

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMİK SANTRALİN GÜNEŞ DESTEKLİ BİR HİBRİT SANTRALE
DÖNÜŞÜMÜNÜN TEKNİK ANALİZİ**

HAKAN AVCI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. BURHANETTİN ÇETİN**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMİK SANTRALİN GÜNEŞ DESTEKLİ BİR HİBRİT SANTRALE
DÖNÜŞÜMÜNÜN TEKNİK ANALİZİ**

Hakan AVCI tarafından hazırlanan tez çalışması 14.11.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Düriye BİLGE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ
İstanbul Ticaret Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmada mevcut bir termik santralin güneş destekli hibrit bir santrale dönüşümünün termodinamik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Çalışmada Yatağan Termik Santrali ve Çan Termik Santrali esas alınarak hibrit sistemlerin Türkiye için uygulanabilirliği araştırılmıştır. Hesaplamalar için Epsilon Professional yazılımı kullanılmıştır.

Gerek lisans gerekse yüksek lisans öğretim hayatım boyunca ve tez çalışmamın hazırlanması süresince desteğini ve değerli zamanını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN'e saygı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelebilmem için her türlü fedakarlığı yapan ve beni hiç yalnız bırakmayan sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Kasım, 2018

Hakan AVCI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	3
1.4 Türkiye’de Enerji ve Emisyon Durumu.....	3
BÖLÜM 2	
TERMODİNAMİK BAĞINTILAR.....	8
2.1 Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasası.....	8
2.1.1 Termodinamiğin Birinci Yasası.....	8
2.1.2 Termodinamiğin İkinci Yasası.....	8
2.1.2.1 Termodinamiğin İkinci Yasası Kelvin-Planck İfadesi.....	9
2.1.2.2 Termodinamiğin İkinci Yasası Clausius İfadesi.....	9
2.2 Sürekli Akışlı Açık Sistemler.....	9
2.2.1 Sürekli Akışlı Açık Sistemler İçin Enerji Korunumu.....	9
2.2.2 Sürekli Akışlı Açık Sistemler İçin Kütle Korunumu.....	9
2.3 Ekserji ve İkinci Yasa Verimi.....	10
2.3.1 Sürekli Akışlı Sistemler İçin Ekserji Dengesi.....	10
2.3.2 İkinci Yasa Verimi.....	10
2.4 Buharlı Güç Çevrimleri.....	11

2.4.1	Carnot Buhar Çevrimi.....	11
2.4.2	Rankine Çevrimi	13
BÖLÜM 3		
GÜNEŞ ENERJİSİ		14
3.1	Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri	15
3.1.1	Parabolik Oluk Tipi Güneş Enerjisi Sistemleri	15
3.1.2	Fresnel Tipi Güneş Enerjisi Sistemleri	16
3.1.3	Parabolik Çanak Tipi Güneş Enerjisi Sistemleri.....	17
3.1.4	Güneş Güç Kuleleri.....	17
3.2	Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	19
3.3	Fosil Yakıtlı Enerji Santrallerinin Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri İle Hibritleştirilmesi.....	20
3.3.1	Güneş Destekli Kömür Yakıtlı Enerji Santralleri	21
3.3.2	Entegre Güneş Kombine Çevrim Santralleri	22
BÖLÜM 4		
ÖRNEK UYGULAMALAR.....		24
4.1	Sistemlerin Tanımı	25
4.2	Sistemlerin Analizi.....	31
4.2.1	Termik Santrallerin Analizi	31
4.2.1.1	Enerji Analizi.....	31
4.2.1.2	Ekserji Analizi	32
4.2.2	Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemlerinin Analizi	33
4.2.2.1	Güneş Alanı Optimizasyonu	33
4.2.2.2	Güneş Alanı Enerji Analizi	36
4.2.2.3	Güneş Alanı Ekserji Analizi	38
4.2.3	Güneş Destekli Hibrit Santrallerin Enerji ve Ekserji Analizi.....	39
4.2.4	Güneş Destekli Hibrit Santrallerin Ekonomik Analizi	39
4.3	Uygulanan Senaryoların Bulguları.....	40
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		57
KAYNAKLAR.....		60
ÖZGEÇMİŞ.....		65

SİMGE LİSTESİ

A_{ID}	Yakıtın alt ısı değeri
A_{Net}	LFS güneş alanı net açıklık alanı
BDF	Bugünkü değer faktörü
b_e	Özgöl yakıt tüketimi
C_0	Lineer ısı kaybı katsayısı
C_1	İkinci kuvvetten olan ısı kaybı katsayısı
C_{GA}	Güneş alanı yatırım maliyeti
C_{Ek}	Ek maliyetler
C_{el}	Üretilen elektrikteki güneş enerjisi payından elde edilen yıllık gelir
C_{em}	Emisyon azaltımından elde edilen yıllık gelir
$C_{O\&M}$	İşletme maliyeti
C_T	İlk yılın sonunda elde edilen toplam gelir
C_y	Yakıt tasarrufundan elde edilen yıllık gelir
C_Y	İlk yatırım maliyeti
DNI	Doğrudan Işınım Şiddeti
$E_{\dot{\chi}}$	Sistemden çıkan toplam enerji
$EX_{kömür}$	Kömürün kimyasal ekserjisi
$EX_{güneş}$	LFS yüzeyine düşen güneş ışıınımı kaynaklı ekserji
E_g	Sisteme giren toplam enerji
$E_{yıl}$	Yıllık elektrik üretimi
$\dot{E}_{\dot{\chi}}$	Birim zamanda ısı, iş ve kütle ile kontrol hacminden çıkan enerji
$\dot{E}_g$	Birim zamanda ısı, iş ve kütle ile kontrol hacmine giren enerji
$E_{küttele,\dot{\chi}}$	Sistemden kütle akışı ile çıkan enerji
$E_{küttele,g}$	Sisteme kütle akışı ile giren enerji
g_{el}	Güneş enerjisi için YEKDEM elektrik birim fiyatı
g_{em}	Emisyon birim fiyatı
g_{GA}	Güneş alanı birim fiyatı
g_y	Yakıt birim fiyatı
$h_{akb,\dot{\chi}}$	Ara kızdırma buharı çıkış entalpisi
$h_{akb,g}$	Ara kızdırma buharı giriş entalpisi
$h_{b,\dot{\chi}}$	Buhar çıkış entalpisi
$h_{b,g}$	Buhar giriş entalpisi
$h_{bs,\dot{\chi}}$	Besleme suyu çıkış entalpisi

$h_{bs,g}$	Besleme suyu giriş entalpisi
$h_{kb,\zeta}$	Kızgın buhar çıkış entalpisi
$h_{kb,g}$	Kızgın buhar giriş entalpisi
h_{ζ}	Çıkan entalpi
h_g	Giren entalpi
IAM	Güneş ışını geliş açısı düzeltme katsayısı
i	Faiz oranı
$\dot{m}$	Kütle debisi
$\dot{m}_{akb}$	Ara kızdırma buharı kütle debisi
$\dot{m}_{b,g}$	Giren buhar kütle debisi
$\dot{m}_{b,\zeta}$	Çıkan buhar kütle debisi
$\dot{m}_{bs,g}$	Giren besleme suyu kütle debisi
$\dot{m}_{bs,\zeta}$	Çıkan besleme suyu kütle debisi
$\dot{m}_{co2}$	Karbondiyoksit emisyonu kütle debisi
$\dot{m}_g$	Giren kütle debisi
$\dot{m}_{kb}$	Kızgın buhar kütle debisi
$\dot{m}_{kömür}$	Yakıt kütle debisi
M	Saatlik kömür tüketimi
n	Geri ödeme süresi
$p_{güneş}$	Net güç üretimindeki güneş enerjisinin payı
$p_{güneş,yıl}$	Net güç üretimindeki güneş enerjisinin yıllık payı
q_{ζ}	Birim kütle için çıkan ısı
q_g	Birim kütle için giren ısı
$\dot{q}_{kayıp,H\&P}$	Birim alan başına boru ve ekipman ısı kaybı
Q_{ζ}	Sistemden ısı geçişi ile çıkan enerji
Q_g	Sisteme ısı geçişi ile giren enerji
$\dot{Q}_{\zeta}$	Birim zamanda kontrol hacminden ısı geçişi ile çıkan enerji
$\dot{Q}_g$	Birim zamanda kontrol hacmine ısı geçişi ile giren enerji
$\dot{Q}_{güneş}$	Birim zamandaki güneş kaynaklı ısı enerjisi
$\dot{Q}_k$	Birim zamanda T_k sıcaklığındaki sınırdan geçen ısı
$\dot{Q}_{kayıp,F}$	Birim zamandaki LFS kaynaklı enerji kaybı
$\dot{Q}_{kayıp,H\&P}$	Birim zamandaki ekipman ve boru kaynaklı enerji kaybı
$\dot{Q}_K$	Birim zamanda kazanda suya verilen enerji
$\dot{Q}_u$	Birim zamanda akışkana transfer olan ısı enerjisi
r	İskonto oranı
T_0	Çevre sıcaklığı
T_{bg}	Belirgin güneş sıcaklığı
T_k	k konumundaki sıcaklık
T_y	Güneşin yüzey sıcaklığı
t_{em}	Yıllık emisyon tasarruf miktarı
t_y	Yıllık yakıt tasarruf miktarı
X_C	Yakıttaki karbon ağırlık yüzdesi
X_H	Yakıttaki hidrojen ağırlık yüzdesi

