapılan bir santralin, temel düzeydeki sistem parametrelerinin ve bileşen özelliklerinin pratik bir şekilde değiştirilerek bunların tüm sistemin performansı üzerindeki etkilerinin simüle edilebilmesi sağlanmıştır. Ampirik modele göre daha esnek bir yapıya sahip olan fiziksel model, performans tahminleri bakımından ise ampirik modele göre daha fazla belirsizliğe sahiptir.

SAM programındaki fiziksel model ile isteğe bağlı olarak termal enerji depolama sistemi ve/veya yardımcı enerji kaynağı olan bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralının, parabolik oluk kolektör alanında üretilerek güç bloğuna aktarılan termal enerji ve güç bloğunda üretilerek şebekeye iletilen elektrik enerjisi miktarları hesaplanabilir. SAM programındaki fiziksel modelin çalışma prensibi, blok diyagramı olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir [39].



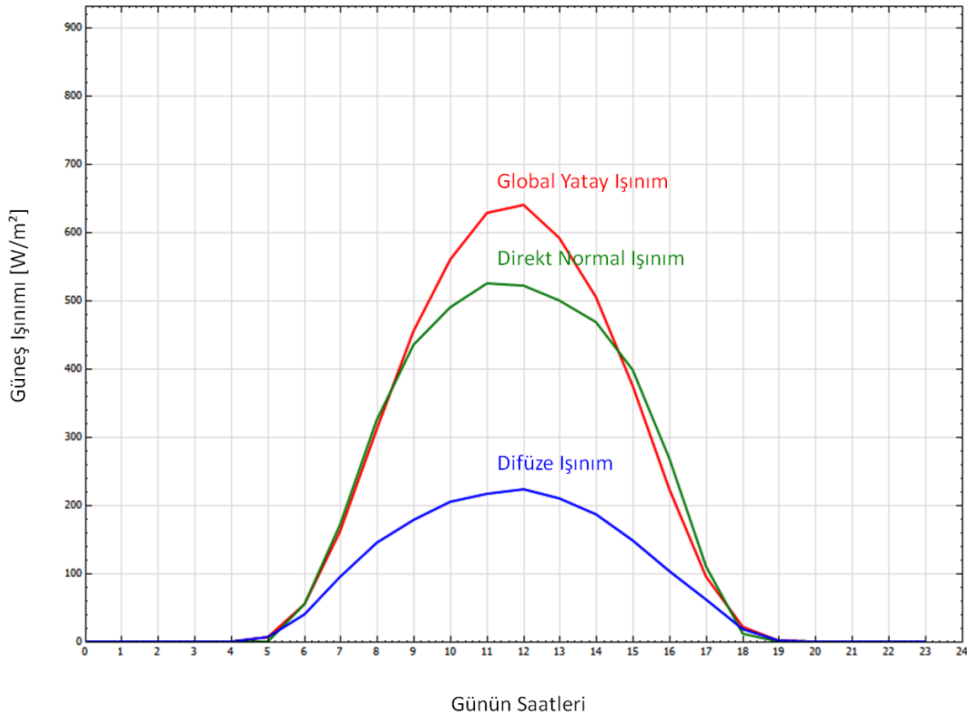
Şekil 3.1: SAM programındaki fiziksel modelin çalışma prensibi.

3.2 SAM Programıyla Güneş Kolektör Alanı Dizaynı

3.2.1 Santral yeri ve meteorolojik veriler

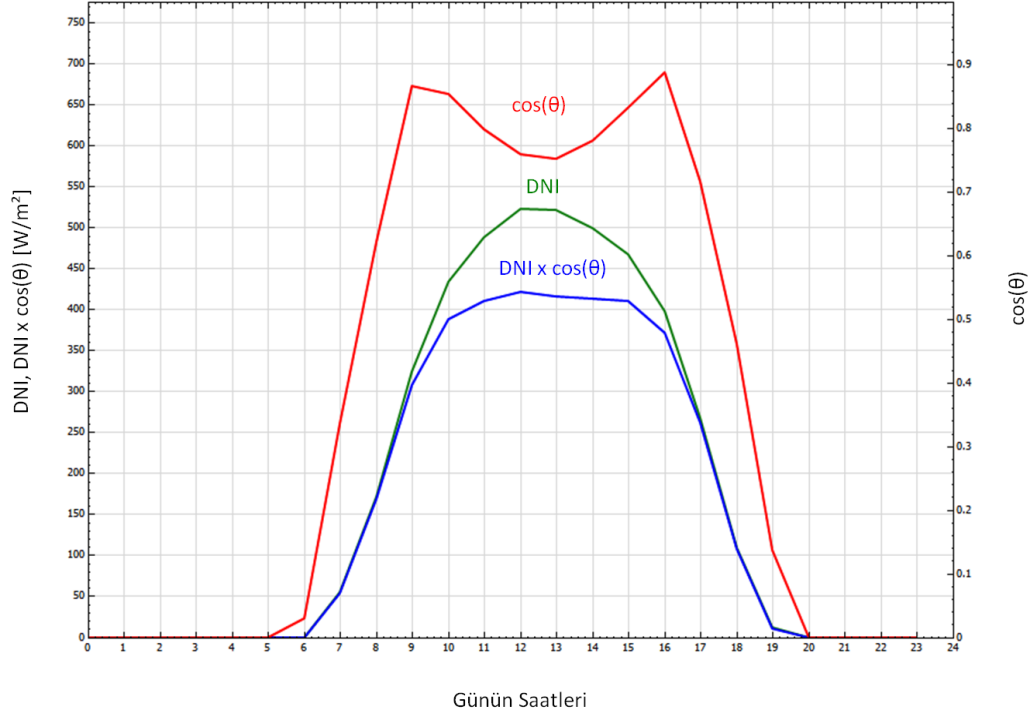
Bu tez çalışmasında, SAM programı kullanılarak yapılan güneş kolektör alanı dizaynı için santral yeri olarak; SAM programında kullanılmaya uygun formattaki meteorolojik veriler yalnızca İstanbul, Ankara ve İzmir şehirleri için mevcut olduğundan, bu şehirler arasındaki en yüksek DNI değerine sahip olan İzmir seçilmiştir. SAM programındaki enerji hesaplamaları için gerekli olan İzmir'e ait meteorolojik veriler ise; Amerikan Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Derneği (ASHRAE) tarafından simülasyon programlarındaki enerji hesaplamalarında kullanılmaya uygun IWEC formatında hazırlanan, 2001 yılına ait meteorolojik veri dosyalarından temin edilmiştir [40].

İzmir'de $38^{\circ} 50'$ Kuzey enleminde ve $27^{\circ} 02'$ Doğu boylamında, deniz seviyesinden 5 m yükseklikte bulunan meteoroloji istasyonunda, yıl boyunca günün her saatinde yapılan ölçümlere göre toplam global yatay ışıını 1689,1 kWh/m²-yıl, direkt normal güneş ışıını da 1561,6 kWh/m²-yıl olarak ölçülen İzmir için güneş ışıını bileşenlerinin (Global Yatay ışıını = Direkt Normal ışıını \times cos(θ) + Difüze ışıını) yıllık profili, Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: İzmir için ölçülen güneş ışıını bileşenlerinin yıllık profili.

İzmir için ölçülen yıllık toplam DNI = 1561,6 kWh/m² iken güneş ışınlarının geliş açısına bağlı olarak yapılan kosinüs düzeltmesi sonucu bu değer 1371 kWh/m² olmuştur. İzmir için ölçülen DNI'nın yıllık profiline geliş açısı'nın etkisi, Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



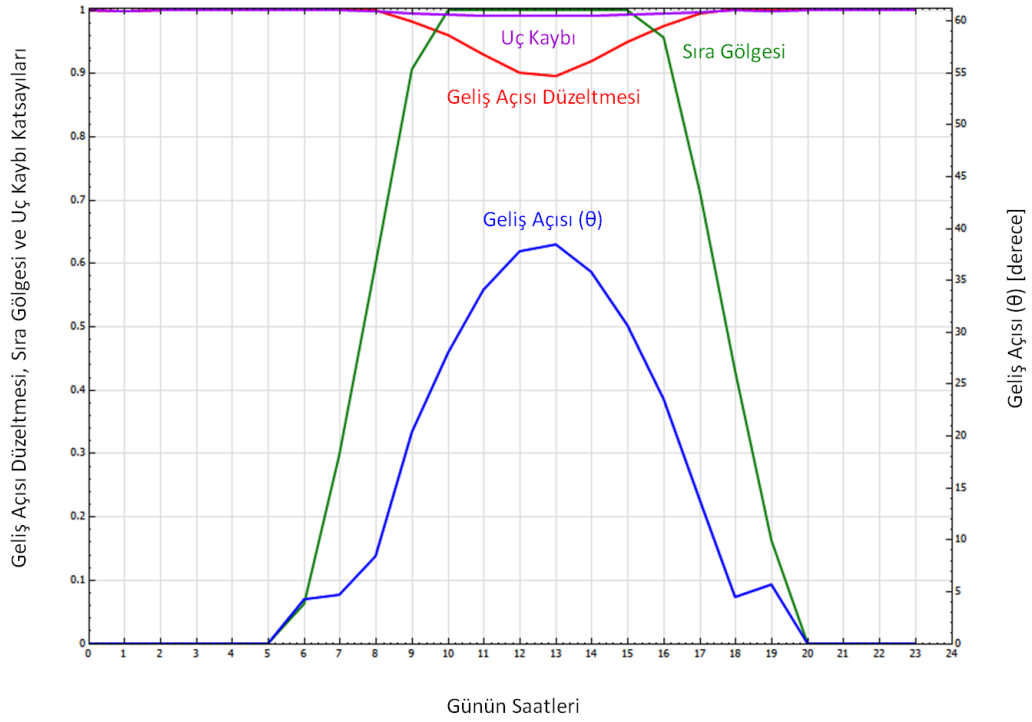
Şekil 3.3: İzmir için ölçülen DNI'nın yıllık profiline geliş açısı'nın etkisi.

İzmir için ölçülen güneş ışınlarının geliş açısı ile parabolik oluk güneş kolektör düzeneklerindeki doğrusal alıcılar tarafından emilen güneş ışınımının hesabında kullanılan; geliş açısı düzeltmesi, sıra gölgesi ve uç kaybı katsayılarının yıllık profili Şekil 3.4'te gösterilmiştir. İzmir için ölçülen yıllık ortalama çevre sıcaklığı ve rüzgar hızı değerleri ise aşağıdaki gibidir:

Kuru termometre ile ölçülen yıllık ortalama çevre sıcaklığı = 16,7 °C

Yaş termometre ile ölçülen yıllık ortalama çevre sıcaklığı = 12,4 °C

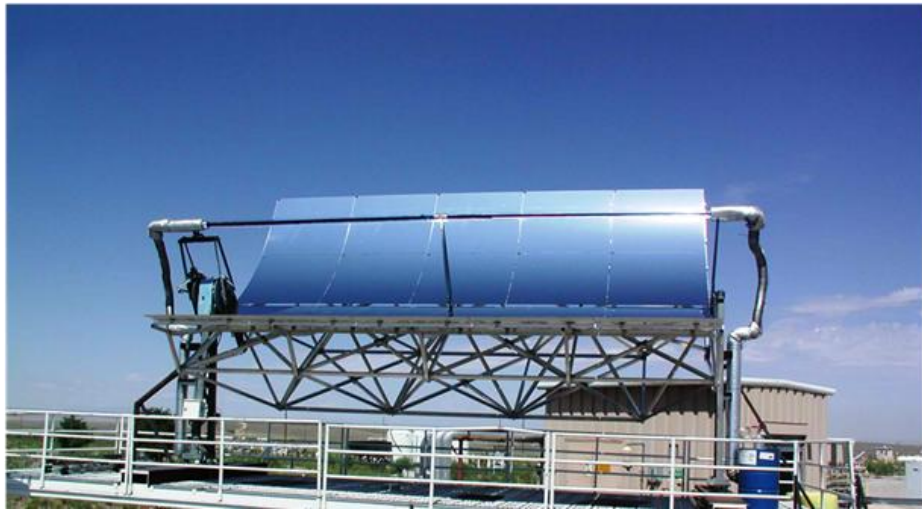
Yerden 10 m yükseklikteki yıllık ortalama rüzgar hızı = 4,4 m/s'dir.



Şekil 3.4: İzmir için ölçülen geliş açısı ile geliş açısı düzeltmesi, sıra gölgesi ve uç kaybı katsayılarının yıllık profili.

3.2.2 Güneş kolektör düzenekleri

Seçilen güneş kolektör düzeneği, Solargenix SGX-1 parabolik oluk güneş kolektör düzeneğidir (Şekil 3.5'te gösterilmiştir). Solargenix SGX-1 parabolik oluk güneş kolektör düzeneğine ait kolektör geometrisi ve optik parametreler Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.5: Solargenix SGX-1 parabolik oluk güneş kolektör düzeneği [37].

Çizelge 3.1: Solargenix SGX-1 parabolik oluk güneş kolektör düzeneğine ait kolektör geometrisi ve optik parametreler.

Solargenix SGX-1	
Kolektör düzeneği açıklık alanı	470,3 m ²
Kolektör düzeneği açıklık genişliği	5 m
Kolektör düzeneği uzunluğu	100 m
Kolektör düzeneğindeki parabolik oluk modül sayısı	12
Bir parabolik oluk modülün uzunluğu	8,3333 m
Kolektör yüzeyi ve odak hattı arasındaki ortalama mesafe	1,8 m
Kolektör düzeneği arasındaki bağlantı borusu uzunluğu	1 m
Takip hatası	0,994
Geometrik hata etkileri	0,98
Yansıtıcı yüzeyin yansıtma oranı	0,935
Yansıtıcı yüzey üzerindeki toz-kir	0,95
Genel optik (hesaplanamayan diğer) hatalar	0,99
Kolektör optik dizayn verimi*	0,85661

*Kolektör optik dizayn verimi = Takip hatası × Geometrik hata etkileri × Yansıtıcı yüzeyin yansıtma oranı × Yansıtıcı yüzey üzerindeki toz-kir × Genel optik hatalar

3.2.3 Alıcılar

Seçilen alıcı, Schott PTR70 2008 emici tüptür (Şekil 3.6'da gösterilmiştir). Alıcı için SAM programı tarafından ağırlıklandırılmış varyasyonlar ile hesaplanan toplam kayıp değerleri, dizayn aşamasında termal ve optik kayıpların tahmin edilerek güneş kolektör alanının boyutlarının belirlenmesi için döngü toplam enerji dönüştürme dizayn veriminin ve bir döngü için gereken minimum kolektör açıklık alanının hesaplamasında kullanılır. Schott PTR70 2008 emici tüp için varyasyonlar Çizelge 3.2'de, Schott PTR70 2008 emici tüpe ait alıcı geometrisi ve optik-termal parametreler de Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.6: Schott PTR70 2008 emici tüp [28].

Çizelge 3.2: Schott PTR70 2008 emici tüp için varyasyonlar.

Schott PTR70 2008	Varyasyon 1	Varyasyon 2	Varyasyon 3
Varyasyonlar için ağırlıklandırma kesri	0,985	0,01	0,005
Emici tüpün güneş ışınımı emme oranı	0,96	0,96	0,8
Emici tüpün termal enerji yayma oranı	Tablo*	0,65	0,65
Cam kaplamanın güneş ışınımı emme oranı	0,02	0,02	0
Cam kaplamanın termal enerji yayma oranı	0,86	0,86	1
Cam kaplamanın güneş ışınımı geçirme oranı	0,963	0,963	1
Vakumlu halkadaki gaz tipi	Hidrojen	Hava	Hava
Vakumlu halkadaki mutlak gaz basıncı (torr**)	0,0001	750	750
Tahmini toplam ısı kaybı (W/m)	150	1100	1500
Uçlardaki körüklerin gölgeleme etkisi	0,96	0,96	0,96
Alıcıdaki toz-kir	0,98	0,98	1

*Tablo:

**1 torr (mmHg) = 133,322 Pa

Sıcaklık (°C)	Yayma oranı
100	0,064
150	0,0665
200	0,07
250	0,0745
300	0,08
350	0,0865
400	0,094

Çizelge 3.3: Schott PTR70 2008 emici tüpe ait alıcı geometrisi ve optik-termal parametreler.

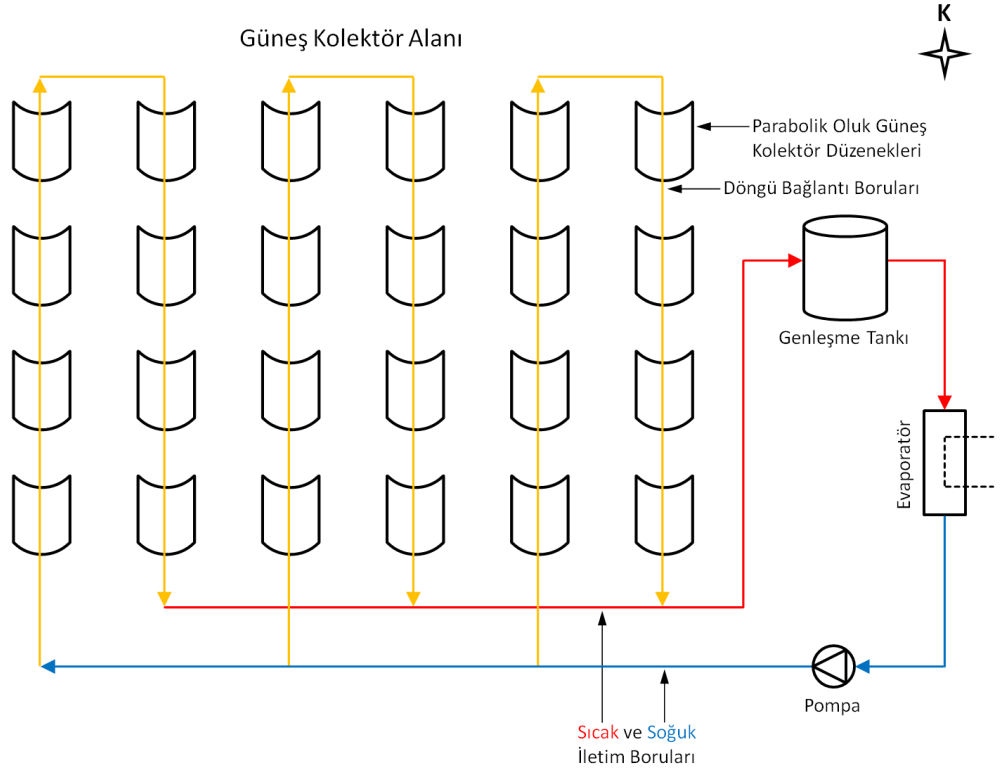
Schott PTR70 2008	
Emici tüp iç çapı	0,066 m
Emici tüp dış çapı	0,07 m
Cam kaplama iç çapı	0,115 m
Cam kaplama dış çapı	0,12 m
Emici tüpün iç yüzey pürüzlülüğü	4,5E-05 m
Emici tüpteki emici malzeme tipi	304L paslanmaz çelik
Tahmini toplam ısı kaybı dizayn değeri	166,25 W/m
Alıcı termal dizayn verimi	0,96224
Alıcı optik dizayn verimi	0,86924
Döngü optik dizayn verimi*	0,7446
Döngü toplam enerji dönüştürme dizayn verimi**	0,71648
Bir döngü için gereken minimum kolektör açıklık alanı	3762,35 m ²

* Döngü optik dizayn verimi = Kolektör optik dizayn verimi × Alıcı optik dizayn verimi

** Döngü toplam enerji dönüştürme dizayn verimi = Döngü optik dizayn verimi × Alıcı termal dizayn verimi

3.2.4 Güneş kolektör alanı

Seçilen parabolik oluk güneş kolektör düzeneği tipine göre bir döngüdeki kolektör açıklık alanı 3762,4 m² olan güneş kolektör alanı; dikey eğimi olmayan düz bir zemine, kuzey-güney doğrultusunda yatay olarak yerleştirilen ve doğu-batı doğrultusunda tek eksenli izleme mekanizmasına sahip olan 24 adet güneş kolektör düzeneğinden oluşmaktadır. Her birinde 2 sıra ve 8 güneş kolektör düzeneği olan, birbirine paralel konumdaki 3 döngüden oluşan güneş kolektör alanına ait yerleşim düzeni, Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Güneş kolektör alanı yerleşim düzeni.

Güneş kolektör alanı için seçilen, hesaplanan ve belirlenen dizayn parametreleri ile güneş kolektör alanı dizaynında yapılan hesaplar için SAM programında kullanılan tahmini parazitik değerler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4: GKA için seçilen, hesaplanan ve belirlenen dizayn parametreleri ile parazitikler.

Güneş kolektör alanı	
Toplam kolektör açıklık alanı*	11287,2 m ²
Sıra aralığı	13 m
Toplam kolektör alanı**	29346,72 m ²
Santral alanı***	41085,408 m ²
Kolektör eğim açısı	0°
Kolektör azimut açısı	0°
Kolektör stow açısı	170°
Kolektör deploy açısı	10°

Çizelge 3.4 (devam): GKA için seçilen, hesaplanan ve belirlenen dizayn parametreleri ile parazitikler.

Güneş kolektör alanı	
İletim borularının iç yüzey pürüzlülüğü	4,57E-05 m
İletim boruları (sıcak ve soğuk) için termal atalet	0,2 kWh/K-MWt
Döngülerdeki bağlantı boruları için termal atalet	4,5 Wh/K-m
Isı transfer akışkanı pompası verimi	0,85
Donmaya karşı koruma sıcaklığı	50 °C
DNI için maksimum dizayn değeri	936 W/m ²
Seçilen ısı transfer akışkanı****	Therminol VP-1
Isı transfer akışkanının sıvı fazdaki çalışma sıcaklığı aralığı	12 °C - 400 °C
Isı transfer akışkanının döngülere giriş dizayn sıcaklığı	75 °C
Isı transfer akışkanının döngülerden çıkış dizayn sıcaklığı	150 °C
Döngülerdeki minimum akış debisi	0,25 kg/s
Döngülerdeki maksimum akış debisi	5 kg/s
Kolektör alanındaki minimum akış hızı	0,071509 m/s
Kolektör alanındaki maksimum akış hızı	1,52074 m/s
İletim boruları için minimum dizayn akış hızı	0,5 m/s
İletim boruları için maksimum dizayn akış hızı	1,5 m/s
İletim boruları için termal kayıp katsayısı	0,45 W/m ² -K
Güneş kolektör düzeneği izleme mekanizması için gereken güç	125 W/GKD
Isı transfer akışkanını güç bloğuna aktarmak için gereken pompa gücü	0,55 kJ/kg

*Toplam kolektör açıklık alanı = Kolektör düzeneği açıklık alanı × Kolektör düzeneği sayısı

**Toplam kolektör alanı = Toplam kolektör açıklık alanı × Sıra aralığı / Maksimum kolektör düzeneği açıklık genişliği

*** Santral alanı = Toplam kolektör alanı × 1,4

**** Solutia tarafından üretilen sentetik bir ısı transfer akışkanı olan Therminol VP-1'in karakteristik özellikleri [41], EKLER bölümünde verilmiştir.

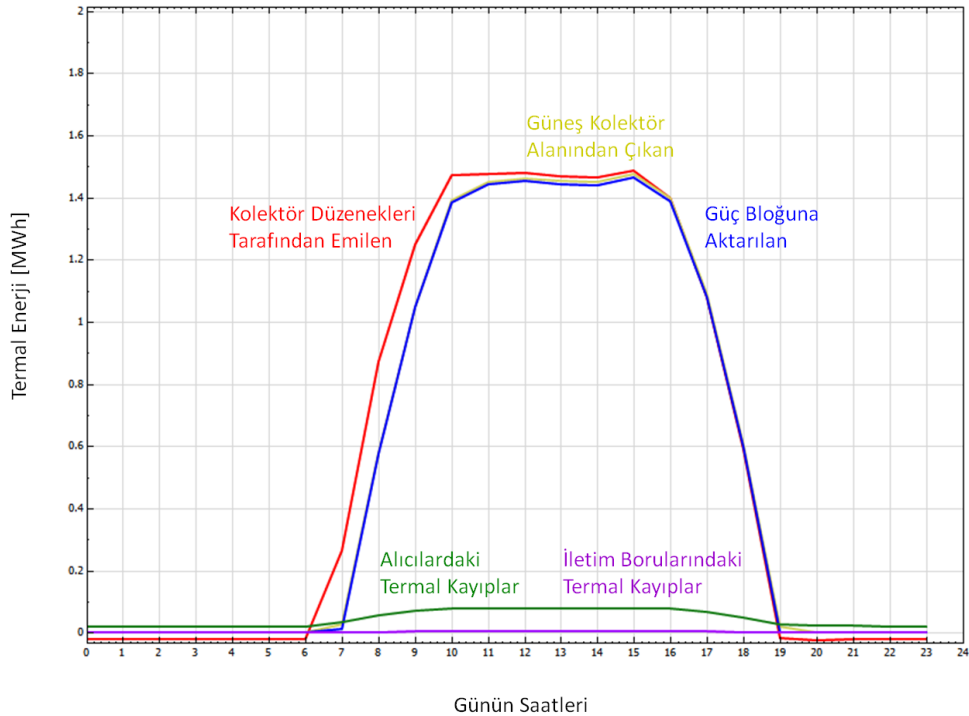
3.2.5 Hesaplanan termal enerji miktarları

SAM programıyla yapılan güneş kolektör alanı dizaynında hesaplanan termal enerji miktarları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5: GKA dizaynında hesaplanan termal enerji miktarları.

Termal enerji miktarları	MWh/yıl
Kolektör düzeneklerinin üzerine gelen toplam termal enerji	17625,8
Kolektör düzenekleri tarafından emilen toplam termal enerji	5140,43
Güneş kolektör alanından çıkan toplam termal enerji	4916,89
Güç bloğuna aktarılan toplam termal enerji	4873,54
Güneş kolektör alanındaki toplam termal kayıplar	266,89

Alıcılardaki ve iletim borularındaki toplam termal kayıplar ile kolektör düzenekleri tarafından emilen, güneş kolektör alanından çıkan ve güç bloğuna aktarılan toplam termal enerji miktarlarının yıllık profili de Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: GKA için hesaplanan toplam termal kayıplar ile toplam termal enerji miktarlarının yıllık profili.

Kolektör düzenekleri tarafından emilen, güneş kolektör alanından çıkan ve güç bloğuna aktarılan aylık toplam termal enerji miktarları ise Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6: GKA için hesaplanan aylık toplam termal enerji miktarları.

Aylar	Kolektör Düzenekleri Tarafından Emilen [MWh]	Güneş Kolektör Alanından Çıkan [MWh]	Güç Bloğuna Aktarılan [MWh]
Ocak	208,379	200,008	194,315
Şubat	230,349	217,605	213,548
Mart	381,125	362,240	357,557
Nisan	370,974	354,710	351,533
Mayıs	549,885	526,352	521,464
Haziran	678,746	651,453	645,376
Temmuz	682,640	659,718	655,106
Ağustos	654,604	628,630	628,538
Eylül	573,092	543,648	541,706
Ekim	380,675	363,751	361,097
Kasım	292,710	273,479	271,178
Aralık	137,254	135,291	132,123

İzmir'deki meteoroloji istasyonunda, yıl boyunca her saat başında yapılan ölçümler sonucu elde edilen verilere ve güneş kolektör alanı dizayn parametrelerine göre, güç bloğuna aktarılan termal enerji miktarları için maksimum değer 9 Temmuz günü saat 13.00'da 2022 kW, minimum değer ise 31 Ocak günü saat 10.00'da 256 kW olarak hesaplanmıştır. Güneş kolektör alanı için hesaplanan saatlik güç bloğuna aktarılan termal enerji miktarlarının yıl boyunca görülme sayı ve yüzdeleri Çizelge 3.7'de verilmiştir. Yıllık 8760 saatin; % 20,71'inde (1814 saatte) güç bloğuna aktarılan termal enerji miktarı ≥ 2000 kW, % 10,97'sinde (961 saatte) de 250 kW ila 2000 kW aralığındadır. Geriye kalan % 68,32'de (5985 saatte) ise güç bloğuna termal enerji aktarımı yoktur.

Çizelge 3.7: GKA için hesaplanan saatlik güç bloğuna aktarılan termal enerji miktarlarının yıl boyunca görülme sayısı ve yüzdeleri.