X_O	Yakıttaki oksijen ağırlık yüzdesi
X_S	Yakıttaki kükürt ağırlık yüzdesi
X_N	Yakıttaki nitrojen ağırlık yüzdesi
X_W	Yakıttaki nem ağırlık yüzdesi
$\dot{X}_{yok}$	Birim zamanda toplam ekserji yok oluşu
$W_{\dot{\chi}}$	Sistemden iş geçişi ile çıkan enerji
W_g	Sisteme iş geçişi ile giren enerji
w_{net}	Birim kütle için net iş
$w_{pomp,g}$	Birim kütle için pompa işi
$w_{türb,\dot{\chi}}$	Birim kütle için türbin işi
W_{tr}	Tersinir iş
W_y	Yararlı iş
$\dot{W}$	Birim zamandaki toplam iş
$\dot{W}_{\dot{\chi}}$	Birim zamanda kontrol hacminden iş geçişi ile çıkan enerji
$\dot{W}_g$	Birim zamanda kontrol hacmine iş geçişi ile giren enerji
$\dot{W}_{Net}$	Birim zamanda net güç çıkışı
ΔE_{sistem}	Sistemin toplam enerjisindeki değişim
ΔT	Çevre ile akışkan arasındaki sıcaklık farkı
θ	Akışkanın birim kütlesinin enerjisi
$\theta_{\perp}$	Dikey eksen ile güneş ışınının enine düzlem üzerindeki izdüşümü arasındaki açı
θ_i	Güneş ışını ile güneş ışınının enine düzlem üzerindeki izdüşümü arasındaki açı
ψ	Akış ekserjisi
ϕ_{kuru}	Yakıt ekserjisinin ısı değerine oranı
η_{II}	İkinci yasa verimi
η_{cl}	Ayna yüzeyi temizlik oranı
η_{ex}	Ekserji verimi
$\eta_{ex,hibrit}$	Hibrit santral için ekserji verimi
$\eta_{ısı}$	Isıl verim
$\eta_{ısı,tr}$	Tersinir ısı verim
η_K	Kazan verimi
η_{opt}	Optik verim
$\eta_{opt,maks}$	Maksimum optik verim
η_p	Pompa verimi
η_{th}	Termik verim
$\eta_{th,hibrit}$	Hibrit santral için termik verim

KISALTMA LİSTESİ

AB ETS	Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi
ABÖİ	Alçak Basınç Ön Isıtıcısı
ABT	Alçak Basınç Türbini
ÇTS	Çan Termik Santrali
DNI	Doğrudan Işınım Şiddeti
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
EUA	Avrupa Birliği Emisyon Tahsisleri
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GÖS	Geri Ödeme Süresi
LFS	Lineer Fresnel Sistem
OBT	Orta Basınç Türbini
TMY	Tipik Meteorolojik Yıl
YBÖİ	Yüksek Basınç Ön Isıtıcısı
YBT	Yüksek Basınç Türbini
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
YTS	Yatağan Termik Santrali

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. 1	2017 yılı elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı..... 4
Şekil 1. 2	Yakıta göre CO ₂ emisyonu değerlerinin 1973-2014 yılları değişimi..... 6
Şekil 2. 1	İki Carnot buhar çevriminin T-s diyagramı..... 12
Şekil 2. 2	Basit ideal Rankine Çevrimi..... 13
Şekil 3. 1	Parabolik oluk tipi güneş enerjisi sistemi..... 16
Şekil 3. 2	Fresnel tipi güneş enerjisi sistemi..... 17
Şekil 3. 3	Parabolik çanak tipi güneş enerjisi sistemi 18
Şekil 3. 4	Güneş güç kulesi 18
Şekil 3. 5	Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası 19
Şekil 3. 6	Güneş destekli kömür yakıtlı santraller için proses şemaları 22
Şekil 3. 7	Entegre güneş kombine çevrim santrali proses şeması..... 23
Şekil 4. 1	Yatağan Termik Santrali akış şeması 26
Şekil 4. 2	Çan Termik Santrali akış şeması 27
Şekil 4. 3	Senaryoların akış şeması 30
Şekil 4. 4	TMY grafikleri 36
Şekil 4. 5	Yatay Kuzey-Güney izleme eksenine sahip LFS için aç tanıımı..... 37
Şekil 4. 6	LFS için geliş açısı düzenleyicisi 37
Şekil 4. 7	LFS çıkış sıcaklığına göre maksimum optik verim 38
Şekil 4. 8	Ön ısıtıcıya giren buhar debisine göre modül sayısı değişimi 42
Şekil 4. 9	DNI'ya göre güneş alanına giren besleme suyu debisi 42
Şekil 4. 10	Spesifik tarihlere göre özgül yakıt tüketimindeki değişim 49
Şekil 4. 11	Spesifik tarihlere göre güneş enerjisi payının değişimi..... 50
Şekil 4. 12	DNI'ya göre enerji ve ekserji veriminin değişimi 51
Şekil 4. 13	DNI'ya göre özgül yakıt tüketiminin değişimi 51
Şekil 4. 14	Güneş alanına göre özgül yakıt tüketiminin değişimi 52
Şekil 4. 15	Güneş alanına göre enerji ve ekserji veriminin değişimi 52
Şekil 4. 16	Yük faktörüne göre enerji ve ekserji veriminin değişimi 53
Şekil 4. 17	Yük faktörüne göre özgül yakıt tüketiminin değişimi 54
Şekil 4. 18	Emisyon birim fiyatı ile geri ödeme süresinin değişimi 55
Şekil 4. 19	Güneş alanı birim fiyatı ile geri ödeme süresinin değişimi 56
Şekil 4. 20	YEKDEM elektrik birim fiyatı ile geri ödeme süresinin değişimi 56

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemlerinin karşılaştırılması 19
Çizelge 3. 2	Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı..... 20
Çizelge 3. 3	Güneş destekli hibrit santraller 23
Çizelge 4. 1	Tek ünite için YTS ve ÇTS verileri 28
Çizelge 4. 2	Kömürlerin element analizi 32
Çizelge 4. 3	NOVA-1 teknik verileri..... 33
Çizelge 4. 4	Genetik algoritma için optimizasyon değerleri 34
Çizelge 4. 5	Optimizasyon parametreleri 34
Çizelge 4. 6	Güneş destekli hibrit santraller için tasarım şartları 35
Çizelge 4. 7	LFS için veriler..... 38
Çizelge 4. 8	Ekonomik parametreler 40
Çizelge 4. 9	Optimizasyon sonuçları 41
Çizelge 4. 10	Tasarım şartlarında elde edilen sonuçlar 43
Çizelge 4. 11	Her bir senaryo için yıl bazında sonuçlar 47
Çizelge 4. 12	Senaryolar için geri ödeme süreleri 55

TERMİK SANTRALİN GÜNEŞ DESTEKLİ BİR HİBRİT SANTRALE DÖNÜŞÜMÜNÜN TEKNİK ANALİZİ

Hakan AVCI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Burhanettin ÇETİN

Türkiye, özellikle son yıllarda, elektrik üretiminde yerli kömür ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmayı hedef edinmiştir. Elektrik üretiminde kömürün daha fazla kullanılması çevreye zararlı olan emisyon gazlarının artışına neden olacaktır. Kömür kaynaklı bu problemlerin azaltılması için ise yenilenebilir enerji kaynakları kullanılabilir.

Bu çalışmada, mevcut kömürlü bir termik santralin güneş destekli hibrit santrale dönüşümünün termodinamik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Temel alınan santraller Yatağan ve Çan Termik Santralleridir. Çalışmada ilk olarak güneş alanının büyüklüğü optimize edilmiştir. Optimizasyon parametreleri olarak besleme suyu debisi ve modül sayısı alınmıştır. Optimizasyon yapılırken hibrit santralde güç artışının olmadığı, sadece yakıt tasarrufunun olduğu dikkate alınmıştır. Besleme suyu ön ısıtıcıları için çekilen ara buhar debisini sıfır yapacak güneş alanı değeri optimizasyonun sınır şartı seçilmiştir. Güneş destekli hibrit santral için tasarım şartları olarak kuzey yarım kürede en uzun günün yaşandığı tarih olan 21 Haziran, bu tarihte güneşin en yüksek noktada olduğu yerel saat olan 13.00, 900 W/m^2 radyasyon değeri ve santralin %100 yük koşulları altında çalıştığı varsayımı kabul edilmiştir. Spesifik tarihler (21 Mart, 21 Haziran ve 21 Aralık), zaman, güneş radyasyon değeri, güneş alanı ve yük faktörü parametre olarak alınmıştır. Ele alınan parametrelere göre hibrit santralin enerji ve ekserji verimi ile özgül yakıt tüketimi hesaplanmış olup referans alınan santrallere göre değişimleri irdelenmiştir. Daha sonra %100, %75 ve %50 yük koşullarında ilk önce yıllık yakıt

tasarrufu ve daha sonra yakıt tasarrufuna bağılı olarak yıllık karbondioksit emisyon azaltımı hesaplanmıştır. Son olarak ekonomik hesaplar için emisyon, güneş alanı ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) elektrik birim fiyatı parametre olarak alınarak yatırımların geri ödeme süreleri irdelenmiştir. Termodinamik analizler sonucunda, her iki santral için de güneş alanının yüksek basınç ön ısıtıcıların hepsine paralel olarak yerleştirilmesinin en uygulanabilir çözüm olduğu tespit edilmiştir. Güneş alanının yüksek basınç ön ısıtıcıların hepsine paralel olarak yerleştirildiği senaryolarda yıllık yakıt tasarrufu, Yatağan Termik Santrali için 16.513,3 t/yıl ve Çan Termik Santrali için 7.003,7 t/yıl değerini alarak en büyük değerine ulaşmıştır. Bu senaryolar için Yatağan Termik Santrali'nde %0,95'lik, Çan Termik Santrali'nde ise %0,61'lik yıllık yakıt tasarrufu ve yıllık emisyon azaltımı sağlanmıştır. Tasarım şartlarında, yıllık yakıt tasarrufunun en fazla olduğu senaryolar için termik verim Yatağan Termik Santrali'nde %8,9, Çan Termik Santrali'nde %7,2 düşüş göstermiştir. En iyi senaryolar için dahi güneş alanı birim fiyatının, Yatağan Termik Santrali için 138,9 €/m²'ye, Çan Termik Santrali için ise 127,1 €/m²'ye düşmesi durumunda yedi yıllık geri ödeme süresinin sağlanabileceği görülmüştür. YEKDEM elektrik birim fiyatı ise, Yatağan Termik Santrali için 0,24 €/kWh ve Çan Termik Santrali için 0,26 €/kWh olursa aynı şekilde yedi yıllık geri ödeme süresi sağlanabilir. Sonuç olarak, Türkiye'de uygulanacak bu hibrit sistemin finansal açıdan gelecek yıllarda çok daha ekonomik olabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, hibrit güç santrali, emisyon, lineer fresnel sistem, geri ödeme süresi

TECHNICAL ANALYSIS OF A SOLAR-AIDED THERMAL POWER PLANT

Hakan AVCI

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Burhanettin ÇETİN

Turkey, especially in recent years, in electricity production aims to increase the use of domestic coal and renewable energy sources. Greater use of coal in electricity generation will cause increase of emissions of harmful to the environment. Renewable energy sources can be used to reduce these problems caused by coal.

In this study, the thermodynamic and economic analysis of the conversion of an existing coal-fired thermal power plant to a solar-aided hybrid power plant was conducted. The basic plants are Yatağan and Çan Thermal Power Plants. At first in this study, the size of the solar field is optimized. Feed water and number of modules were taken as optimization parameters. When optimization is done, it is considered that there is no power increase in the hybrid power plant, only fuel saving. The boundary condition of the optimization is the value of the solar field which will make zero the extraction steam flow for the feed water preheaters. As a design condition for a solar-aided hybrid power plant, it is assumed that the longest daytime in the northern hemisphere is 21 June, at which time the sun is at its highest point 13.00, with a radiation value of 900 W/m^2 and the plant operates under 100% load conditions. Specific dates (21 March, 21 June and 21 December), time, solar radiation value, solar field and load factor are taken as parameters. According to the parameters considered, energy and exergy efficiency of the hybrid power plant and the specific fuel consumption of the hybrid power plant was calculated and the changes according to the reference plants were examined. Then, at 100%, 75% and 50% load conditions,

firstly annual fuel savings was calculated then annual carbon dioxide emission reduction was calculated based on annual fuel savings. Lastly, for economic calculations, the emission, solar and YEKDEM electricity unit prices have been taken as parameters and the payback times of the investments have been examined. As a result of the thermodynamic analysis, it has been found that for both power plants, it is the most feasible solution to place the solar field parallel to all of the high-pressure preheaters. In the scenario where the solar field is installed parallel to all of the high-pressure preheaters, annual fuel saving reached its highest value by taking 16.513,3 t/year for Yatağan Thermal Power Plant and 7,003,7 t/year for Çan Thermal Power Plant. For these scenarios, annual fuel savings and annual emission reductions were achieved at 0.95% at Yatağan Thermal Power Plant and 0.61% at Çan Thermal Power Plant. In the design conditions, the annual thermal efficiency of the Yatağan Thermal Power Plant decreased by 8,9% and Çan Thermal Power Plant by 7,2% in the scenario where annual fuel saving is the highest. Even for the best scenarios, seven-year payback time could be achieved if the unit price of the solar field drops to 138,9 €/m² for Yatağan Thermal Power Plant and 127,1 €/m² for Çan Thermal Power Plant. If the electricity unit price of YEKDEM is 0,24 €/kWh for the Yatağan Thermal Power Plant and 0,26 €/kWh for the Çan Thermal Power Plant, the same seven-year payback time can be provided. As a result, in the coming years from a financially point of this hybrid system to be implemented in Turkey it has been shown to be much more economical.

Keywords: Solar power, hybrid power plant, emission, linear fresnel system, payback time

1.1 Literatür Özeti

Hibritleştirme, güneş enerjisinin uygun maliyetlerde kullanılmasında büyük bir potansiyele sahiptir. Bir güneş destekli hibrit santral geleneksel bir termik santralin mevcut altyapısını kullanarak, sadece termik güneş enerjisi santrali kurulduğunda doğacak olan buhar türbini, besleme suyu ön ısıtıcısı, kondenser, enerji depolama cihazı vb. gibi ekipman yatırımlarını önlenmiş olur. Aynı zamanda, güneş enerjisinin süreklilik probleminden doğan sorunların çözülmesini sağlar. Buna ek olarak, mevcut termik santrallerde güneş enerjisinin kullanılması, yakıt tasarrufu ve karbondioksit gibi sera gazı emisyonlarının azaltılmasını sağlar. Termik güneş enerjisi santrali kazan veya besleme suyu ön ısıtıcılarına paralel olarak yerleştirilerek kömürle çalışan termik santrallere kolayca entegre edilebilir. Güneş enerjisi ile sağlanan ısı besleme suyunu ısıtarak türbinden çekilen ara buharın azalmasını veya tamamen sıfırlanmasını sağlayabilir. Böylece aynı güç çıktısı daha az yakıtla üretilmiş olur. Yüksek ve orta basınç besleme suyu ön ısıtıcılarına paralel olarak yerleştirilen güneş alanı, alçak basınç besleme suyu ön ısıtıcılarına paralel olarak yerleştirilen güneş alanından daha etkilidir. Güneş alanına gönderilen besleme suyu miktarı güneş radyasyon değerine ve güneş alanının çalışma sıcaklığı ile basıncı ise güneş alanının paralel olarak yerleştirildiği besleme suyu ön ısıtıcısının çalışma koşullarına bağlıdır [1].

Literatürde, Yang Y. vd. [2] güneş alanının kömürlü termik santrale entegrasyonunun yöntemleri üzerine çalışmışlar ve sistemin birim alan başına gereken yatırım maliyetinin düşmesi halinde biyokütle ve rüzgâr enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji

kaynaklarıyla üretilen enerjiye karşı daha rekabetçi olacağını belirtmişlerdir. Gupta M.K. ve Kaushik S.C. [3], Hou H. vd. [4], Hong H. vd. [5], Zhao Y. vd. [6] güneş enerjisinin besleme suyunun ön ısıtılması için kullanılmasının, güneş ışınlamından doğrudan elektrik üreten termik güneş santrallerine kıyasla daha etkili ve ekonomik olduğu sonucunu bulmuşlardır. Suresh M.V.J.J. vd. [7], Popov D. [8], Zhao H. ve Bai. Y. [9] yakıt tasarrufu ve karbondioksit emisyonunun azaltımı bakımından güneş enerjisini yüksek basınç ön ısıtıcılarına giren besleme suyunu ısıtmak için kullanmanın en iyi sonucu ortaya çıkardığını göstermişlerdir. Yang Y. vd. [10] besleme suyu ön ısıtması için dört sistem modellemişlerdir. Her bir sistem için güç artırımı ve yakıt tasarrufu metoduyla hesaplamalar yapmışlar ve güç artırımı metodunda türbinin maksimum yük kapasitesine yakın veya maksimum yük kapasitesinin üzerinde çalışılmasının güvenlik açısından sakıncalı olabileceğini belirtmişlerdir. Yan Q. vd. [11] 200 MW, 300 MW ve 600 MW kritik altı, 600 MW süper kritik, 600 MW ve 1000 MW ultra süper kritik termik santrallerinin besleme suyu ön ısıtıcılarına paralel olarak yerleştirilen güneş alanının etkisini güç artırımı ve yakıt tasarrufu metoduyla incelemişler ve sistemin kritik altı ve süper kritik termik santrallerde uygulanmasının daha uygun olacağını göstermişlerdir. Zhai R. vd. [12] güneş destekli hibrit santralin enerji ve ekserji veriminin aynı şartlar altında çalışan termik santrale göre daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Zhao Y. vd. [13] ve Feng L. vd. [14] yüksek basınç besleme suyu ön ısıtıcılarına giren kazan besleme suyunun güneş alanına girmesi durumunda güneş alanından sağlanan ısınn işe dönüşme veriminin, güneş ışınlamından doğrudan elektrik üreten termik güneş santrallerine kıyasla daha yüksek olduğu sonucunu bulmuşlar ve bu durumun gerekli güneş alanını azalttığını tespit etmişlerdir. Hou H. vd. [15] güneş destekli hibrit santralin özgül yakıt tüketiminin referans alınan termik santrale göre daha az olduğunu bulmuşlar ve güneş radyasyonu değerinin artışıyla birlikte özgül yakıt tüketiminin daha da azaldığını tespit etmişlerdir. Ahmedi G. vd. [16] tüm yüksek basınç ön ısıtıcılarına paralel olarak yerleştirilen güneş alanının sağladığı yakıt tasarrufunun ve karbondioksit emisyonu azaltımının en iyi sonucu verdiğini göstermişlerdir. Zhai R. vd. [17] güneş enerjisinin daha verimli bir şekilde kullanması için yakıt tasarrufu metodunun daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Peterseim J.H. vd. [18] lineer fresnel sistemlerin (LFS), besleme suyu ön ısıtması uygulamaları için en iyi teknoloji olduğunu göstermişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Tezin amacı, mevcut kömür yakıtlı bir termik santralin güneş enerjisi ile hibridize edilmesinin teknik ve ekonomik analizlerini yaparak Türkiye şartlarında sistemin geliştirilmesi için öneriler sunmaktır. Bu durum dünyadaki araştırma çalışmaları incelenerek ve model program üzerinde farklı senaryolar oluşturularak gösterilmiştir.

1.3 Hipotez

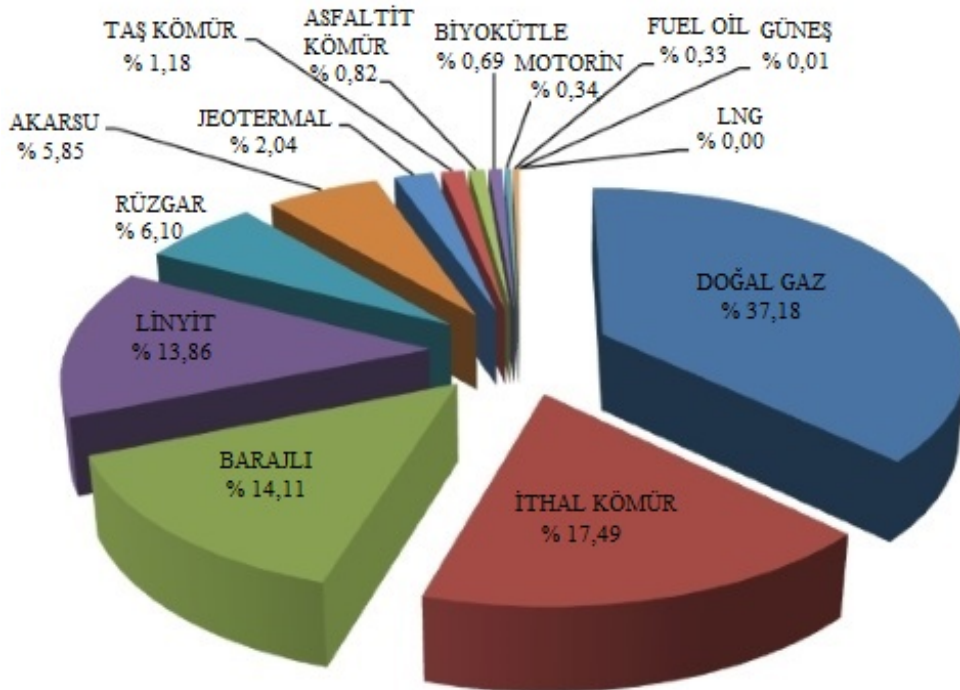
Ülkemiz enerji kaynakları açısından zengin bir ülke değildir. Fakat önemli linyit yataklarına sahiptir. Bunun yanında güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir ülkedir. Elektriğin üretildiği kaynaklar açısından yüksek oranda dışarıya bağımlı olan ülkemiz için mevcut yerli enerji kaynaklarını kullanmak önem arz etmektedir. Bu kapsamda bu iki farklı güç kaynağını bir arada bulunduran hibrit sistemler ülkemiz şartlarında incelenmeli ve atılması gereken adımlar belirlenmelidir. Bu sistemlerin kullanımı ile yerli fosil kaynaklarımızın daha verimli kullanılması sağlanmış olacak ve rezerv ömürleri uzayacaktır. Ayrıca bu sistemlerle çevresel olarak da önemli tasarruflar sağlanabilecektir.