Güç Bloğuna Aktarılan Termal Enerji [kW]	Görülme Sayısı [Saat]	Görülme Yüzdesi [%]
≥ 2000	1814	20,71
1950-1999	166	1,89
1900-1949	55	0,63
1850-1899	35	0,40
1800-1849	38	0,43
1750-1799	32	0,37
1700-1749	18	0,21
1650-1699	19	0,22
1600-1649	19	0,22
1550-1599	22	0,25
1500-1549	13	0,15
1450-1499	15	0,17
1400-1449	14	0,16
1350-1399	28	0,32
1300-1349	23	0,26
1250-1299	17	0,19
1200-1249	15	0,17
1150-1199	22	0,25
1100-1149	19	0,22
1050-1099	19	0,22
1000-1049	17	0,19

Çizelge 3.7 (devam): GKA için hesaplanan saatlik güç bloğuna aktarılan termal enerji miktarlarının yıl boyunca görülme sayı ve yüzdeleri.

Güç Bloğuna Aktarılan Termal Enerji [kW]	Görülme Sayısı [Saat]	Görülme Yüzdesi [%]
950-999	19	0,22
900-949	19	0,22
850-899	20	0,23
800-849	29	0,33
750-799	22	0,25
700-749	24	0,27
650-699	19	0,22
600-649	26	0,30
550-599	18	0,21
500-549	28	0,32
450-499	29	0,33
400-449	29	0,33
350-399	21	0,24
300-349	27	0,31
250-299	25	0,29
0	5985	68,32

4. GÜÇ BLOĞU DİZAYNI VE MODELLEMESİ

Bu bölümde, İzmir’de kurulacağı varsayılan bir parabolik oluk kolektörlü yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali için “Flownex” adlı simülasyon programı kullanılarak yapılan güç bloğu dizaynı ve modellemesi ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.1 Flownex Programı

Güney Afrika menşeli M-Tech Industrial firmasının 1986’da, havalı taşıyıcı bant sistemlerinin hava dağıtım ağlarını çözmek için Hardy-Cross yöntemine dayalı bir CFD yazılım kodu geliştirmesiyle ortaya çıkmış olan Flownex programı, yıllar içinde geliştirilerek 2008’de birçok çeşit termal ve akışkan sistemin kararlı ve dinamik durumları için dizayn, analiz ve optimizasyon yapılmasını sağlayan bir simülasyon programı haline almıştır [42].

Flownex programı;

- Gaz, buhar ya da kombine çevrimli güç santralleri
- Yüksek sıcaklıkta gaz soğutmalı nükleer santraller
- Gaz ve sıkıştırılmış hava ağları
- Petrol ve doğal gaz dağıtım ağları
- Gaz türbini yanma odaları
- Uçak klima sistemleri
- Isı değiştirici ağları
- Su veya akaryakıt dağıtım ağları
- Havalandırma sistemleri

gibi termal ve akışkan sistemlerin modellemesinde, sistem parametrelerinin ya da bileşenlerinin tam veya kısıtlı dizayn, optimizasyon ve duyarlılık analizlerinde kullanılabilir [43].

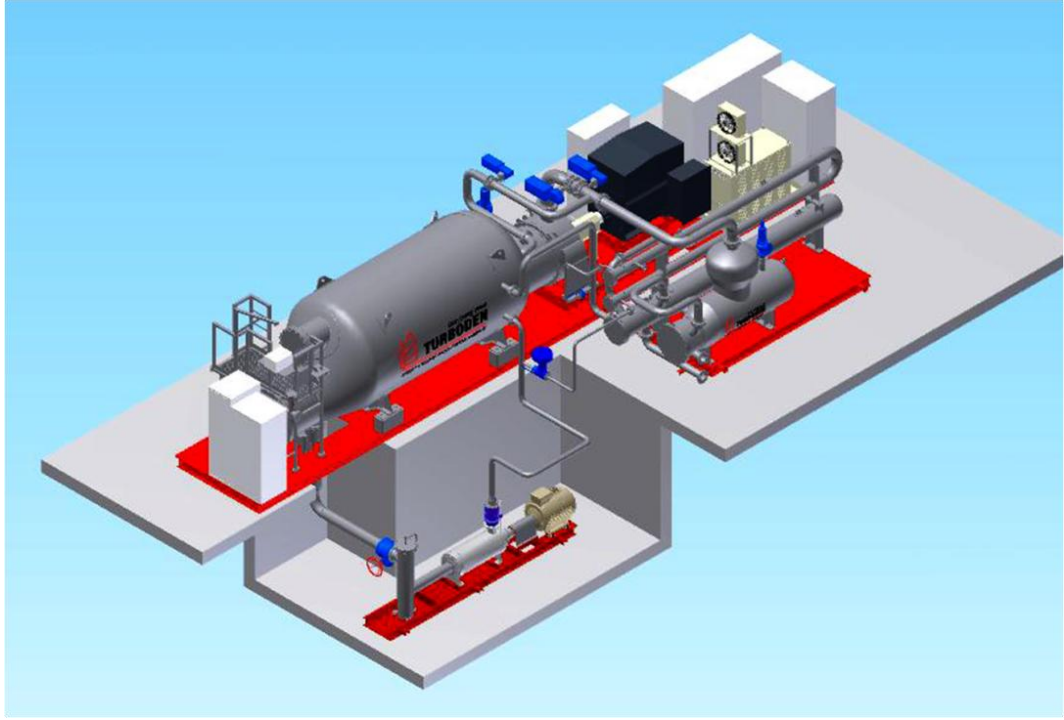
Flownex programında termal ve akışkan sistemlerin analizi, akışkanlar dinamiği ve ısı transferi denklemlerinin sayısal çözümüne dayanmaktadır. Flownex programı, bir sistemdeki ağ boyunca kütle akış hızı, basınç ve sıcaklık dağılımlarını elde etmek için kütle, momentum ve enerji korunumu için kısmi diferansiyel denklemleri çözmektedir [42].

4.2 Güç Bloğu Dizaynı

ORÇ ile çalışan bir güç bloğunda bulunması gerekli olan temel elemanlar ve uygun tipleri şunlardır [44]:

- Türbin (eksenel akışlı reaksiyon tipi)
- Elektrik jeneratörü (2 kutuplu, 3 fazlı, asenkron tipi)
- Kondenser (kabuk-boru tipi)
- Evaporatör (kabuk-boru tipi)
- Besleme pompası (çok kademeli santrifüj tipi)

Eğer gerekiyorsa ön ısıtıcı (kabuk-boru tipi) da kullanılır. Ayrıca evaporatördeki ısı yükünü azaltmak, termal verimi arttırmak ve daha fazla güç üretmek için reküperatör veya rejeneratör (kanatlı bobin tipi) kullanılabilir. Güç bloğu için gerekli diğer elemanlar ise türbin kaplin (esnek tip) ve vanaları, yağlama kontrol ünitesi, elektrik panelleri, pompa motoru, pompa kaplin ve vanaları ile pompa filtresidir. Bunların dışında; bağlantı boruları ve vanaları, cıvata-conta gibi bağlantı parçaları, kablolar ve elektrik tesisatı malzemeleri, güç bloğunu oluşturan diğer bileşenlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklı kombine ısı-güç veya atık ısı geri kazanımı uygulamalarında kullanılabilen, ORÇ ile çalışan bir güç bloğu örneği Şekil 4.1’de gösterilmiştir [44]. Turboden firması tarafından üretilen 10 CHP/HR model numaralı bu turbo-jeneratörün ORÇ’ne ait bazı teknik veriler de Çizelge 4.1’de verilmiştir [9].

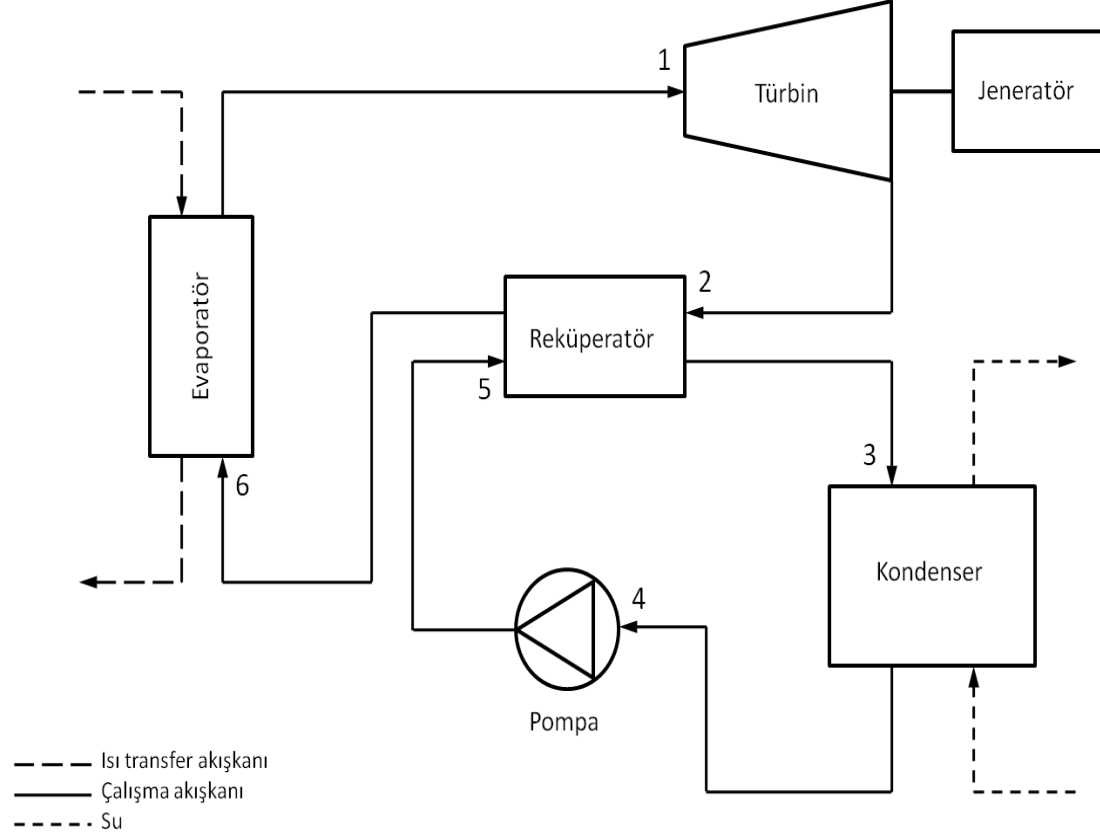


Şekil 4.1: ORÇ ile çalışan bir güç bloğu (Turboden 10 CHP/HR).

Çizelge 4.1: Turboden 10 CHP/HR için teknik veriler.

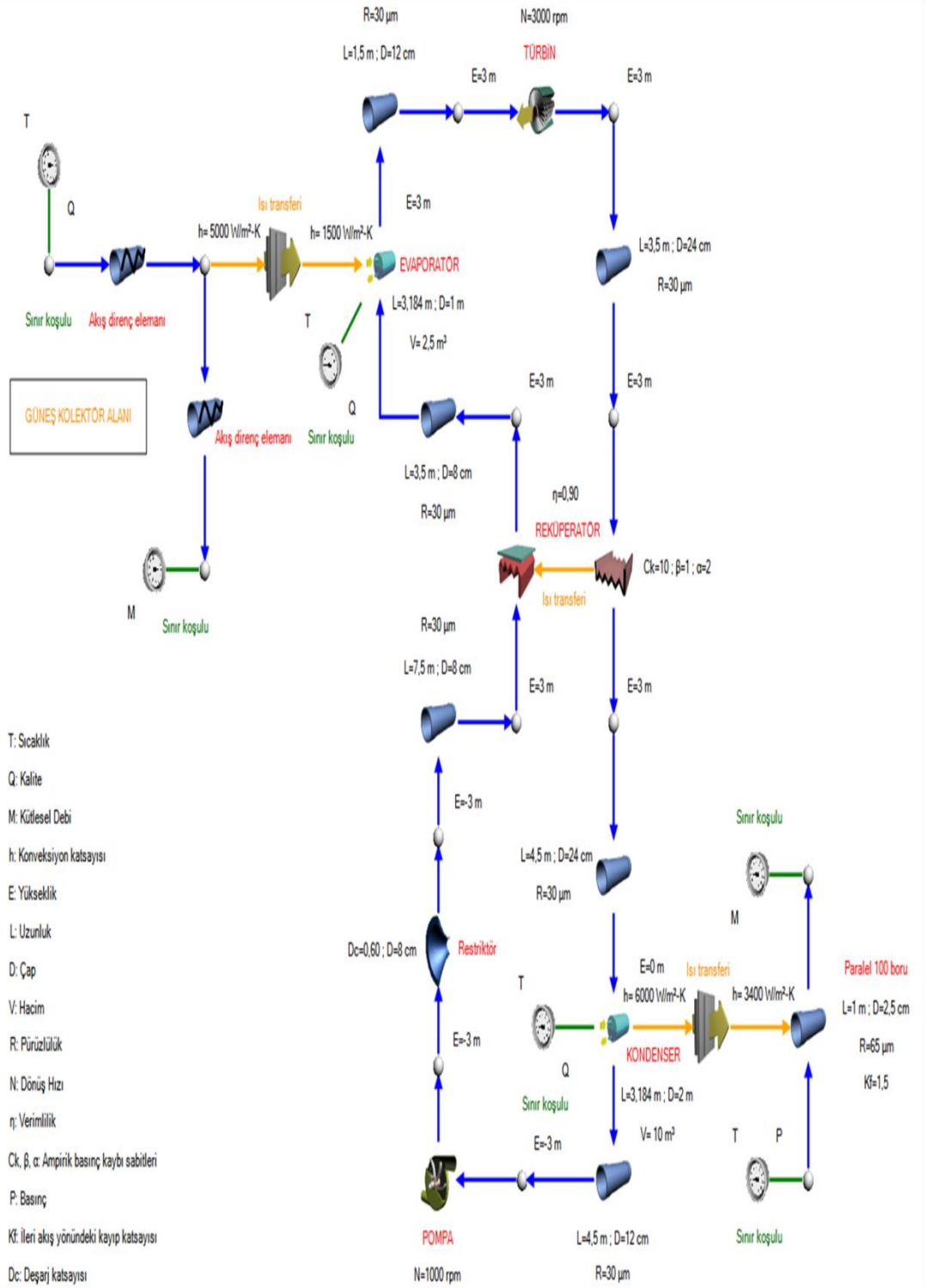
Turboden 10 CHP/HR	
Isı transfer akışkanının evaporatördeki nominal sıcaklıkları (giriş/çıkış)	270 / 150 °C
Evaporatöre giren termal enerji	4500 kW
Soğutma suyunun kondenserdeki nominal sıcaklıkları (giriş/çıkış)	25 / 35 °C
Kondenserden çıkan termal enerji	3563 kW
Çevrimdeki parazitik kayıplar	39 kW
Türbinde brüt elektrik üretimi	898 kW
Çevrimdeki güç tüketimi	33 kW
Üretilen net elektrik	865 kW
Net çevrim verimi	% 19,2

İzmir’de kurulacağı varsayılan bir parabolik oluk kolektörlü yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali için dizaynı yapılan güç bloğuna ait ORÇ, blok diyagramı olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir [45].