1.4 Türkiye’de Enerji ve Emisyon Durumu

Enerjinin ne olduğu ile ilgili herkesin bir anlayışı olmakla birlikte, onun tam karşılığını ifade etmek zordur. Enerji, değişikliklere neden olma yeteneği olarak düşünebilir [19]. Sözcük Eski Yunan dilindeki “aktif” ve “iş” kelimelerinden türemiştir, bu açıdan anlam olarak “işe dönüştürülebilir” olarak da ifade edilebilir [20]. Bu tanımların dışında enerji, ülkelerin seviyelerinin bir göstergesi olmuştur. Günümüzde enerji tüketim miktarı ile ülkelerin gelişmişlik düzeyi arasında yakın bir ilişki vardır [21]. Gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan Türkiye’nin ekonomisi 2002 ile 2017 yılları arasında yıllık ortalama %4,9’luk bir büyüme oranı elde ederek enerji talebinde hızlı bir artışa yol açmıştır [22]. Ekonomik büyümenin yanı sıra nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerde enerji tüketimini artıran diğer etkenler olmuştur [23]. Önümüzdeki yıllarda da bu büyüme oranlarıyla birlikte enerji talebindeki artış eğiliminin devam edeceği hesaplanmaktadır [24].

Enerji kaynakları açısından zengin sayılmayacak bir ülke olan Türkiye, fosil enerji kaynakları bakımından net ithalatçı ülke konumundadır. Son 10 yılda elektrik, kömür ve doğal gaz talep artış oranları bakımından Avrupa’da ilk sırada yer almaktadır [24]. Bu nedenle, her ülke gibi Türkiye de azalan fosil yakıt kaynaklarını ve artan yakıt fiyatlarını dikkate alarak, kendi kaynaklarını verimli bir şekilde kullanmak için enerji politikaları geliştirmelidir [25]. Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) yerli kömürden üretilen elektrik enerjisi miktarını artırmayı, yeni kömür yataklarının araştırılmasını ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi içindeki payını artırmayı hedef edinmiştir. Bu hedefler doğrultusunda mevcut kömür yakıtlı santrallerin iyileştirilmesi ve modernizasyonu, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) teşviklerinin devam etmesi ve termik santrallerde besleme suyunun güneş enerjisiyle ön ısıtmaya tabi tutulduğu hibrit sistemlerin kullanımının artırılması belirlenen stratejilerden bazılarıdır [26].

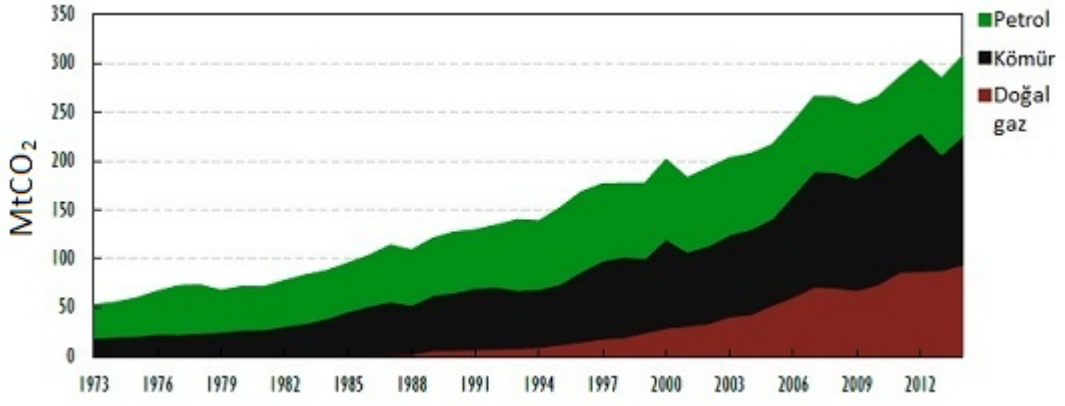
2017 yılında elektrik tüketimimiz bir önceki yıla göre %4,91 artarak 292,0 milyar kWh, elektrik üretimimiz ise bir önceki yıla göre %6,62 oranında artarak 292,57 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir [24]. Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. 1 2017 yılı elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı [27]

Elektrik enerjisi üretiminde 2016 yılında doğal gaz yakıtlı santrallerin payı %32,16 iken 2017 yılında %37,18'e, rüzgâr santrallerinin payı %5,69 iken %6,10'a, jeotermal santrallerinin payı da %1,77 iken %2,04'e yükselmiştir. Diğer taraftan hidroelektrik santrallerin payı 2017 yılında %24,69 iken %19,96'ya, yerli kömür (linyit, taş kömürü ve asfaltit) santrallerinin payı %19,78 iken %15,86'ya, ithal kömür santrallerinin payı %17,52 iken %17,49'a düşmüştür [27]. Şekil 1.1'den de görülebileceği gibi elektrik üretiminde fosil yakıtların payı oldukça fazladır. Fosil yakıtlar içinde kömür, Türkiye'de en çok bulunan enerji kaynağıdır ve her ne kadar elektrik üretimindeki payı düşüş göstermiş olsa da ülkenin elektrik üretiminde önemli bir yere sahiptir [28]. 2014 yılında dünya linyit üretiminde beşinci sırada yer alan Türkiye, 2015 yılı sonu itibariyle %6,9'luk pay ile altıncı sırada yer alarak bir sıra gerilemiştir. Bununla birlikte, Türkiye 2016 yılı sonu itibariyle 16 milyar ton linyit rezervine sahiptir. Ancak Türkiye linyitlerinin ısı değerleri oldukça düşüktür ve yüksek oranda kül, uçucu madde, nem ve kükürt içerir [29]. Enerji tüketimindeki artışa bağlı olarak elektrik üretiminde kullanılan kalitesiz kömür ise küresel ısınma, hava kirliliği, asit yağmurları gibi çevresel sorunlara neden olmaktadır [23]. Bu tür çevresel sorunların azalması aynı enerji miktarı için daha az fosil yakıt tüketilmesi ile mümkündür [30].

Türkiye'de 2016 yılında toplam sera gazı emisyonu CO₂ eşdeğeri olarak 496,1 milyon tona ulaşarak 1990 yılına göre %135,4 artış göstermiştir. Toplam CO₂ emisyonlarının 2016 yılında %33,5'i elektrik ve ısı üretiminden olmak üzere %86,1'i enerjiden, %13,6'sı endüstriyel işlemler ve ürün kullanımından, %0,3'ü ise tarımsal faaliyetler ve atıktan kaynaklanmıştır [31]. Enerji üretiminde ve endüstride ağırlıklı olarak kömür kullanılmaktadır. Şekil 1.2'de yakıt türlerine göre CO₂ emisyonunun 1973-2014 yılları arasındaki değişimi gösterilmiştir. Ülkemizde kömür kaynaklı CO₂ emisyonunun yıllar ilerledikçe arttığı görülmektedir [32].



Şekil 1. 2 Yakıta göre CO₂ emisyonu değerlerinin 1973-2014 yılları değişimi [32]

Türkiye 2004 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne taraf olmuş ve 2009 yılında Kyoto Protokolünü imzalamıştır. Ancak Türkiye'nin, Protokolün Ek-B kısmında yer almadığı için herhangi bir sayısal emisyon azaltma yükümlülüğü bulunmamaktadır. Bu durum Türkiye'nin Temiz Kalkınma Mekanizması gibi Kyoto Protokolünün esneklik mekanizmalarından yararlanamamasına ve gelişmekte olan bir ülke olmasına karşın gelişmiş ülkelerden gelen finans, kapasite ve teknoloji geliştirme gibi desteklerden mahrum kalmasına neden olmuştur. 2014 yılında düzenlenen Taraflar Konferansı'nda, Türkiye'nin teknoloji ile kapasite geliştirme desteğine ve mali desteğe erişebileceği kararlaştırılmıştır. 2015 yılında düzenlenen Taraflar Konferansı'nda ise, Türkiye 2021-2030 yılları arasında tahmini olağan emisyon senaryosunun %21'ine kadar sera gazı emisyonlarını azaltmayı öngördüğünü belirtmiştir [32].

Sera gazı emisyonlarının bir diğer ayağı da Emisyon Ticareti Sistemidir. Emisyon Ticareti Sistemi (ETS), belirlenen kaynaklardan oluşan toplam emisyonların mutlak bir seviyede sınırlandırılması amacıyla kurulan sistemi ifade etmektedir. Küresel emisyonların artışının önlenmesi amacıyla oluşturulan üst sınır ticareti ve bu amaca hizmet eden karbon denkleştirme mekanizmasının uygulanması sonucunda, referans senaryoda öngörülen emisyonlardan azaltımının gerçekleştirilmiş olması gerekir. Piyasa temelli esneklik mekanizması olan ETS, Kyoto Protokolü altında sayısallaştırılmış emisyon azaltım yükümlülüğü alan ülkelere emisyon hedeflerini gerçekleştirmelerinde kolaylık sunmaktadır. Protokol'e taraf ülkeler arasında gerçekleştirilen ETS, emisyon azaltım yükümlülüğüne göre daha fazla azaltım sağlayan taraf ülkenin ilave azaltımlarını başka

ülkeye satma hakkını sağlar. Bunun yanı sıra, bölgesel ve ülke çaplı geliştirilen ETS'ler de bulunmaktadır. 2005 yılında yürürlüğe giren Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS), dünyadaki en gelişmiş ve en büyük sera gazı emisyon ticaret sistemi olarak yerini almış bulunmaktadır. Bu tür ETS'ler başta enerji üreticileri ve imalatçı firmalar gibi sera gazı emisyonları yüksek işletmeleri hedef almaktadır. Sistem çerçevesinde işletme bazında sera gazı üst limiti belirlenerek, hedeflerine ulaşmaları için işletmelerin kendi aralarında sera gazı azaltım kredilerini alıp satmalarına imkân tanınmaktadır. Fakat Türkiye'nin Avrupa Birliği ülkesi olmamasından dolayı Türkiye'de geliştirilen yenilenebilir enerji projeleri karbon azaltım sertifikalarının satışı bakımından AB ETS'den faydalanamayacaktır. Ancak emisyon birim fiyatı olarak AB ETS'ye ait Avrupa Birliği Emisyon Tahsisleri (EUA) için belirlenen fiyat kabul edilebilir. Çünkü dünya üzerindeki en büyük çok uluslu karbon emisyon ticareti sistemidir ve fiyat tahminleri diğer fiyat tahminlerine kıyasla daha güvenilirdir [33].

Türkiye'nin enerji arzı ve bu arzdan kaynaklanan çevresel sorunlar düşünüldüğünde, güneş enerjisine dayalı projelerin desteklenmesi önem arz etmektedir. ETKB 2015-2019 Stratejik planında da belirtildiği gibi bu desteklerin stratejik adımlarından biri de besleme suyunun güneş enerjisiyle ön ısıtılmasıdır.

TERMODİNAMİK BAĞINTILAR

Termodinamik, enerjiyi konu alan, enerji ve enerji dönüşümlerinin tüm yönlerini kapsayan bir bilim dalıdır ve birçok mühendislik sistemlerinin temelini oluşturur [19].

2.1 Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasası

2.1.1 Termodinamiğin Birinci Yasası

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumu ilkesi olarak da bilinir. Enerjinin var veya yok edilemeyeceğini, ancak bir biçimden diğerine dönüşebileceğini ifade etmektedir. Birinci yasanın temel ögesi toplam enerji olarak isimlendirilen özelliğin açıklanmasıdır. Enerji korunumu ilkesi, bir hal değişimi sırasında kapalı bir sistemin toplam enerjisindeki artma veya azalmanın sisteme giren toplam enerji ile sistemden çıkan toplam enerjinin farkına eşit olduğunu ifade etmektedir. Enerji korunumu eşitlik (2.1)'deki gibi yazılır [19].

$$\Delta E_{sistem} = E_g - E_{\zeta} = (Q_g - Q_{\zeta}) + (W_g - W_{\zeta}) + (E_{küt\le,g} - E_{küt\le,\zeta}) \quad (2.1)$$

2.1.2 Termodinamiğin İkinci Yasası

Termodinamiğin ikinci yasası, enerjinin niceliğinin olduğu kadar niteliğinin de olduğunu öne sürer. Enerjinin niteliğinin ve bir hal değişimi sırasında bu niteliğin nasıl azaldığını açıklar. Mühendislik sistemlerinin teorik sınırlarının belirlenmesinde de kullanılır [19].

2.1.2.1 Termodinamiğin İkinci Yasası Kelvin-Planck İfadesi

Termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan bir makinenin, yalnızca bir kaynaktan ısı alıp net iş üretmesi olanaksızdır. Bu ifadeye göre, bir güç santralinin sürekli çalışabilmesi için iş akışkanının hem kazanla hem de çevre ile ısı alışverişi yapması gerekir ve hiçbir ısı makinesinin ısı verimi %100 olamaz [19].

2.1.2.2 Termodinamiğin İkinci Yasası Clausius İfadesi

Termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan ve düşük sıcaklıktaki bir cisimden aldığı ısıyı yüksek sıcaklıktaki bir cisme aktarmak dışında hiçbir enerji etkileşiminde bulunmayan bir makine tasarlamak olanaksızdır. Bunun anlamı, soğuk bir ortamdan aldığı ısıyı daha sıcak bir ortama aktaran, termodinamik çevrime göre çalışan bir makinenin yapılamayacağıdır [19].

2.2 Sürekli Akışlı Açık Sistemler

Türbin, kompresör ve benzeri birçok makinenin, çalıştıkları süre içinde giriş ve çıkış koşulları değişmez. Bu tip makinelere sürekli akış makineleri denir. Sürekli akışlı açık sistemde, akışkanın kontrol hacminden zamanla değişmeyen bir akışı vardır [19].

2.2.1 Sürekli Akışlı Açık Sistemler İçin Enerji Korunumu

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacmindeki toplam enerji değişimi sıfırdır. Bu nedenle kontrol hacmine giren enerji miktarı ile kontrol hacminden çıkan enerji miktarı birbirine eşittir. Sürekli akışlı açık sistemler için enerji korunumu eşitlik (2.2)'deki gibi ifade edilir. Eşitlik (2.3), eşitlik (2.2)'nin genişletilmiş biçimidir [19].

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\zeta \quad (2.2)$$

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m}\theta = \dot{Q}_\zeta + \dot{W}_\zeta + \sum_\zeta \dot{m}\theta \quad (2.3)$$

2.2.2 Sürekli Akışlı Açık Sistemler İçin Kütle Korunumu

Kütlenin korunumu ilkesi, bir kontrol hacmine veya kontrol hacminden Δt zaman aralığında olan kütle geçişi, aynı zaman aralığında kontrol hacmindeki toplam kütledeki

değişime eşit olduğunu ifade eder. Sürekli akışlı açık sistemde, kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmez. Bu nedenle, kontrol hacmine giren toplam kütle ile kontrol hacminden çıkan toplam kütle birbirine eşittir. Sürekli akışlı açık sistemler için kütle korunumu eşitlik (2.4)'de verilmiştir [19].

$$\sum_g \dot{m} = \sum_{\zeta} \dot{m} \quad (2.4)$$

2.3 Ekserji ve İkinci Yasa Verimi

Ekserji, belirli bir halde ve miktardaki enerjinin yararlı iş potansiyeli şeklinde tanımlanabilir. Bu bir sistemin verebileceği iş miktarının üst sınırını ifade etmektedir. Ekserji, sistemin hali kadar çevrenin de haline bağlıdır. Çevresiyle dengede olan bir sistemin ekserjisi sıfırdır. Bunun anlamı, sistemin termodinamik olarak herhangi bir iş yapamayan durumda olmasıdır [19].

2.3.1 Sürekli Akışlı Sistemler İçin Ekserji Dengesi

Türbin, kompresör, ısı değiştiriciler ve borular gibi kontrol hacimlerinin çoğu sürekli çalışır durumda olduğu için kütlelerinde, enerjilerinde, entropilerinde ve ekserjilerinde hiçbir değişiklik olmaz. Bu nedenle, sürekli akışlı sistemlerde giren ekserji, sistemi terk eden ekserji ile yok olan ekserji miktarına eşit olmalıdır. Eşitlik (2.5)'de sürekli akışlı sistemler için ekserji dengesi ifade edilmiştir [19].

$$\sum (1 - \frac{T_0}{T_k}) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_g \dot{m} \psi - \sum_{\zeta} \dot{m} \psi - \dot{X}_{yok} = 0 \quad (2.5)$$

2.3.2 İkinci Yasa Verimi

İkincil yasa verimi, gerçek ısı verimin, aynı koşullarda olabilecek en yüksek (tersinir) ısı verime oranıdır ve eşitlik (2.6)'da gösterilmiştir [19].

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{isl}}{\eta_{isl,tr}} \quad (2.6)$$

İş üreten makinalardaki verim ifadesi eşitlik (2.7)'de, iş tüketen makinalardaki verim ifadesi ise eşitlik (2.8)'de verilmiştir [19].

$$\eta_{II} = \frac{W_y}{W_{tr}} \quad (2.7)$$

$$\eta_{II} = \frac{W_{tr}}{W_y} \quad (2.8)$$

İkinci yasa verimi tersinir hal değişimlerine hangi ölçüde yaklaşıldığını belirlemek için tanımlanmıştır. İkinci yasa verimi sıfır ise ekserjinin tamamen yok olduğunu, bir ise ekserjinin tümüyle korunduğunu anlayabiliriz [19].

2.4 Buharlı Güç Çevrimleri

2.4.1 Carnot Buhar Çevrimi

Carnot çevrimi belirli iki sıcaklık sınırı arasında çalışan en yüksek verimli çevrimdir. Bu nedenle, buharlı güç santralleri için ideal bir çevrim düşünüldüğünde Carnot çevrimi akla gelmelidir. Su buharı, buharlı güç santrallerinde en çok tercih edilen iş akışkanı olduğundan, aşağıdaki incelemeler boyunca iş akışkanının su buharı olduğu varsayılacaktır. Şekil 2.1(a)'da görüldüğü gibi, saf bir maddenin doyma bölgesinde gerçekleşen, sürekli-akışlı bir Carnot çevrimi durumunu inceleyelim. Akışkan, bir kazanda sabit sıcaklıkta (izotermik) ve tersinir olarak ısıtılmakta (1-2 hal değişimi), bir türbinde izantropik olarak genişlemekte (2-3 hal değişimi), bir yoğuşturucuda tersinir ve izotermal olarak yoğuşturulmakta (3-4 hal değişimi), ve bir kompresörde izantropik olarak sıkıştırılarak çevrimin başlangıcındaki haline getirilmektedir (4-1 hal değişimi).

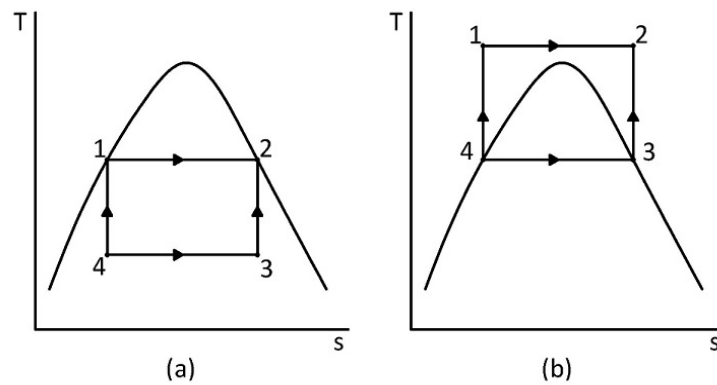
Bu çevrimin uygulanmasında aşağıdaki nedenlerden dolayı çeşitli zorluklar vardır:

- Isıtıcı içinde basıncın sabit tutulması, sıcaklığın doyma sıcaklığında sabit kalmasını sağlayacağından; iki fazlı bir sisteme veya sistemden sabit sıcaklıkta ısı geçişinin sağlanması uygulamada zor değildir. Bu nedenle 1-2 ve 3-4 hal değişimleri gerçek kazan ve yoğuşturucularda yaklaşık olarak sağlanabilir. Fakat ısı geçişinin iki fazlı sistemlerle sınırlanması, çevrimde kullanılabilecek en yüksek sıcaklığı önemli ölçüde kısıtlar (çevrimin en yüksek sıcaklığının kritik noktanın altında kalması gerekir ve bu değer su için 374 °C'dir.) Çevrimin en yüksek sıcaklığının bu şekilde sınırlanması, ısı veriminin de sınırlanması anlamına gelir. Çevrimin en yüksek

sıcaklığının arttırılmasına yönelik herhangi bir girişim, ısı geçişinin iş akışkanına tek fazlı bölgede (kızgın buhar bölgesinde) uygulanması gerekir. Tek fazlı bölgede sabit sıcaklıkta ısı geçişinin sağlanması ise kolay değildir.