Şekil 4.2: Dizaynı yapılan güç bloğu için ORÇ.

Dizaynı yapılan bu güç bloğundaki elemanların belirlenen (konveksiyon katsayısı, yükseklik, uzunluk, çap, hacim, pürüzlülük, dönüş hızı, verimlilik, ampirik basınç kaybı sabitleri, ileri akış yönündeki kayıp katsayısı, deşarj katsayısı) özellikleri, Flownex programındaki görünüşleriyle Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Şekil 4.3’te görülen GKA’ndaki iletim borularını Flownex programında temsil etmek için kullanılmış olan akış direnç elemanları; Flownex programında oluşturulan bir ağdaki sistemde ya da bileşenlerinde (vana, boru, restriktör, ısıtıcı gibi) meydana gelen basınç kaybını, en az düzeyde veri ile hızlı bir şekilde simüle etmek için kullanılır.



Şekil 4.3: Dizaynı yapılan güç bloğundaki elemanların belirlenen özellikleri.

4.3 Çalışma Akışkanı Seçimi

ORÇ ile çalışan bir güç bloğunun dizaynı sırasında, çevrimin termodinamik performansı üzerinde büyük bir etkisi olan çalışma akışkanının seçimi kilit öneme sahiptir. ORÇ için uygun olan çalışma akışkanını seçerken dikkate alınması gereken; termodinamik, çevre, emniyet ve proses ile ilgili olan değerlendirme kriterleri aşağıda sıralanmıştır [2,10].

- Ozon tüketme potansiyeli (sıfır veya sıfıra çok yakın olmalıdır)
- Küresel ısınma potansiyeli (çevresel ve sera etkileri düşük olmalıdır)
- Emniyet seviyesi (toksikite derecesi ve alevlenme noktası iyi bilinmelidir)
- Kullanılabilirlik ve maliyet (ticari olarak kolay temin edilebilmeli ve maliyeti makul olmalıdır)
- Doymuş buhar eğrisi (izantropik veya eğimi pozitif olmalıdır)
- Yoğunluk (hem sıvı fazda hem buhar fazında yüksek olmalıdır)
- Kimyasal kararlılık (termal kararlılık sıcaklığı yüksek olmalıdır)
- Basınçlar (buharlaştırma ve yoğuşma basıncı, çevrim elemanları için belirlenen maksimum çalışma basınçlarına uygun olmalıdır)
- Yağlama yağı ile uyum (kullanılan yağlama yağı ile karışmamalıdır)
- Malzeme uyumluluğu (çevrimdeki elemanlar için korozif olmamalıdır)
- Özgül ısı (sıvı fazdaki özgül ısı yüksek olmalıdır)
- Termal iletkenlik (yüksek olmalıdır)
- Viskozite (sıvı faz ve buhar fazı için düşük olmalıdır)
- Ergime noktası (en düşük çevrim çalışma sıcaklığından daha düşük olmalıdır)
- Kütle akış hızı (düşük olmalıdır)
- Yoğuşma basıncı (atmosfer basıncından daha yüksek olmalıdır)
- Üçlü nokta (minimum çevre sıcaklığının altında olmalıdır)
- Entalpi değişimi (türbin içinde genişirken entalpi azalması büyük olmalıdır)
- Buhar özgül hacmi (eleman boyutları bakımından doymuş buhar hacmi düşük olanlar tercih edilmelidir)
- Isı kapasitesi (sıvı fazdaki ısı kapasitesi düşük olanlar, yüksek gizli ısı buharlaştırma oranı elde etmek için elverişlidir)

- Termodinamik performans (çevrim verimi ve/veya üretilen güç mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır)

Tüm bu kriterler göz önünde bulundurulduğunda, dizaynı yapılan güç bloğundaki ORÇ'nde kullanılmak üzere seçilen çalışma akışkanı R245fa'dır [46]. Bir düşük sıcaklık çalışma akışkanı olan R245fa, ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) onaylı ve Montreal Protokolü kapsamında kullanımına izin verilen hidroflorokarbon (HFC) soğutucuları ailesinin bir üyesidir. Ağırlıklı olarak atık ısı geri kazanımı uygulamalarında kullanılan ve ortalama kullanım ömrü 7,6 yıl olan R245fa'nın çevresel karakteristikleri ve ABD mevzuat bilgileri Çizelge 4.2'de, fiziksel ve termodinamik özellikleri ise Çizelge 4.3'te verilmiştir [47].

Çizelge 4.2: R245fa'nın çevresel karakteristikleri ve ABD mevzuat bilgileri.

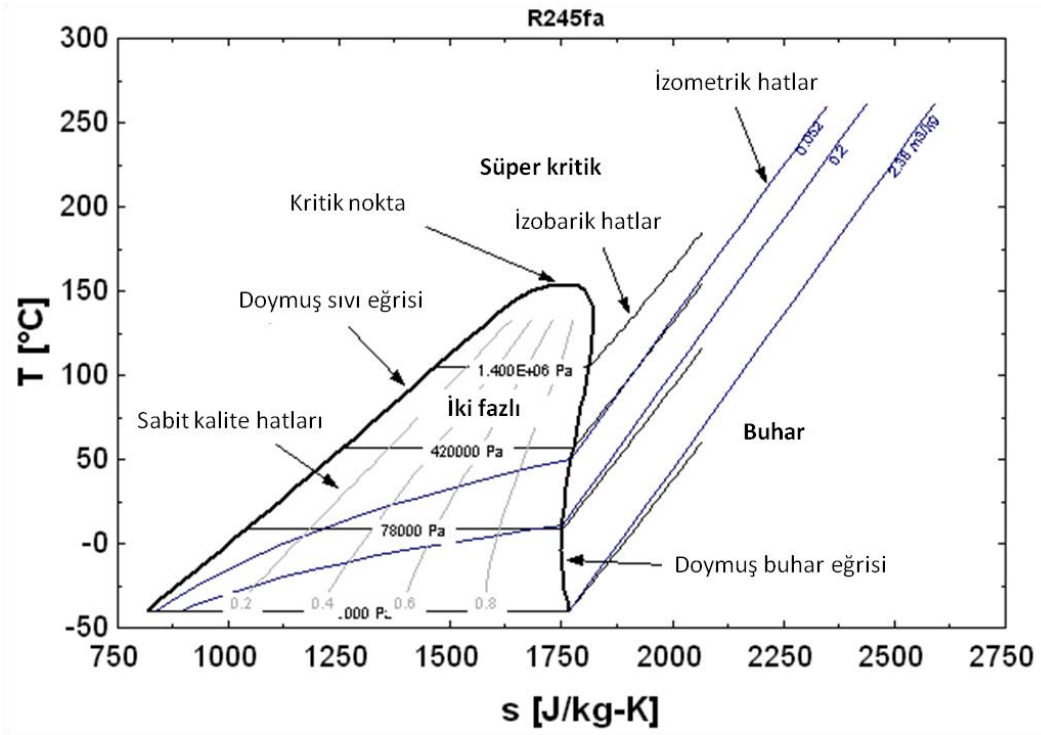
R245fa	
CAS numarası	460-73-1
Ozon tüketme potansiyeli (ODP)	0
Küresel ısınma potansiyeli (GWP)	950 (100 yıllık zaman ufku için)
VOC durumu	Muaf
ACGIH TLV	Yok
OSHA PEL	Yok
AIHA WEEL TWA	300 ppm (8 saatlik)
DOT tehlike sınıfı	Düzenlenmiş değil
RCRA	RCRA tehlikeli atık malzemeleri kullanılmamıştır
TSCA envanter durumu	Listelenmiş
SNAP onayı	Yeni santrifüjlü soğutucularda kullanımı onaylanmıştır

Çizelge 4.3: R245fa'nın fiziksel ve termodinamik özellikleri.

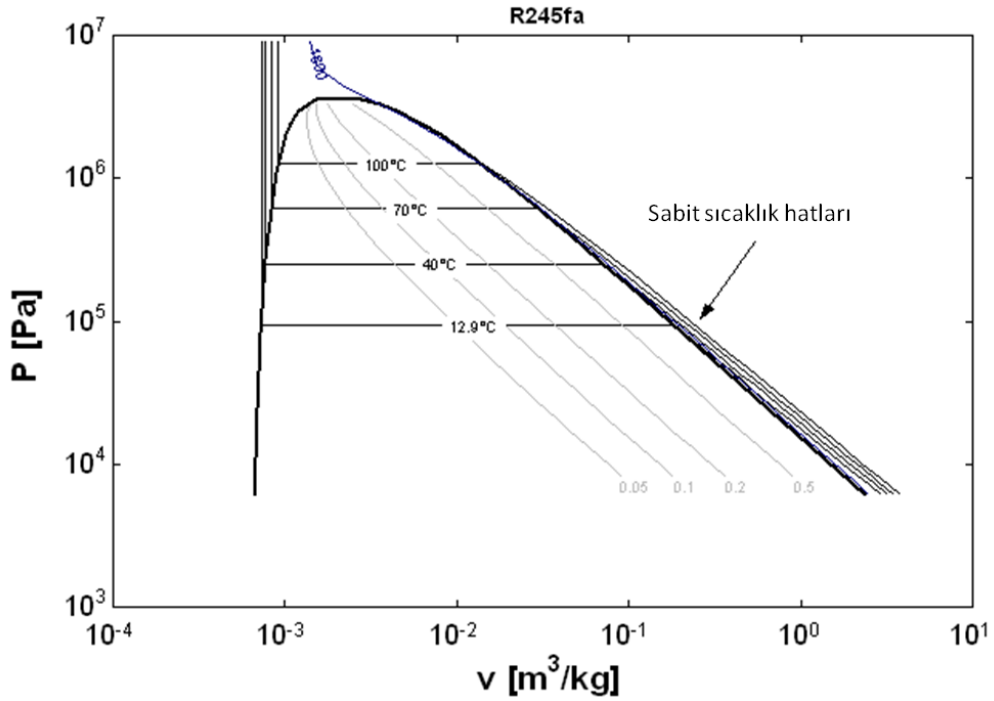
R245fa (25 °C'de)	
Kimyasal ismi	1,1,1,3,3 - pentafloropropan
Molekül formülü	CF ₃ CH ₂ CHF ₂
Molekül ağırlığı	134
Tutuşma limitleri @ 1 atm (% hacim) (ASTM E681-85)	Yok
Alevlenme noktası (ASTM D3828-87 ve ASTM D1310-86)	Yok
Su çözünürlüğü (R245fa içindeki)	1600 ppm
Soğutucu emniyet grup sınıflandırması (ASHRAE-34)	B1*
Kaynama noktası @ 1,01 bar	15,3 °C
Donma noktası @ 1,01 bar	< -107 °C
Kritik sıcaklığı	154,05 °C
Kritik basıncı	36,4 bar
Kritik yoğunluğu	517 kg/m ³
Buhar fazındaki yoğunluğu (kaynama noktasındaki)	5,921 kg/m ³
Sıvı fazdaki yoğunluğu	1339 kg/m ³
Sıvı fazdaki ısı kapasitesi	1,36 kJ/kg-K
Buhar fazındaki ısı kapasitesi (1,01 bar sabit basınçta)	0,8931 kJ/kg-K
Buharlaşma ısısı (kaynama noktasındaki)	196,7 kJ/kg
Sıvı fazdaki termal iletkenliği	0,081 W/m-K
Buhar fazındaki termal iletkenliği	0,0125 W/m-K
Sıvı fazdaki viskozitesi	402,7 mPa.s
Buhar fazındaki viskozitesi	10,3 mPa.s

*B1: Toksikite derecesi yüksek ve alev yayılımı yok

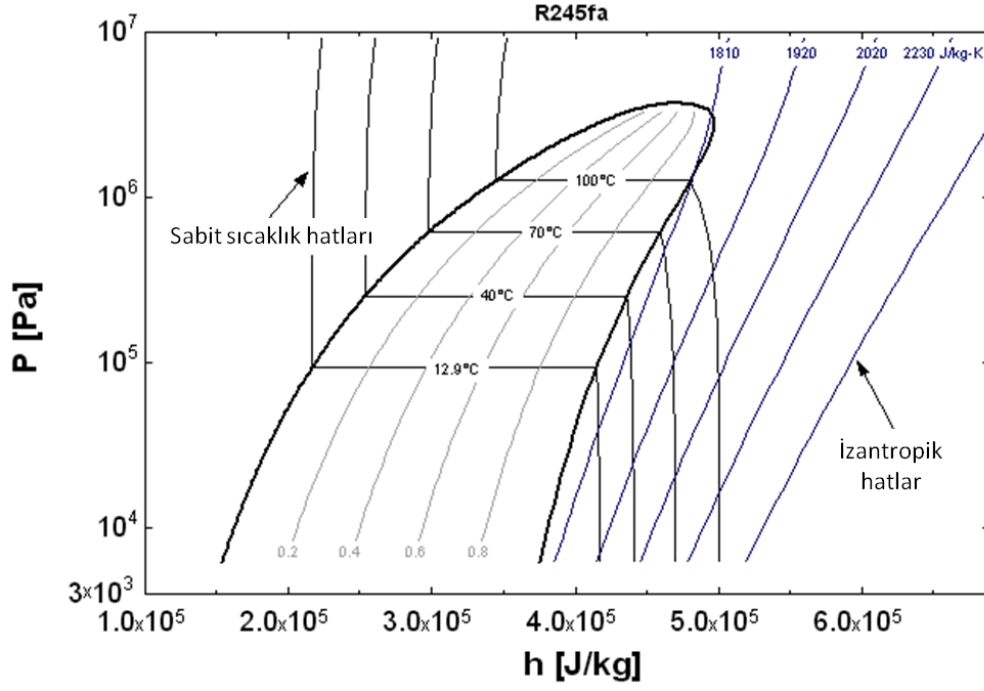
R245fa'ya ait sıcaklık-entropi, basınç-hacim ve basınç-entalpi diyagramları da sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir [48].



Şekil 4.4: R245fa'ya ait sıcaklık-entropi diyagramı.



Şekil 4.5: R245fa'ya ait basınç-hacim diyagramı.



Şekil 4.6: R245fa'ya ait basınç-entalpi diyagramı.

4.4 Flownex Programıyla Güç Bloğu Modellemesi

4.4.1 Kararlı durum için yapılan modelleme

Performans özellikleri ile karakterize edilebilen aksel ve santrifüj akışlı kompresör ve türbin gibi dinamik turbo-makinelerin performansı, Flownex programında;

- Basınç oranı (PR)
- Düzeltilmiş kütle akışı (CM)
- Düzeltilmiş hız (CS)
- Kılavuz kanat açısı
- İzantropik verim (η) veya Düzeltilmiş iş (CW)

parametreleri kullanılarak oluşturulan performans eğrileri ile temsil edilebilmektedir. Flownex programında türbin performansını temsil etmek için kullanılan; basınç oranı, düzeltilmiş kütle akışı, düzeltilmiş hız, düzeltilmiş iş ve izantropik verim parametreleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır [49]:

$$PR = \frac{P_{0i}}{P_{0e}} \quad (4.1)$$

$$CM = \frac{\dot{m}\sqrt{T_{0i}}}{P_{0i}} \quad (4.2)$$

$$CS = \frac{N/60}{\sqrt{T_{0i}}} \quad (4.3)$$

$$CW = \frac{\dot{W}}{P_{0i}\sqrt{T_{0i}}} \quad (4.4)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{P_{0i}}{P_{0e}}\right)^{\gamma-1/\gamma} - 1}{\left(\frac{T_{0e}}{T_{0i}}\right) - 1} \quad (4.5)$$

Bu eşitliklerdeki;

P_{0i} : Türbin girişindeki toplam basınç [bar]

P_{0e} : Türbin çıkışındaki toplam basınç [bar]

T_{0i} : Türbin girişindeki toplam sıcaklık [K]

T_{0e} : Türbin çıkışındaki toplam sıcaklık [K]

\dot{m} : Kütleli debi [kg/s]

N : Türbin dönüş hızı [dev/dak]

\dot{W} : Türbin shaft işi [kW]

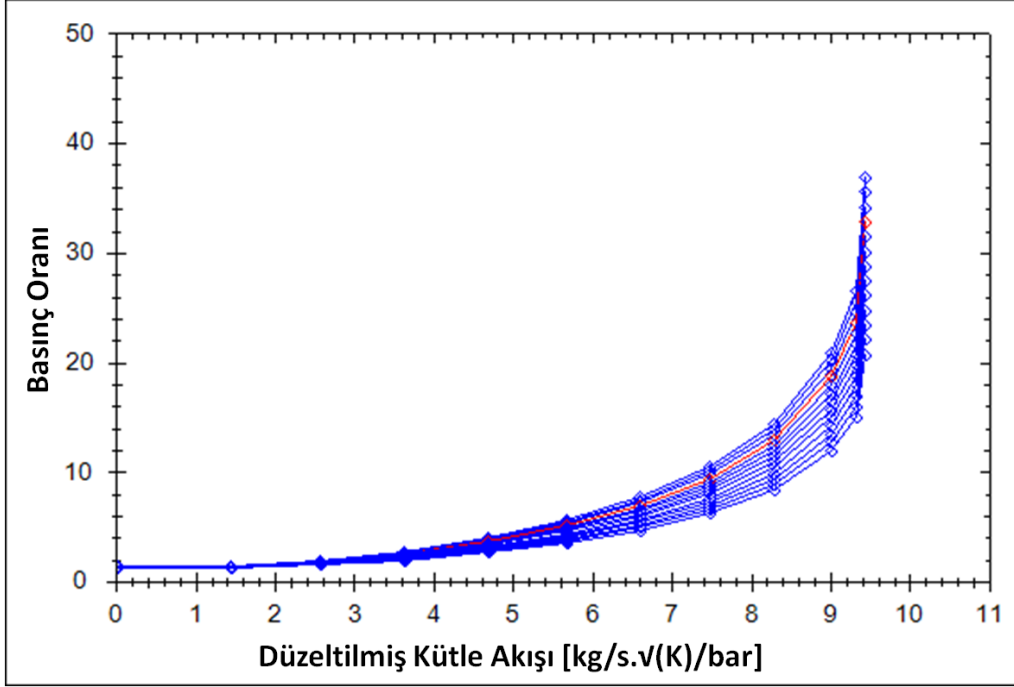
$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$: Isı kapasitesi oranı (İzantropik genişleme faktörü)

C_p : Sabit basınçtaki ısı kapasitesi [kJ/kg-K]

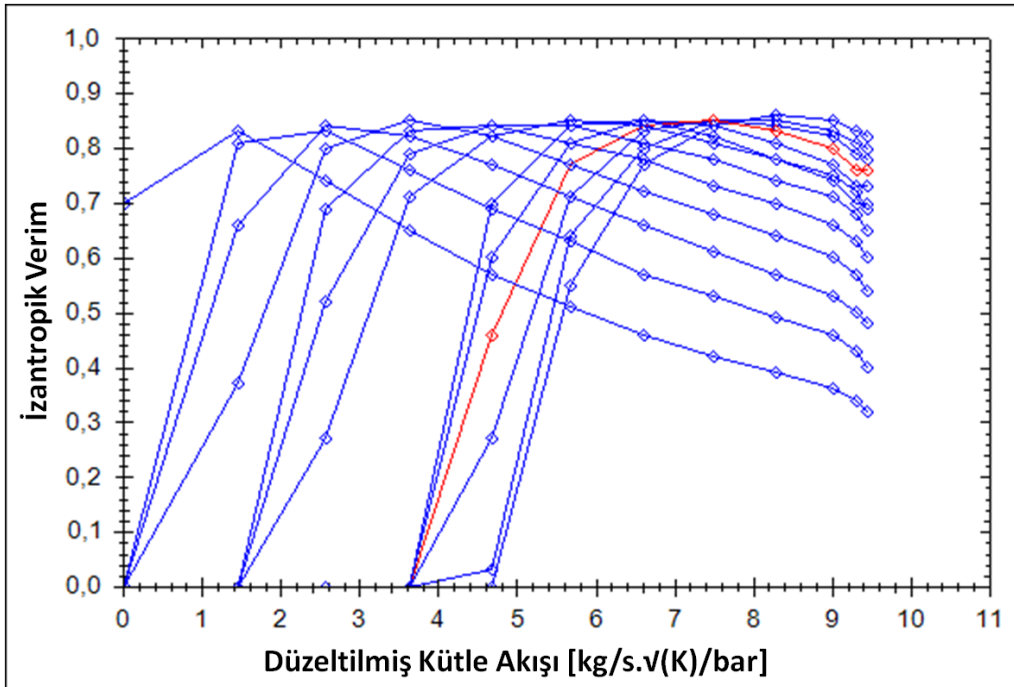
C_v : Sabit hacimdeki ısı kapasitesi [kJ/kg-K]

Dizaynı yapılan güç bloğunun Flownex programıyla ORÇ modellemesinde kullanılmak üzere türbin için oluşturulan sabit hızlardaki performans eğrileri, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Fikir vermesi açısından, farklı düzeltilmiş hızlar ($CS = 0; 0,28; 0,55; 0,83; 1,11; 1,38; 1,66; 1,94; 2,21; 2,49; 2,77; 3,04; 3,32$) için hesaplanan değerler kullanılarak oluşturulan bu performans eğrilerinden birer tanesini (0° kılavuz kanat açısında, $N = 3000$ dev/dak ve $T_{0i} = 130$ °C için

hesaplanmış düzeltilmiş hız değeri $CS = 2,49$ olan ve Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de kırmızı renk ile gösterilmiş olan eğrileri) oluşturmak için hesaplanan değerler, Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.7: Türbin için düzeltilmiş kütle akışı-basınç oranı performans eğrileri.



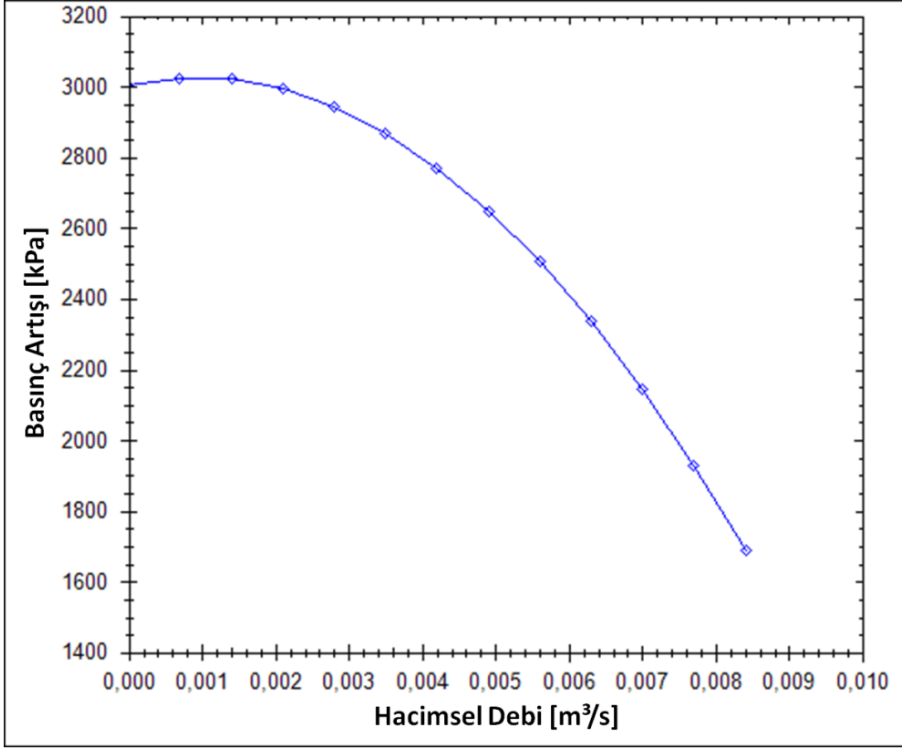
Şekil 4.8: Türbin için düzeltilmiş kütle akışı-izantropik verim performans eğrileri.

Çizelge 4.4: Türbin performans eğrilerinden CS = 2,49 için hesaplanan değerler.

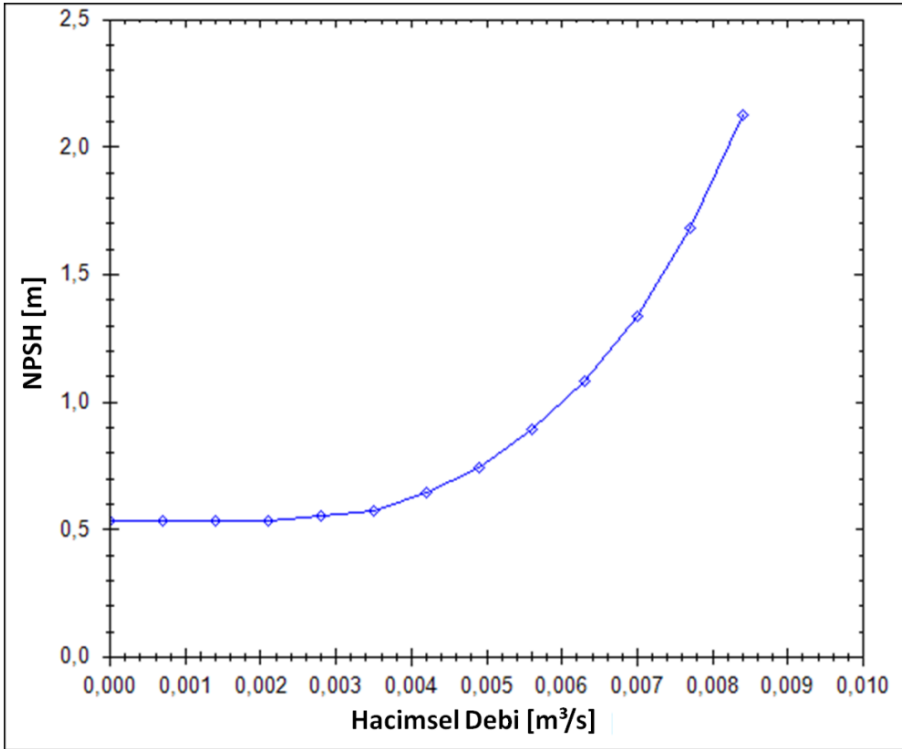
Düzeltilmiş Kütle Akışı [kg/s.√(K)/bar]	Basınç Oranı	İzantropik Verim
0	1,33	0
1,457	1,33	0
2,564	1,75	0
3,635	2,54	0
4,683	3,66	0,46
5,670	5,06	0,77
6,609	6,90	0,84
7,488	9,38	0,85
8,294	12,89	0,83
9,016	18,66	0,80
9,317	23,57	0,76
9,438	32,82	0,76

Dizaynı yapılan güç bloğunun Flownex programıyla ORÇ modellemesinde kullanılmak üzere pompa için oluşturulan performans eğrileri de Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bu eğrileri oluşturmak için hesaplanan değerler ise Çizelge 4.5'te verilmiştir [50]. Pompa performans eğrilerini oluştururken kullanılan referans yoğunluk ise (ORÇ'nde kullanılan çalışma akışkanı R245fa'nın sıvı fazdaki yoğunluğu) 1339 kg/m³'tür.

Bir akışkanın pompaya giriş basıncı ve pompa içindeki en düşük basınç düzeyi arasındaki fark olan net pozitif emme yüksekliği (NPSH), pompa için gereken ve mevcut NPSH olmak üzere iki şekilde ifade edilir. Pompanın güvenli bir şekilde çalışması için mevcut NPSH > gereken NPSH olmalıdır.



Şekil 4.9: Pompa için hacimsel debi-basınç artışı performans eğrisi.



Şekil 4.10: Pompa için hacimsel debi-NPSH performans eğrisi.

Çizelge 4.5: Pompa performans eğrileri için hesaplanan değerler.