- İzentropik genişleme işlemi (2-3 hal değişimi) iyi tasarlanmış bir türbinle yaklaşık olarak gerçekleştirilebilir. Fakat şekil 2.1(a)'da görüldüğü gibi, genişleme işlemi sırasında buharın kuruluk derecesi azalır. Bu durumda türbinden geçen buhar içindeki sıvı zerreciklerinin miktarı artacaktır. Sıvı zerreciklerinin türbin kanatlarına çarpması, türbin kanatlarında aşınmaya ve bozulmaya yol açar. Bu bakımdan güç santrallerinde, türbindeki genişleme sırasında kuruluk derecesinin %90'ın altına düşmesi istenmez. Bu sorun, doymuş buhar eğrisi çok dik olan bir akışkan kullanılarak çözülebilir.
- İzentropik sıkıştırma işlemi (4-1 hal değişimi), sıvı-buhar karışımının doymuş sıvı haline sıkıştırılmasını gerektirmektedir. Bu işlemle ilgili iki zorluk vardır: ilki yoğunlaşmanın dört halinde istenilen kuruluk derecesine sahip olarak son bulacak şekilde hassas olarak kontrol edilmesi kolay değildir; ikincisi iki fazlı akışkanı sıkıştıracak şekilde bir kompresörün tasarlanması uygulama zordur.

Carnot çevriminin Şekil 2.1(b)'de görüldüğü gibi farklı bir biçimde gerçekleştirilmesiyle bu sorunlardan bazıları giderilebilir. Fakat bu kez, çok yüksek basınçlara izantropik sıkıştırma ve değişen basınç altında izotermal ısı geçişinin sağlanması gibi başka sorunlar meydana gelmektedir. Bu nedenle Carnot çevriminin gerçek makinalarda uygulanamayacağı ve buharlı güç çevrimleri için gerçekçi bir model oluşturulamayacağı sonucu çıkmaktadır [19].



Şekil 2. 1 İki Carnot buhar çevriminin T-s diyagramı [19]

2.4.2 Rankine Çevrimi

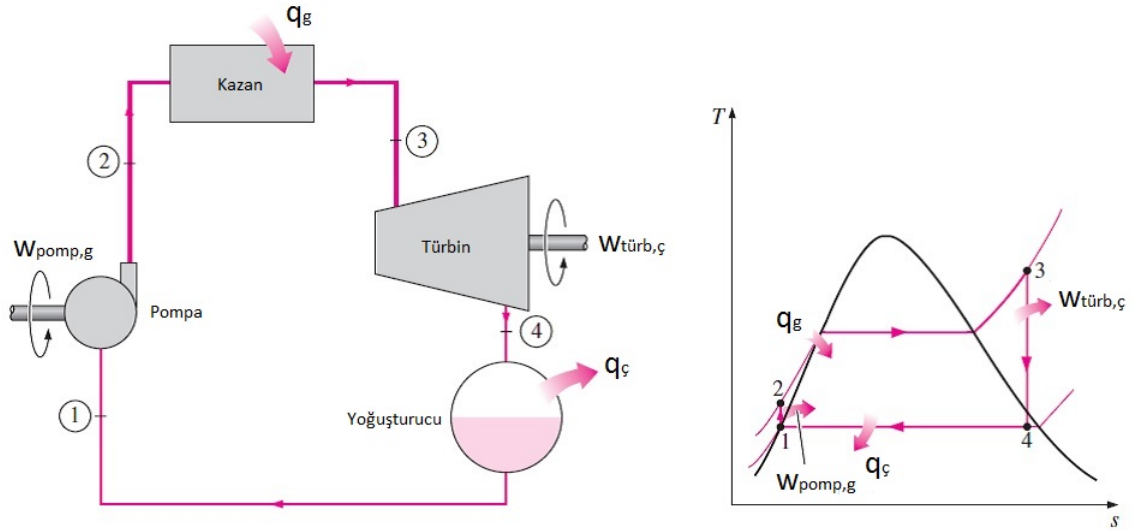
Şekil 2.2’de T-s diyagramı verilen çevrim, buharlı güç santrallerinin ideal çevrimi olan Rankine çevrimidir. İdeal rankine çevrimi, içten tersinmezliklerin olmadığı dört hal değişiminden oluşur [19]:

1-2: Pompada izantropik sıkıştırma

2-3: Kazanda sabit basınçta ısı girişi

3-4: Türbinde izantropik genişleme

4-1: Yoğuşturucuda sabit basınçta ısı atılması



Şekil 2. 2 Basit ideal Rankine Çevrimi [19]

Rankine çevrimini oluşturan pompa, kazan, türbin ve yoğuşturucu sürekli akışlı makinelerdir. Bundan dolayı Rankine çevrimi dört sürekli akışlı açık sistemden oluşan bir çevrim olarak incelenebilir. Eşitlik (2.9)’da çevrimin birim kütlesi için net iş verilmiştir [19].

$$w_{net} = w_{turb,ç} - w_{pomp,g} = q_g - q_ç \quad (2.9)$$

Rankine çevriminin termik verimi ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [19].

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_g} = 1 - \frac{q_ç}{q_g} \quad (2.10)$$

GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş, hidrojen ve helyum gazlarından oluşan orta büyüklükte bir yıldızdır. Yüzey sıcaklığı yaklaşık 6000 Kelvin civarındadır. Güneşte oluşan helyum miktarı, harcanan hidrojen miktarından daha azdır. Aradaki bu fark, güneşten ışın olarak çıkan enerjiyi yani güneş radyasyonunu verir. Bu enerji çeşitli dalga boylarında ışın olarak dünyaya ulaşır. Güneşin bir saniyede ürettiği enerji miktarı, insanlığın şimdiye kadar kullandığı enerji miktarından fazladır. Dünya, güneşten gelen enerjinin sadece milyarda birini alır. Bu enerji 15 dakika depo edilirse toplam dünya nüfusunun yıllık enerji ihtiyacı karşılanabilir.

Atmosfere gelen güneş radyasyonunun yaklaşık %7,5'i atmosferi ısıtmak için kullanılır. Yaklaşık %35'i bulutlardan ve yerden yansıyarak tekrar uzaya geri döner. Geriye kalan %47,5'lik oran ise yeryüzüne düşer ve burada ısıya dönüşür. Yeryüzüne gelen ortalama güneş ışıınımı değeri mevsim ve enleme bağılı olarak yaklaşık 300-1000 W/m²'dir.

Güneş enerjisi, güvenli, çevre dostu ve uygun maliyetli olabilir. Ayrıca, bu enerji yenilenebilirdir. CO₂ emisyonlarının azaltılması, enerji maliyetlerinin azaltılması ve çevremize temiz bir enerji sunmak güneş enerjisinin faydalı yönleridir.

Güneşin enerjisinden yararlanmanın iki farklı yolu vardır. Bunlardan biri, güneş ısı sistemleri olup, ısınan su buharı, bir buhar jeneratörü ile elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. İkincisi, güneş pilleri veya daha bilinen isimleriyle, fotovoltaik piller, üzerlerine düşen güneş ışıınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren düzeneklerdir [20].

3.1 Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri

Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemleri, doğrudan güneş ışınımını yoğunlaştırmak amacıyla ayna veya mercek kombinasyonlarını kullanır. “Yoğunlaşan güneş enerjisi” terimi sıklıkla “yoğunlaşan güneş ısı gücü” ile eşanlamı olarak kullanılır [1]. Bununla birlikte, bu tür santraller sadece direkt (doğrudan) radyasyondan yararlanabilirler. Difüz radyasyondan yararlanamazlar, çünkü bu radyasyon gerekli yoğunluğu sağlayamaz. Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi santralleri, aynalar ve aynaların güneşi takip etmesini sağlayan sistemler aracılığıyla güneş ışınlarını küçük bir alana yoğunlaştırır. Yoğunlaştırılan alan, içinden çevrim akışkanının geçtiği bir tüptür. Güneş ışınımı ile ısınan tüpün içindeki akışkan, klasik Rankine çevriminde kullanılarak enerji üretilir [34].

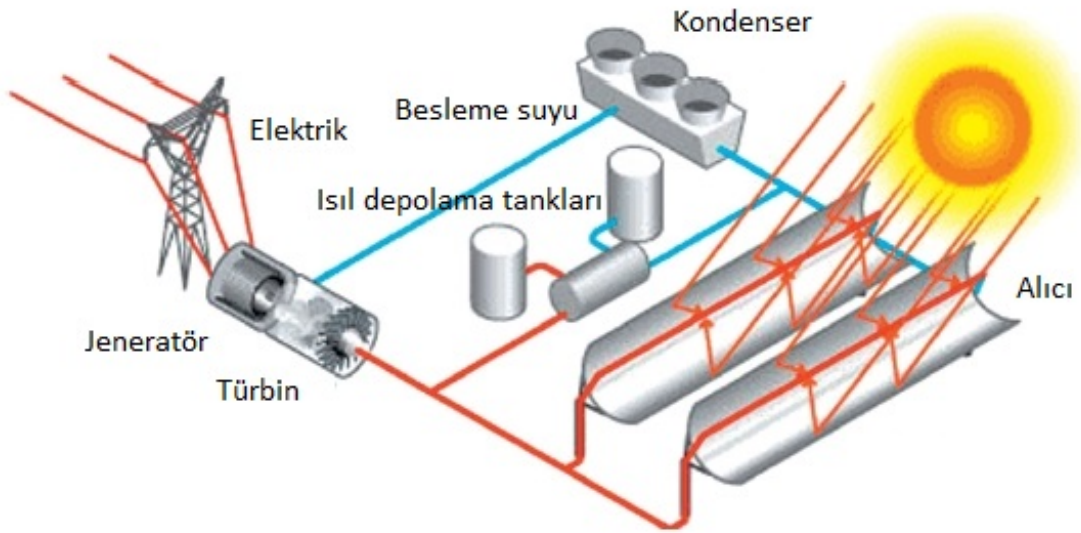
Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemleri, 1984-1995 yılları arasında ilk ticari gelişmesini gösterdi. İlk olarak 1980'lerde Kaliforniya'da toplam gücü 354 MWe olan ve 2.000.000 m²'den fazla ayna alanına sahip parabolik oluk tipi yoğunlaştırıcı güneş enerjisi santrali kuruldu. Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemleri projeleri açıklanan veya yapım aşamasında olan ülkeler arasında Kuzey Afrika (Cezayir, Fas) ve Orta Doğu (Mısır, İsrail), Çin, Hindistan, Avustralya, Güney Afrika, Portekiz, İtalya, Yunanistan, Malta ve Kıbrıs yer almaktadır. Dünyada şu anda ticari olarak kullanılan yoğunlaştırıcı güneş enerjisi santralleri şunlardır [1]:

- Parabolik oluk tipi güneş enerjisi sistemleri
- Fresnel tipi güneş enerjisi sistemleri
- Parabolik çanak tipi güneş enerjisi sistemleri
- Güneş güç kuleleri

3.1.1 Parabolik Oluk Tipi Güneş Enerjisi Sistemleri

Parabolik oluk tipi güneş enerjisi sistemleri 400 °C'ye kadar sıcaklıklarda ısı üreten en eski güneş enerjisi teknolojisidir [35]. Parabolik oluk tipi güneş enerjisi sistemleri, kesitleri parabolik olan aynalardan oluşur. Güneşten gelen ışınlar aynalara gelir ve aynalardan yansıyan güneş ışınları, parabolün odak noktasında bulunan ve eksen boyunca uzanan toplayıcı kısımdaki soğurucu boruya yoğunlaşır. Bu işlem sonunda ısı

transferi yoluyla, soğurucu boru içerisinde geçen ısı transfer akışkanına, enerji aktarımı gerçekleşmiş olur. Böylece sıcaklığı yükselen akışkan ile dolaylı yoldan ya da direkt olarak buhar ile elektrik üretimi yapılabilir. Eğer ısı transfer akışkanı olarak yağ kullanılırsa, dolaylı yoldan buhar üretimi yapılır. Yoğunlaştırma işlemi sonucunda sıcaklığı yükselen yağ ısı enerjisini, yağdan daha düşük sıcaklıktaki suya, ısı değiştiricileri aracılığıyla aktararak, suyun buharlaşması sağlanır. Üretilen buhar, buhar türbinine gönderilerek elektrik üretimi yapılır. Eğer ısı transfer akışkanı olarak su kullanılırsa, ısı değiştiricisine gerek kalmadan doğrudan buhar üretilir. Bu sistemlerde güneş takibi doğu-batı veya kuzey-güney doğrultularında gerçekleşmektedir. Güneş takibiyle birlikte sistemin veriminde artış sağlanmaktadır [36]. Parabolik oluk tipi güneş enerjisi sistemi şekil 3.1’de gösterilmiştir.

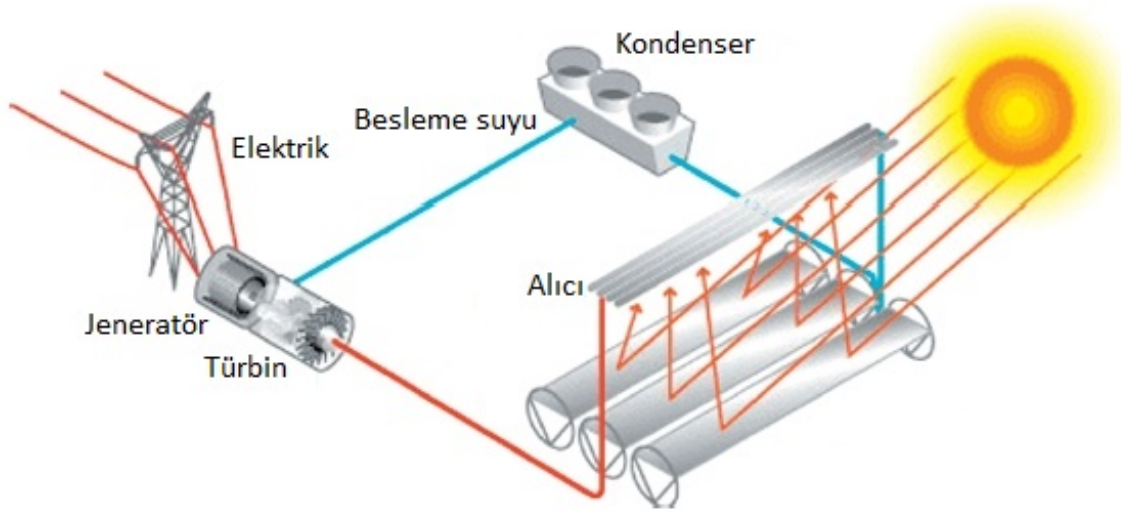


Şekil 3. 1 Parabolik oluk tipi güneş enerjisi sistemi [34]

3.1.2 Fresnel Tipi Güneş Enerjisi Sistemleri

Bu prensibi ilk uygulayan, 1960'larda İtalya'nın Cenova kentinde hem doğrusal hem de iki eksenli Fresnel tipi güneş enerjisi sistemlerini geliştiren Giorgio Francia oldu. Bu sistemlerin yüksek sıcaklıklara ulaşılabilirdiği gösterildi [35]. Bu sistemlerin çalışma prensibi, parabolik oluk tipi güneş enerjisi sistemleri ile benzerdir. İki sistem arasındaki en belirgin fark; bu sistemlerde düzlemsel aynaların kullanılmasıdır. Fresnel tipi güneş enerjisi sistemleri güneşi tek eksenden takip ettiklerinden ve çizgisel odaklama

yaptıklarından verimleri, diğer sistemlere göre düşüktür [36]. Şekil 3.2’de fresnel tipi güneş enerjisi sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 Fresnel tipi güneş enerjisi sistemi [34]

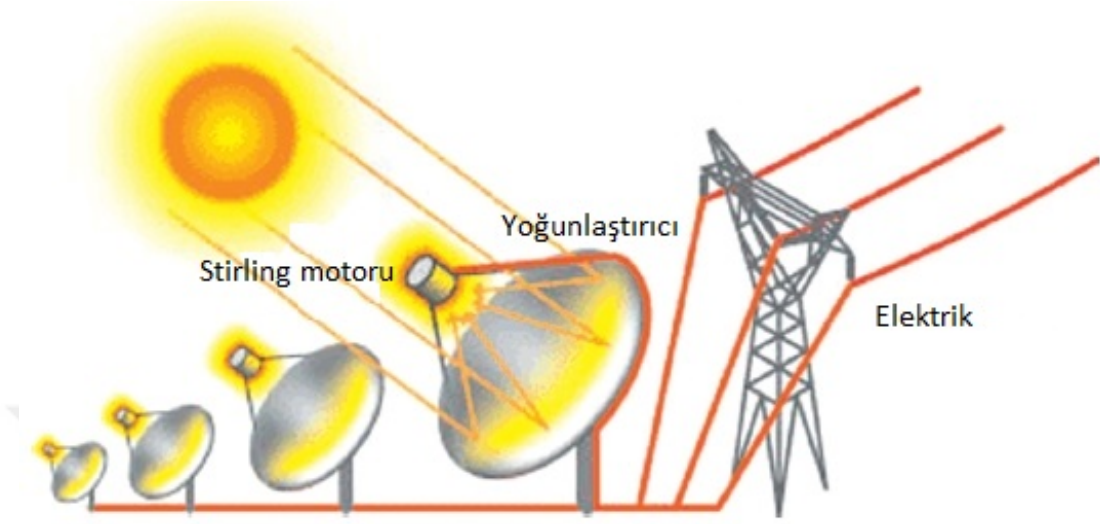
3.1.3 Parabolik Çanak Tipi Güneş Enerjisi Sistemleri

Parabolik çanak tipi güneş enerjisi sistemleri, yansıtıcı yüzeylerine gelen güneş ışınlarını parabolün odak noktasında yoğunlaştırırlar. Sisteme gelen güneş ışınları aynalar aracılığıyla odaktaki Stirling motoru üzerine yoğunlaştırılır. Stirling motoru, ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Güneşi iki eksende takip ederek sistemin ısı verimi artırılır. Bu sistemler, küçük modüllerden oluştuğu için, enerji ihtiyacı duyulan yerlerin yakınında ve ihtiyaç duyulan kapasitelerde tesis edilebilirler. Noktasal odaklama yaptıklarından dolayı verimi en yüksek olan sistemlerdir [36]. Bu sistemler, 1500 °C’yi aşan sıcaklıklara ulaşabilir [35]. Parabolik çanak tipi güneş enerjisi sistemi şekil 3.3’de gösterilmiştir.

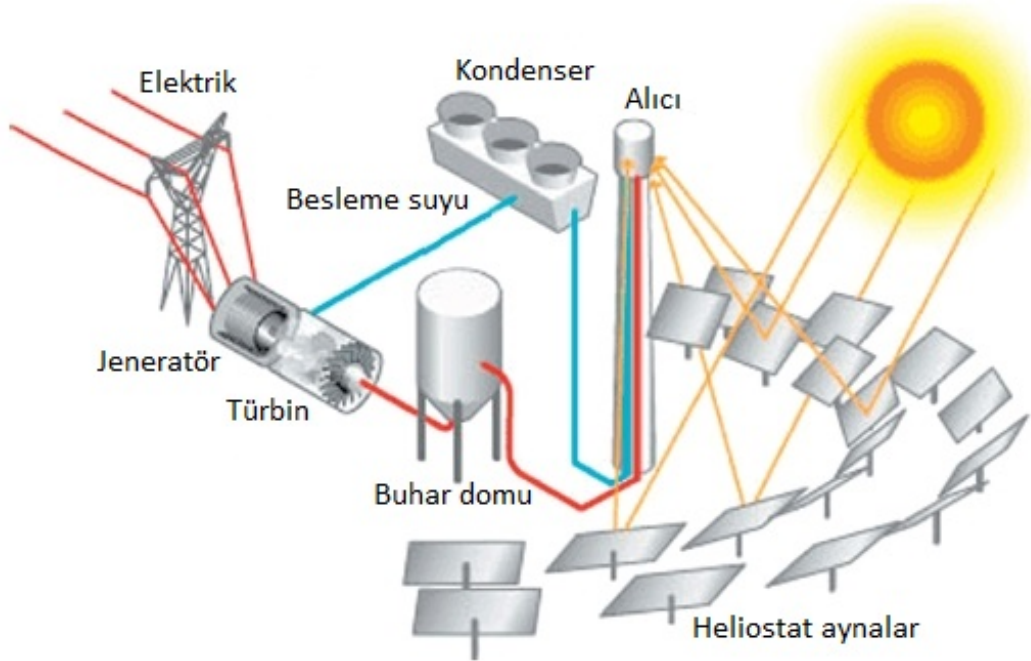
3.1.4 Güneş Güç Kuleleri

Güneş güç kuleleri, merkezi alıcı tipi güç sistemleridir. Güneşi iki eksende birbirinden bağımsız olarak takip eden, heliostat adı verilen ve büyük bir alana yerleştirilmiş çok sayıda yansıtıcı ayna, güneş ışınlarını merkezde bulunan kulenin üzerindeki alıcıya yoğunlaştırırlar. Güneş ışınlarının bir noktaya yoğunlaştırılmasıyla elde edilen bu enerji, alıcıdaki akışkanı ısıtır. Isınan akışkan su ise buhar jeneratörüne değilse ısı değiştiricisine gönderilerek buhar üretilir. Üretilen buharla türbin-jeneratör grubu

tahrik edilerek elektrik enerjisi elde edilir. Heliostatların yerleşimi için büyük alanlara ihtiyaç duyulur [36]. Şekil 3.4’de güneş güç kulesi gösterilmiştir.