Hacimsel Debi [m ³ /s]	Basınç Artışı [kPa]	NPSH [m]
0	3003,7938	0,53
0,000700548	3023,3497	0,53
0,001401096	3019,4385	0,53
0,002101645	2992,0602	0,53
0,002802193	2941,2147	0,55
0,003502741	2866,9021	0,57
0,004203289	2769,1224	0,64
0,004903838	2647,8755	0,74
0,005604386	2503,1610	0,89
0,006304934	2334,9803	1,08
0,007005482	2143,3320	1,33
0,007706031	1928,2166	1,68
0,008406579	1689,6340	2,12

İzmir’de kurulacağı varsayılan bir parabolik oluk kolektörlü yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrali için dizaynı yapılan güç bloğunun ORÇ modellemesini, Flownex programıyla yapabilmek için gerekli olan veriler (çevrime giren termal enerji miktarlarının tahmini değerleri), SAM programıyla yapılan GKA dizaynındaki hesaplamalar sonucu elde edilmiştir. Buna göre; GKA’ndan güç bloğuna (9 Temmuz günü saat 13.00’da) aktarılan maksimum termal enerji değeri olan 2022 kW baz alınarak Flownex programıyla yapılan güç bloğunun ORÇ modellemesi, kararlı durum için hiç bir hata vermeden çözülmüş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Evaporatöre giren termal enerji = 2022,17 kW

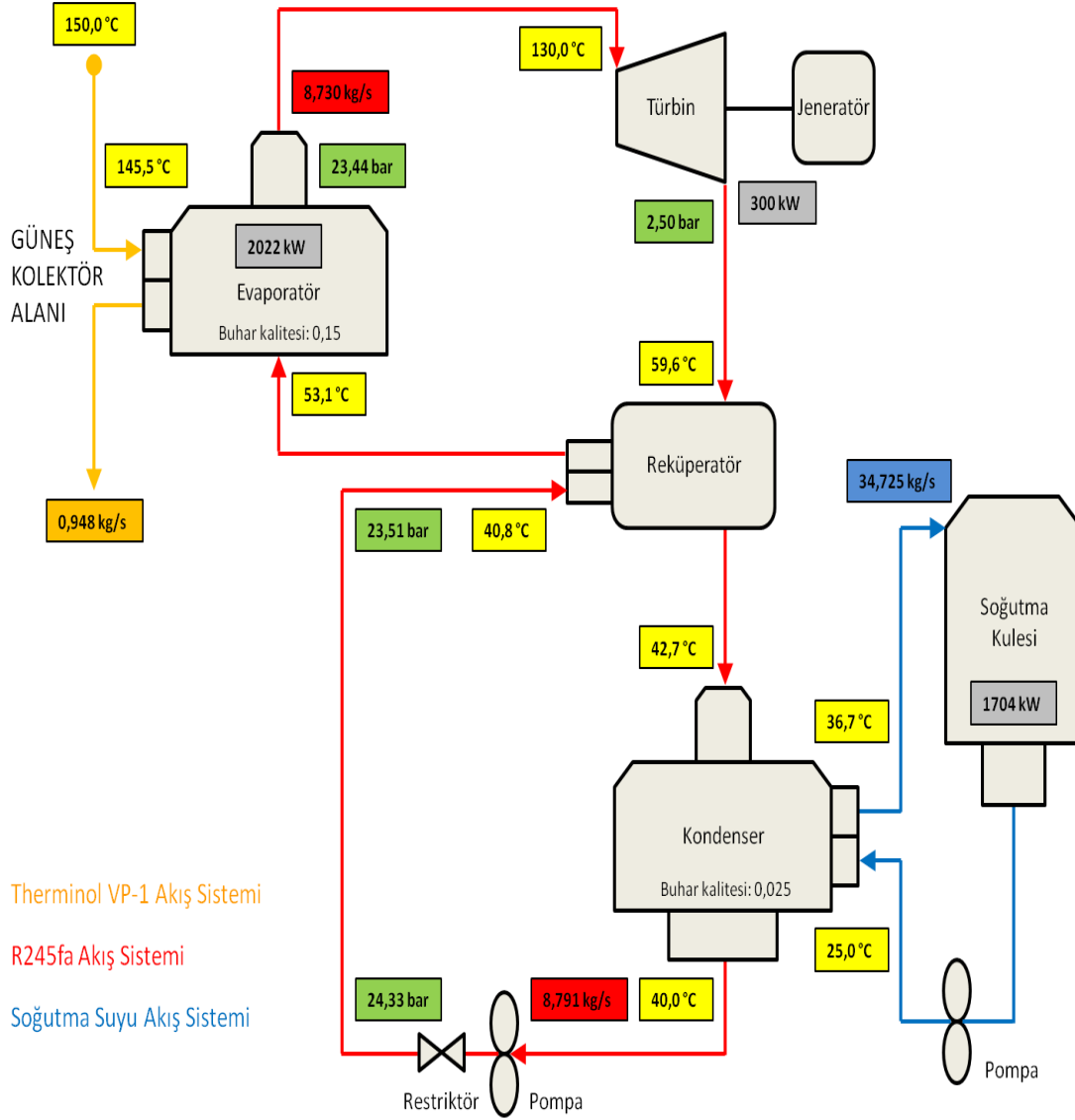
Kondenserden çıkan termal enerji = 1704,43 kW

Türbinde üretilen brüt güç = 300,02 kW

Brüt çevrim verimi = % 14,83

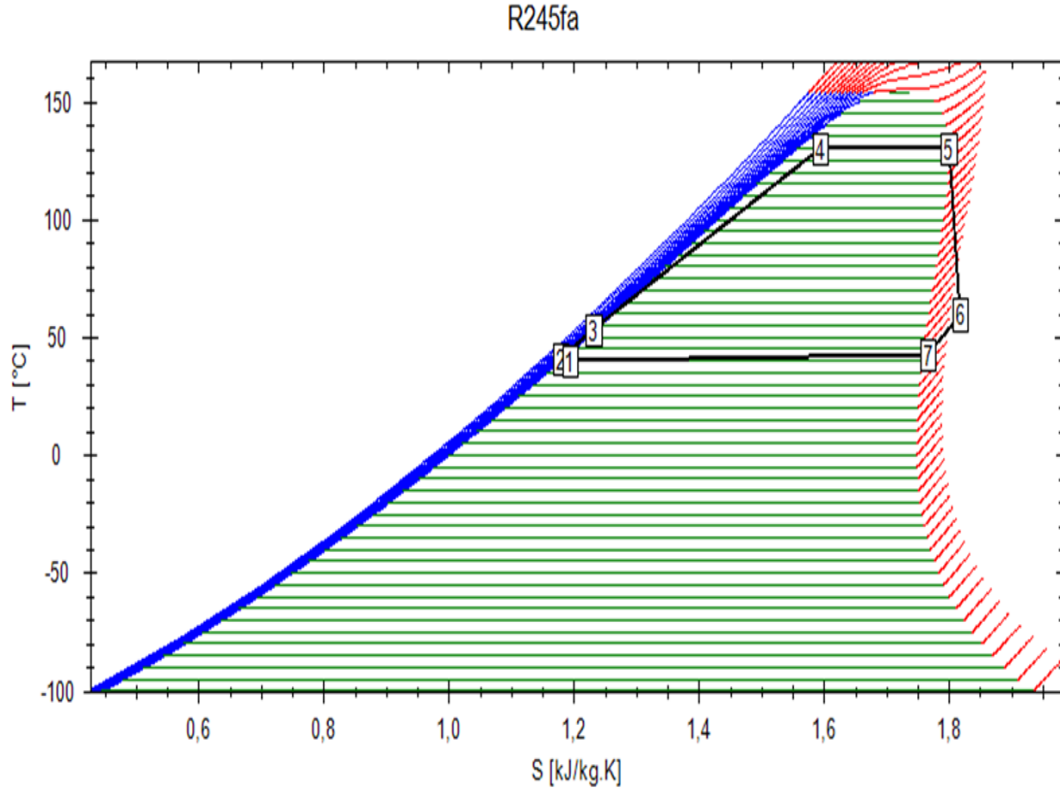
Çevrimdeki parazitik kayıplar = 17,72 kW (% 0,876)

Dizaynı yapılan güç bloğunun Flownex programıyla yapılan ORÇ modellemesinde kararlı durum için elde edilen sonuç değerlerinden bazıları, Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Dizaynı yapılan güç bloğunun kararlı durumdaki ORÇ modellemesi.

Dizaynı yapılan güç bloğunun Flownex programıyla yapılan ORÇ modellemesinde, çalışma akışkanı R245fa'nın kararlı durumda oluşan sıcaklık-entropi diyagramı da Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Dizaynı yapılan güç bloğunun kararlı durumdaki ORÇ modellemesinde R245fa'ya ait sıcaklık-entropi diyagramı.

Şekil 4.12'de: 1. Kondanser, 2. Restriktör çıkışı, 3. Reküperatör çıkışı, 4. Evaporatör, 5. Türbin girişi, 6. Türbin çıkışı, 7. Reküperatör çıkışı değerleridir. Dizaynı yapılan güç bloğundaki pompanın, çevrim kararlı durumda iken güvenli bir şekilde çalışması için Flownex programıyla yapılan ORÇ modellemesi ile belirlenen minimum evaporatör sıcaklığı 92 °C'dir (mevcut NPSH = 3,639 m, gereken NPSH = 3,613 m @ 92 °C). Dolayısıyla, dizaynı yapılan güç bloğu için çalışma sıcaklığı aralığı 92 °C ila 130 °C olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.6'da dizaynı yapılan güç bloğunun, çevrim kararlı durumda iken farklı evaporatör sıcaklıkları için hesaplanan; evaporatöre giren termal enerji, türbinde üretilen brüt güç ve brüt çevrim verimi değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.6: Evaporatör sıcaklıkları için hesaplanan türbin güç ve verim değerleri.

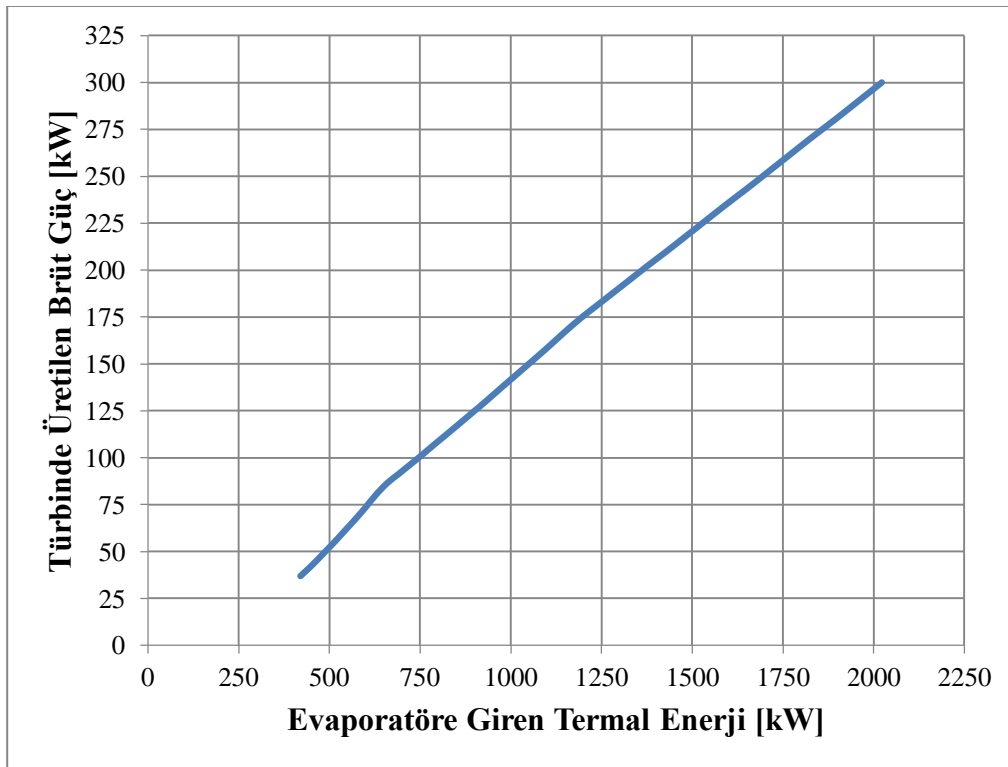
Evaporatör Sıcaklığı [°C]	Evaporatöre Giren Termal Enerji [kW]	Türbinde Üretilen Brüt Güç [kW]	Brüt Çevrim Verimi
130	2022,17	300,02	0,148
129	1956,17	289,89	0,148
128	1891,85	280,02	0,148
127	1827,02	270,43	0,148
126	1766,07	261,10	0,148
125	1706,73	252,03	0,148
124	1648,98	243,21	0,147
123	1590,91	234,65	0,147
122	1536,32	226,33	0,147
121	1483,25	218,25	0,147
120	1431,66	210,41	0,147
119	1379,89	202,80	0,147
118	1331,24	195,42	0,147
117	1283,98	188,26	0,147
116	1237,84	181,28	0,146
115	1192,55	174,44	0,146
114	1145,50	166,55	0,145
113	1100,70	158,69	0,144
112	1056,09	151,16	0,143
111	1013,02	143,93	0,142

Çizelge 4.6 (devam): Evaporatör sıcaklıkları için hesaplanan türbin güç ve verim değerleri.

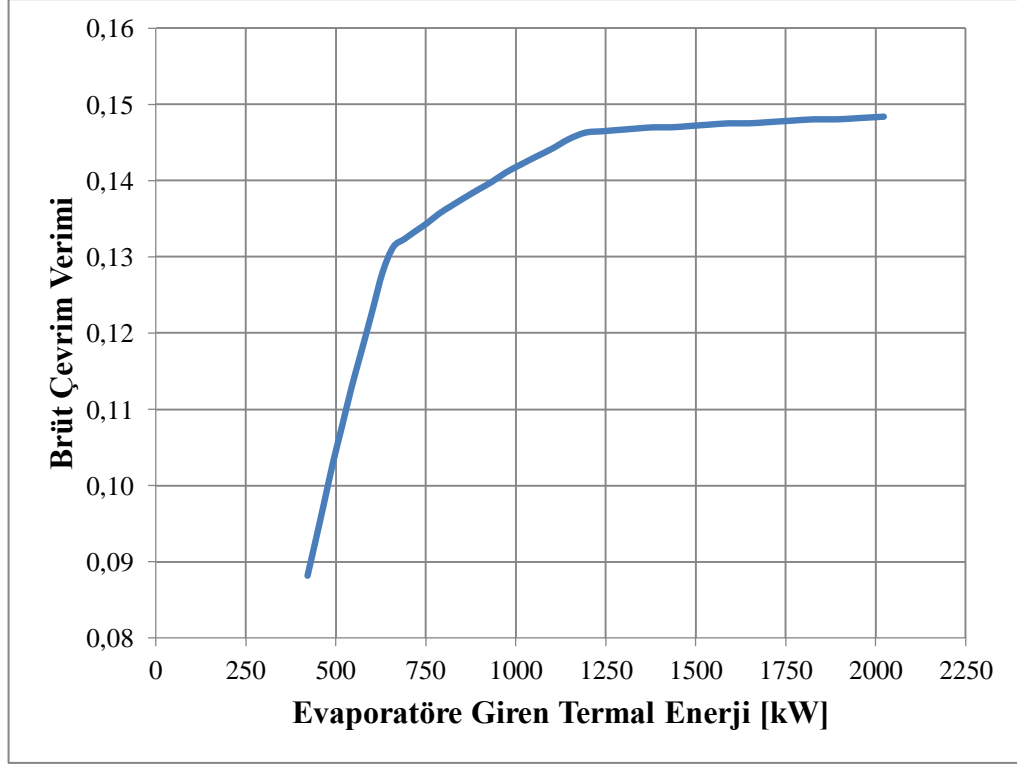
Evaporatör Sıcaklığı [°C]	Evaporatöre Giren Termal Enerji [kW]	Türbinde Üretilen Brüt Güç [kW]	Brüt Çevrim Verimi
110	971,45	137,01	0,141
109	932,49	130,37	0,140
108	893,73	124,02	0,139
107	856,33	117,93	0,138
106	820,27	112,11	0,137
105	785,50	106,53	0,136
104	752,95	101,20	0,134
103	720,61	96,10	0,133
102	689,44	91,22	0,132
101	658,62	86,45	0,131
100	628,94	80,47	0,128
99	599,48	73,56	0,123
98	570,58	67,13	0,118
97	542,22	61,14	0,113
96	516,01	55,57	0,108
95	490,26	50,40	0,103
94	466,59	45,61	0,098
93	443,30	41,16	0,093
92	420,33	37,05	0,088

Buradan hareketle; GKA'ndan güç bloğuna aktarılan (evaporatöre giren) 420,33 kW'tan küçük olan termal enerji miktarları ORÇ için gereken minimum çalışma sıcaklığını sağlamadığından, SAM programıyla yapılan GKA dizaynı sonucu 4873,54 MWh/yıl olarak hesaplanmış olan güç bloğuna aktarılan tahmini toplam termal enerji miktarından, güç üretiminde kullanılan net termal enerji miktarı 4843,26 MWh/yıl olarak hesaplanır. Çevrimin; 92 °C ila 130 °C çalışma sıcaklığı aralığında, ortalama % 13,5 brüt çevrim verimiyle, sürekli olarak kararlı durumda çalışması halinde, dizaynı yapılan güç bloğunda üretilecek tahmini brüt elektrik de 653,84 MWh/yıl olarak hesaplanabilir.

Flownex programıyla yapılan ORÇ modellemesinde, kararlı durumda çalışan güç bloğunda evaporatöre giren farklı miktardaki termal enerji değerleri için türbinde üretilen brüt güçte ve brüt çevrim veriminde meydana gelen değişimler, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13: Evaporatöre giren termal enerji-türbinde üretilen brüt güç eğrisi.

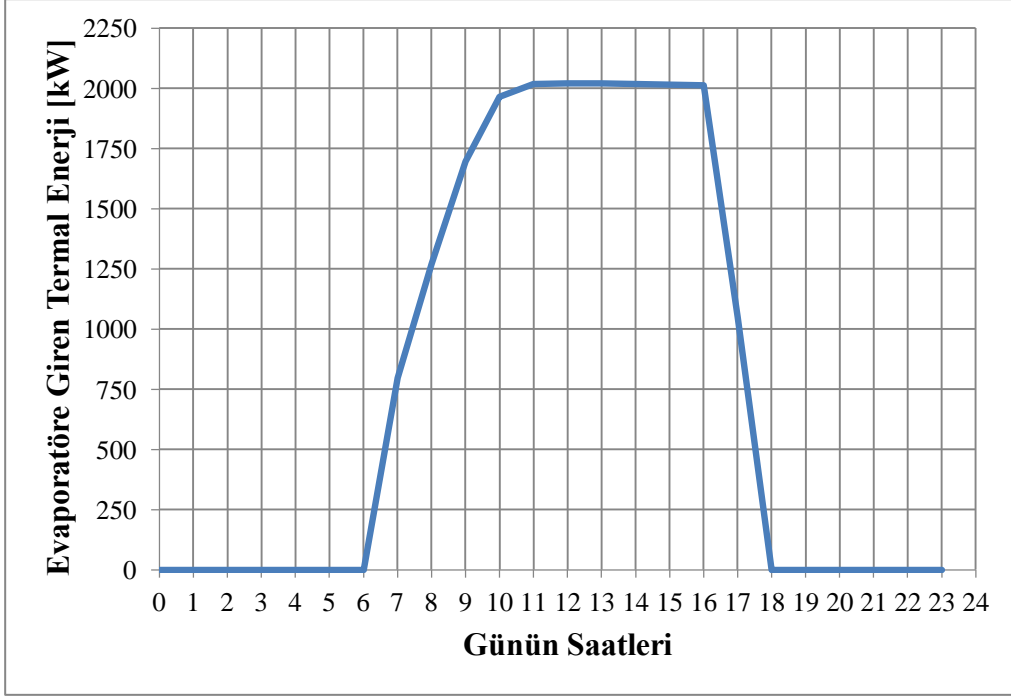


Şekil 4.14: Evaporatöre giren termal enerji-brüt çevrim verimi eğrisi.

4.4.2 Dinamik durum için yapılan modelleme

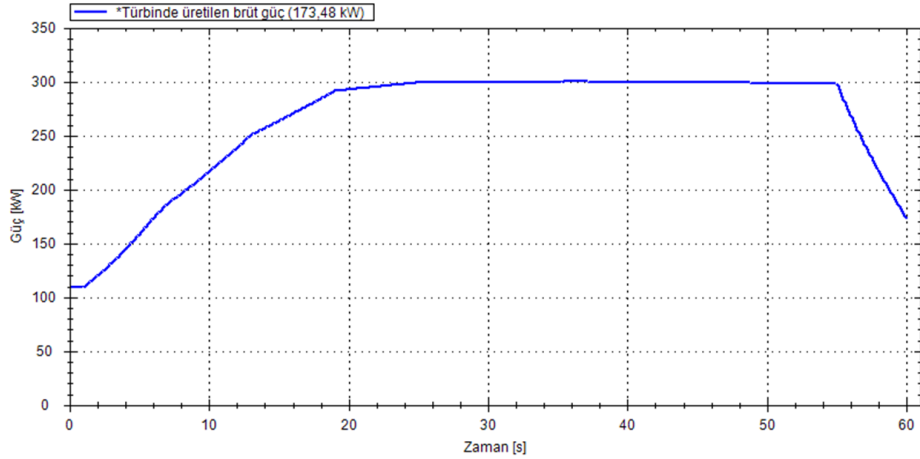
Flownex programında; kararlı durumda çalışan bir sistemde ya da bileşenlerinde meydana gelebilecek geçici ani değişim olayları için sistemin vereceği tepkiler, oluşturulan senaryolar gereği yapılan dinamik modellemelerle belirlenebilir.

Dizaynı yapılan güç bloğu kararlı durumda çalışırken, güç bloğunu oluşturan elemanlarda oluşacak herhangi bir değişim durumunda; başta türbinde üretilen brüt güç olmak üzere, sıcaklık, basınç, kütleli debi gibi parametrelerde meydana gelecek değişimleri önceden görebilmek için Flownex programıyla bir dinamik durum modellemesi yapılmıştır. Flownex programıyla dinamik durum için yapılan ORÇ modellemesinde, oluşturulacak senaryolar için 9 Temmuz günü seçilmiştir. SAM programıyla yapılan GKA dizaynındaki hesaplamalar sonucu 9 Temmuz günü için elde edilen GKA'ndan güç bloğuna aktarılan (evaporatöre giren) tahmini saatlik termal enerji değerlerinin profili, Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

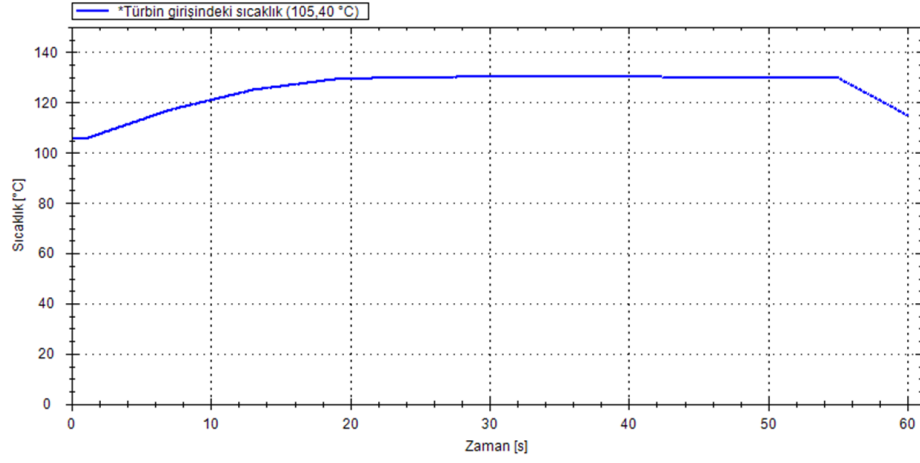


Şekil 4.15: 9 Temmuz günü için GKA’ndan güç bloğuna aktarılan (evaporatöre giren) tahmini saatlik termal enerji değerlerinin profili.

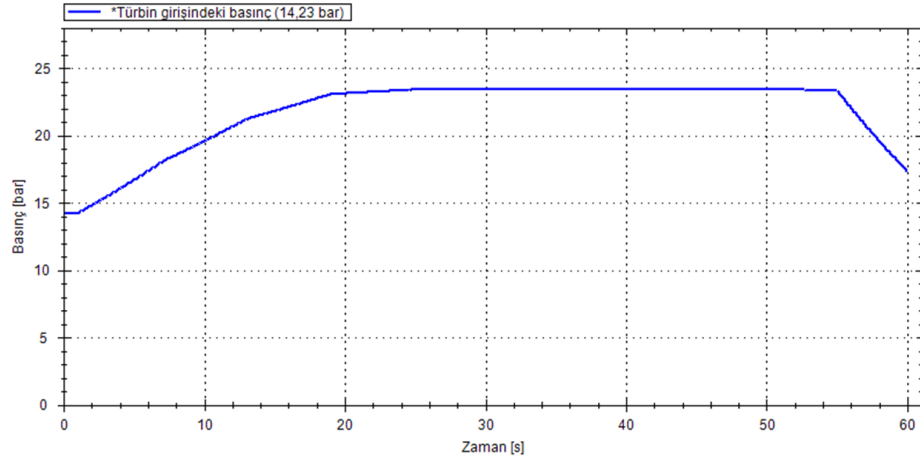
9 Temmuz günü saat 06.00 ile 18.00 arasındaki 12 saat boyunca GKA’ndan güç bloğuna aktarılan (evaporatöre giren) tahmini toplam termal enerji miktarı 18890 kW olarak hesaplanmıştır. Geriye kalan 12 saatte ise güç bloğuna termal enerji aktarımı yoktur. Dizaynı yapılan güç bloğu için Flownex programıyla; 9 Temmuz günü 07.00-17.00 saatleri arasındaki 10 saatlik zaman dilimi göz önüne alınarak, 1 saat = 6 sn olmak üzere toplam süresi 60 sn olan bir dinamik modelleme yapılmıştır. Yapılan modellemenin çalıştırılması sonucu, ORÇ’ndeki bazı parametrelerin bu zaman zarfındaki değişimleri (görünen son değerleriyle) Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



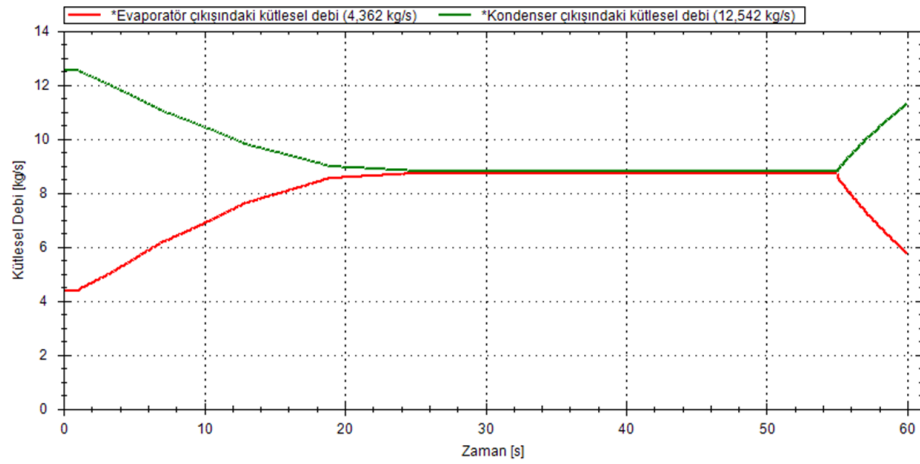
Şekil 4.16: 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında türbinde üretilen brüt güç.



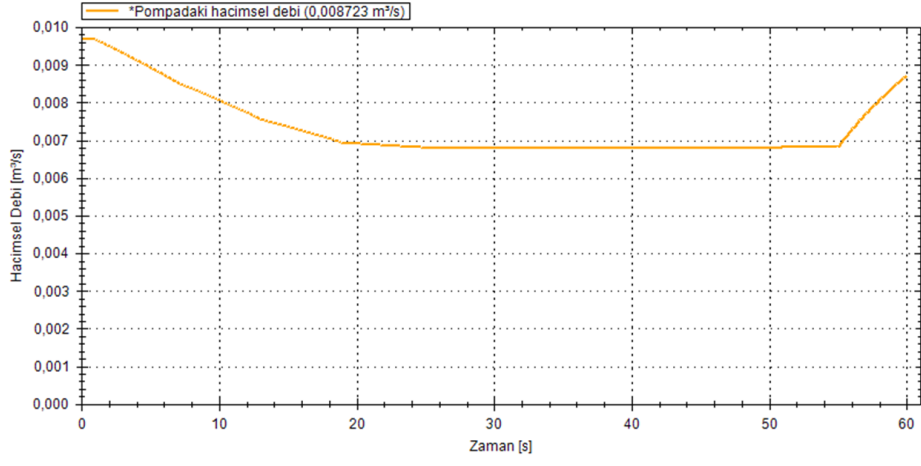
Şekil 4.17: 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında türbin girişindeki sıcaklık.



Şekil 4.18: 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında türbin girişindeki basınç.



Şekil 4.19: 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında evaporatör ve kondenser çıkışındaki kütleli debi.



Şekil 4.20: 9 Temmuz günü saat 07.00-17.00 arasında pompadaki hacimsel debi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; 2001 yılına ait meteorolojik verilere göre yıllık toplam DNI = 1561,6 kWh/m² olan İzmir’de kurulacağı varsayılan, 11287,2 m² toplam kolektör açıklık alanına sahip 24 adet parabolik oluk güneş kolektör düzeneğinden oluşan, bir yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralının güç bloğu için ORÇ dizaynı ve modellenmesi yapılmıştır.

Termal enerji depolama sistemi içermeyen GKA’nın dizaynı, SAM programıyla yapılmış ve % 27,65’lik güneş enerjisinden yıllık faydalanma oranı ile güç bloğuna aktarılan (evaporatöre giren) tahmini toplam termal enerji miktarı 4873,54 MWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Yardımcı bir enerji kaynağı ile desteklenmeyen, tek enerji kaynağı güneş olan (dolayısıyla sisteme giren termal enerji miktarı zamana bağlı olarak süresiz ve değişken olan), R245fa çalışma akışkanlı ORÇ ile elektrik üreten güç bloğunun dizaynı ve modellenmesi ise Flownex programıyla yapılmıştır. Kararlı durum için yapılan modelleme sonucu, çevrim için çalışma sıcaklığı aralığı 92 °C ila 130 °C olarak belirlenmiş ve ortalama % 13,5 brüt çevrim verimi ile üretilecek tahmini brüt elektrik miktarı 653,84 MWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Dinamik durum için yapılan modellemeyle de kararlı durumda çalışan güç bloğunda meydana gelebilecek geçici ve/veya ani değişim olayları için oluşturulacak çeşitli senaryolara göre, çevrim parametrelerinde (özellikle türbindeki brüt güç üretiminde) oluşacak değişimlerin analiz edilebilmesine olanak sağlanmıştır.

Dizaynı yapılan güç bloğundaki ORÇ’nin performansını arttırmaya yönelik olarak;

- DNI miktarının fazla olduğu ve enerji talebinin az olduğu zamanlarda çalışacak, sistemde meydana gelebilecek arıza-aksama durumlarında devreye girecek bir termal enerji depolama sistemi kullanılabilir.

- Sisteme destek olacak yardımcı bir enerji (doğalgaz, jeotermal gibi) kaynağıyla evaporatöre giren termal enerji miktarı sabit ve sürekli hale getirilerek, sistemin kararlı bir şekilde güç üretmesi sağlanabilir.
- Sisteme entegre edilecek kontrol sistemiyle; türbine giren kütleli debi, pompadan çıkan hacimsel debi, evaporatördeki buhar kalitesi vb. değişkenlerin takip edilerek sabit kalması, dolayısıyla sistemin optimum güç üretmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., Lemort, V.** (2013). Techno-Economic Survey of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 22, 168-186.*
- [2] **Tchanche, B. F., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., Papadakis, G.** (2011). Low-Grade Heat Conversion into Power Using Organic Rankine Cycles – A Review of Various Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, 3963-3979.*
- [3] **McMahan, A. C.** (2006). Design & Optimization of Organic Rankine Cycle Solar Thermal Power Plants, *MSc. Thesis*, University of Wisconsin, Madison.
- [4] **Quoilin, S.** (2011). Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications, *Doctoral Thesis*, Faculty of Applied Science, University of Liege.
- [5] **Url-1** <<http://www.barber-nichols.com/products/heat-engines/rankine-cycles/>>, alındığı tarih: 23.03.2013.
- [6] **Quoilin, S., & Lemort, V.** (2011). MECH. ENG.–The Organic Rankine Cycle: Thermodynamics, Applications, and Optimization, *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, UNESCO-EOLSS, Oxford, UK.
- [7] **Jing, L., Gang, P., Jie, J.** (2010). Optimization of Low Temperature Solar Thermal Electric Generation with Organic Rankine Cycle in Different Areas. *Applied Energy, Volume 87, 3355-3365.*
- [8] **Handayani, T. P., Harvey, A. P., Reay, D. A., Law, R.** (2011). Opportunities for Organic Rankine Cycles (ORCs) in the Process Industries. Presented at the *Sustainable Thermal Energy Management in the Process Industries International Conference (SusTEM2011)*, Newcastle upon Tyne, UK.
- [9] **Url-2** <<http://turboden.eu/de/public/downloads/11-COM.P-6-rev.14.pdf>>, alındığı tarih: 26.11.2012.
- [10] **Panesar, A. S.** (2012). A Study of Organic Rankine Cycle Systems with the Expansion Process Performed by Twin Screw Machines, *Doctoral Thesis*, School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London.
- [11] **Stine, W. B., & Geyer, M.** (2001). Power From The Sun. Retitled, revised and updated version of Solar Energy Systems Design by Stine W. B. and Harrigan R. W., John Wiley and Sons Inc. (1986), Chapter 1 Solar Energy System Design.
- [12] **Url-3** <<http://www.applied-solar.info/solarenergy/will-solar-panels-work-at-my-location/>>, alındığı tarih: 13.07.2013.

- [13] **Kalogirou, S. A.** (2009). Solar Energy Engineering Processes and Systems, Elsevier Inc., Chapter 3 Solar Energy Collectors, page 122.
- [14] **Isısan Akademi** (2011). Güneş Enerjisi Sistemleri, Yenilenebilir Enerjiler ve Alternatif Sistemler Servis Eğitimi Sunumu.
- [15] **Kılıç, A. ve Öztürk, A.** (1984). Güneş Işınımı ve Düz Toplayıcılar, SEGEM, Ankara. Bölüm 5 Işınımın Yoğunlaştırılması ve Yoğunlaştırılan Toplayıcılar, sayfa 179.
- [16] **Montes, M. J., Abanades, A., Martinez-Val, J. M., Valdes, M.** (2009). Solar Multiple Optimization for a Solar-Only Thermal Power Plant, Using Oil as Heat Transfer Fluid in the Parabolic Trough Collectors. *Solar Energy, Volume 83, 2165-2176.*
- [17] **Kalogirou, S. A.** (2009). Solar Energy Engineering Processes and Systems, Elsevier Inc., Chapter 10 Solar Thermal Power Systems, page 524.
- [18] **Concentrating Solar Power SnapShot** (2003). Parabolic Trough Solar Thermal Electric Power Plants. Produced for the U.S. Department of Energy by the NREL, a DOE National Laboratory. DOE/GO-102003-1740.
- [19] **Patnode, A. M.** (2006). Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants, *MSc. Thesis*, University of Wisconsin, Madison.
- [20] **Stuetzle, T. A.** (2002). Automatic Control of the 30 MWe SEGS VI Parabolic Trough Plant, *MSc. Thesis*, University of Wisconsin, Madison.
- [21] **Nasri, F., Ali, C., & Bacha, H. B.** (2011). A Review of Solar Thermal Electricity Production. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences (IJRRAS), Volume 8, Issue 3, 349-355.*
- [22] **Url-4** <http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/csp_technology.htm>, alındığı tarih: 06.01.2013.
- [23] **Batton, B.** (2000). Organic Rankine Cycle Engines for Solar Power, Barber-Nichols Inc. Presented at the *Solar 2000*, Madison, Wisconsin.
- [24] **Fernandez-Garcia, A., Zarza, E., Valenzuela, L., Perez, M.** (2010). Parabolic-Trough Solar Collectors and Their Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, 1695-1721.*
- [25] **Aringhoff, R.** (2006). Need for Regulatory Revisions to Successfully Secure CSP Projects in the US: Lessons from Spain, Solar Millennium LLC. Presented at the *NREL's Trough Workshop*, Incline Village, Nevada.
- [26] **Url-5** <<http://www.solar-millennium.de/english/archives/technology/parabolic-trough-power-plants/solar-field/index.html>>, alındığı tarih: 23.01.2013.
- [27] **Url-6** <http://www.nrel.gov/csp/troughnet/solar_field.html>, alındığı tarih: 11.01.2013.
- [28] **Kearney, D. W.** (2007). Parabolic Trough Collector Overview. Presentation of the *Parabolic Trough Workshop 2007* at the NREL, Golden CO.

- [29] **Url-7** <<http://www.global-greenhouse-warming.com/pyrheliometer.html>>, alındığı tarih: 13.07.2013.
- [30] **Duffie, J. A., & Beckman, W. A.** (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons Inc., New York.
- [31] **Url-8** <<http://www.powermag.com/saguaro-solar-power-plant-red-rock-arizona/>>, alındığı tarih: 04.01.2013.
- [32] **Gee, R. C., & Hale, M. J.** (2005). *Advanced Parabolic Trough Development, Presentation of the DOE Solar Program Review*, NREL.
- [33] **Canada, S., Brosseau, D., Kolb, G., Moore, L., Cable, R., Price, H.** (2005). Status of APS 1-MWe Parabolic Trough Project, Conference Paper NREL/CP-550-39205. Presented at the *2005 DOE Solar Energy Technologies*, Denver, Colorado.
- [34] **Url-9** <http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=24>, alındığı tarih: 16.02.2013.
- [35] **Canada, S., Cohen, G., Cable, R., Brosseau, D., Price, H.** (2005). Parabolic Trough Organic Rankine Cycle Solar Power Plant, Conference Paper NREL/CP-550-37077. Presented at the *2004 DOE Solar Energy Technologies*, Denver, Colorado.
- [36] **Url-10** <<http://www.solargenix.com/pdf/APS%20Press%20release.pdf>>, alındığı tarih: 06.01.2013.
- [37] **Ormat** (t.y.). Presentation of the Ormat in Solar Power Plants. Kişisel bağlantı.
- [38] **NREL** (2013). System Advisor Model (SAM) Version 2013.1.15 Manual.
- [39] **NREL** (2009). Solar Advisor Model Reference Manual for CSP Trough Systems, SAM Version 3.0.
- [40] **Url-11** <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=TUR/cname=Turkey>, alındığı tarih: 24.01.2013.
- [41] **Url-12** <<http://www.therminol.com/pages/products/eu/vp-1.asp>>, alındığı tarih: 29.01.2013.
- [42] **Flownex SE** (2013). Flownex Theory Manual for Version 8.2.1.2028.
- [43] **Flownex SE** (2013). Flownex Library Manual for Version 8.2.1.2028.
- [44] **Turboden** (2012). ORC Turboden Turbo-generator 10 CHP/HR Technical Description (11-C-174_e-Rev.01). Kişisel bağlantı.
- [45] **Barbieri, E. S., Morini, M., Pinelli, M.** (2011). Development of a Model for the Simulation of Organic Rankine Cycles Based on Group Contribution Techniques. *Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2011-45616*, Vancouver, British Columbia, Canada.
- [46] **Bryszewska-Mazurek, A., Swleboda, T., Mazurek, W.** (2011). Performance Analysis of a Solar-Powered Organic Rankine Cycle Engine. *Air & Waste Management Association, Volume 61, 3-6*.

- [47] **Zyhowski, G. J., Spatz M. M., Motta S. Y.** (2002). An Overview of the Properties and Applications of HFC-245fa. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, School of Mechanical Engineering, Purdue University, Indiana.
- [48] **Quoilin, S.** (2008). An Introduction to Thermodynamics Applied to Organic Rankine Cycles. Publication of STG International.
- [49] **Flownex SE** (2013). Flownex Tutorials, Tutorial 30 Compressor/Turbine Characteristics.
- [50] **Flownex SE** (2013). Flownex Training Course, Pumps and Default Inputs.

EKLER

EK A.1 : Isı transfer akışkanı Therminol VP-1'in karakteristik özellikleri

EK A.1

Çizelge A.1: Isı transfer akışkanı Therminol VP-1'in karakteristik özellikleri.

Therminol VP-1	
Görünüş	Berrak, su gibi beyaz sıvı
Bileşim	%26,5 Bifenil ve %73,5 difenil oksit ötektik karışımı
Nem içeriği, maksimum	300 ppm
Klor	< 10 ppm
Sülfür	< 10 ppm
Nötrleştirme sayısı	< 0,2 mg KOH/g
Bakır korozyonu (ASTM D-130)	<< 1 a
Alevlenme noktası, açık kap (ASTM D-92)	124 °C
Alevlenme noktası, kapalı kap (Pensky-Martens)	110 °C
Yanma noktası (ASTM D-92)	127 °C
Kendinden yanma sıcaklığı (ASTM E-659)	621 °C
Kinematik viskozite @ 40 °C	2,48 mm ² /s
Kinematik viskozite @ 100 °C	0,99 mm ² /s
Yoğunluk @ 25 °C	1060 kg/m ³
Özgül gravite (60 F/60 F)	1,069
Termal genişleme katsayısı @ 200 °C	0,000979/°C
Ortalama molekül ağırlığı	166
Kristalleşme noktası	12 °C
Donma üzerine hacim daralması	% 6,27
Erime üzerine hacim genişlemesi	% 6,69
Yüzey gerilimi, hava 25 °C iken	36,6 dyn/cm

Çizelge A.1 (devam): Isı transfer akışkanı Therminol VP-1'in karakteristik özellikleri.

Therminol VP-1	
Füzyon ısısı	97,3 kJ/kg
Normal kaynama noktası	257 °C
Buharlaşma ısısı @ 400 °C	206 kJ/kg
Özgül öz direnç @ 20 °C	$6,4 \times 10^{11}$ ohm.cm
Optimum kullanım aralığı, sıvı faz	12 °C - 400 °C
Optimum kullanım aralığı, buhar fazı	260 °C - 400 °C
Maksimum film sıcaklığı	425 °C
Sahte kritik sıcaklık	499 °C
Sahte kritik basınç	33,1 bar
Sahte kritik yoğunluk	327 kg/m ³

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Erdem Acar

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1978

E-Posta: acarerdem@ttmail.com

Lisans: İTÜ Deniz Teknolojisi Mühendisliği (2002)