Şekil 3. 3 Parabolik çanak tipi güneş enerjisi sistemi [34]



Şekil 3. 4 Güneş güç kulesi [34]

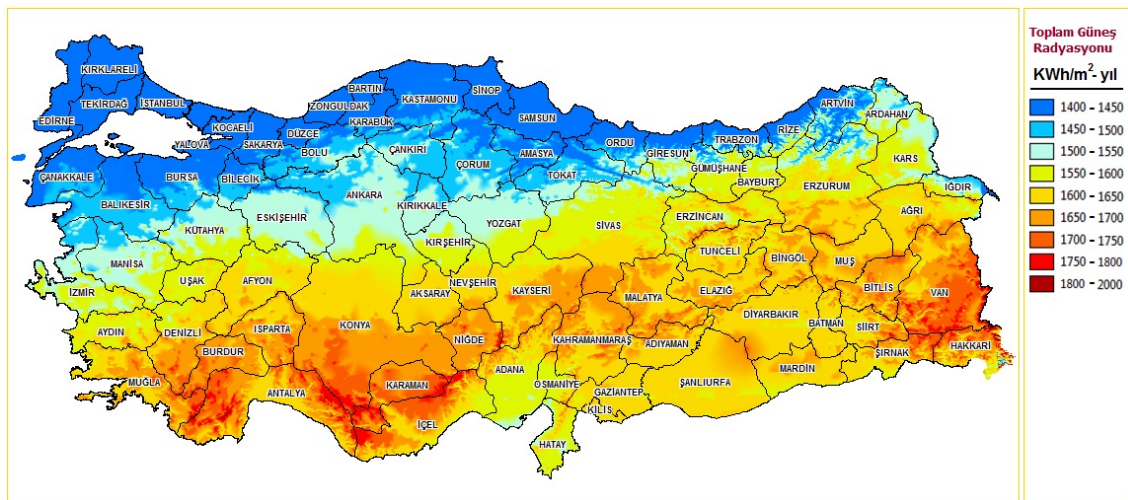
Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemlerinin karşılaştırılması Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3. 1 Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemlerinin karşılaştırılması [37]

	PARABOLİK OLUK TİPİ	FRESNEL TİPİ	PARABOLİK ÇANAK TİPİ	GÜNEŞ GÜÇ KULESİ
Çalışma Sıcaklığı (°C)	350-550	390	550-750	260-565
Santral Pik Verimi (%)	14-20	18	30	23-35
Güneş Enerjisinin Elektrığe Dönüşme Verimi (%)	11-16	13	25-28	7-20
Hibritleştirme	VAR	VAR	YOK	VAR

3.2 Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan bir ülkedir. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün 1966-1982 yılları arasında ölçtüğü güneşlenme süresi ve ışınlam şiddeti verilerinden yararlanarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat, ortalama toplam ışınlam şiddeti 1311 kWh/m²-yıl olarak tespit edilmiştir [20]. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 5 Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası [38]

Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı ise Çizelge 3.2'de verilmiştir [20].

Çizelge 3. 2 Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı [20]

BÖLGE	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² -yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)
Güney Doğu Anadolu	1.460	2.993
Akdeniz	1.390	2.956
Doğu Anadolu	1.365	2.664
İç Anadolu	1.314	2.628
Ege	1.304	2.738
Marmara	1.168	2.409
Karadeniz	1.120	1.971

Türkiye'nin en fazla güneş alan bölgesi Güneydoğu Anadolu Bölgesi olup, ikinci sırada Akdeniz Bölgesi gelmektedir. Türkiye, gerekli yatırımların yapılması halinde yılda birim m²'sinden ortalama 1100 kWh'lik güneş enerjisi üretebilir. Yapılan ölçümlere göre, ülkemizin %63 'ünde 10 ay, %17'sinde ise 1 yıl boyunca güneş enerjisinden yararlanmak mümkündür [20].

Türkiye’de ise sadece bir tane yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemi bulunmaktadır. Mersin’de “Greenway CSP” şirketine ait güneş güç kulesi tipi bu sistem, 510 adet heliostattan oluşmuştur ve sistemin türbin net çıkış kapasitesi 1 MW’dır. Sistemin çalışma basıncı 55 bar, çalışma sıcaklığı ise 550 °C’dir. Ayrıca santral 4 MW/h’lik depolama kapasitesine sahiptir [39].

3.3 Fosil Yakıtlı Enerji Santrallerinin Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri İle Hibritleştirilmesi

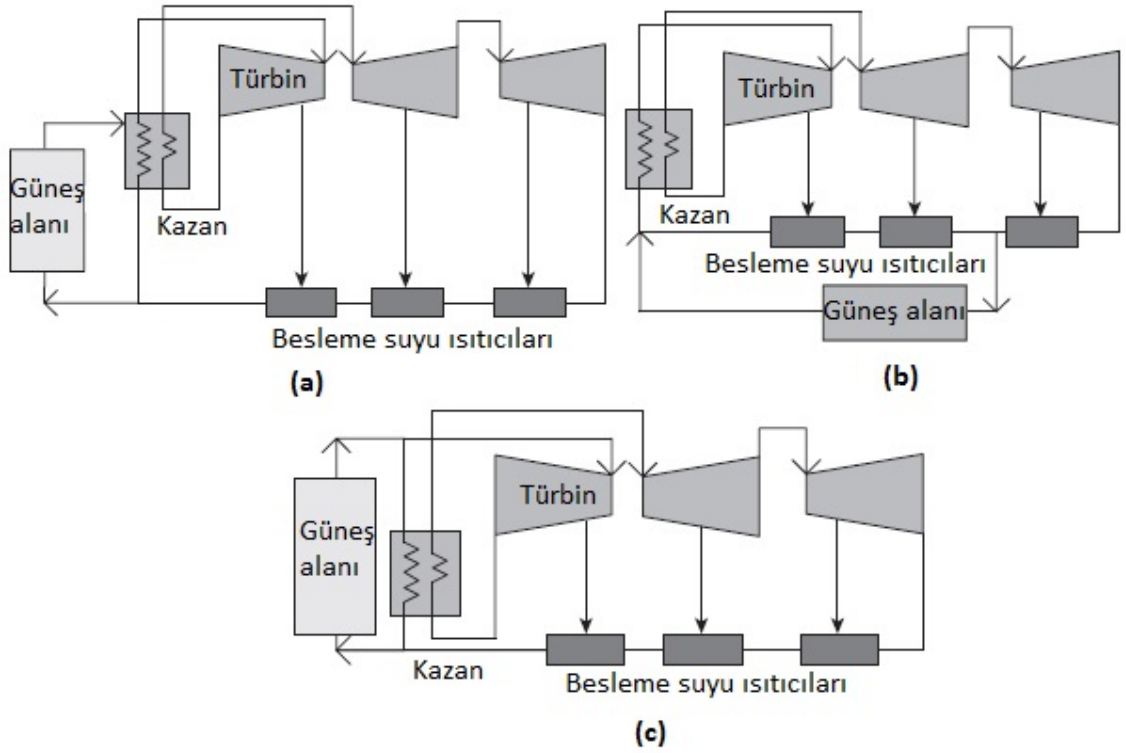
Hibritleştirilmiş enerji santralleri temelde termal entegrasyon ve termokimyasal entegrasyon olarak iki gruba ayrılabilir. Termal entegrasyonda, fosil yakıt yanması ile birlikte güneş enerjisi de su, doymuş veya kızgın buharı ısıtmak için kullanılır. Termokimyasal entegrasyonda ise, güneş enerjisi daha temiz bir yakıt elde etmek için fosil yakıtı iyileştirmek veya dekarbonize etmek amacıyla proses ısısı olarak görev yapar [1].

3.3.1 Güneş Destekli Kömür Yakıtlı Enerji Santralleri

Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemleri, kazan veya besleme suyu ısıtıcılarına paralel olarak yerleştirilerek kömür yakıtlı enerji santrallerine kolayca entegre edilebilir. Güneş enerjisinden elde edilen ısı, besleme suyunu ısıtmak için türbinden çekilen ara buharın yerine kullanılabilir. Bu sistemin önemli bir avantajı, buhar türbininin ebadının büyütülmesine ihtiyaç duyulmadan kömür yakıtlı enerji santralinin güç çıktısının artırılmasıdır [1].

Güneş destekli kömür yakıtlı santrallerde kullanılan üç farklı düzenleme Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

- Güneş destekli kazan domu Şekil 3.6 (a)'da gösterilmektedir. Bu hibritleştirmede, güneş alanı kazana paralel olarak yerleştirilir. Yaklaşık 400 °C'deki güneş enerjisinden sağlanan ısı, kazanın ekonomizerindeki besleme suyunu doymuş buhar haline dönüştürür ve daha sonra kazan domuna gönderir [1].
- Güneş destekli besleme suyu ısıtma Şekil 3.6 (b)'de gösterilmiştir. Bu hibritleştirmede, güneş alanı besleme suyu ısıtıcılarına paralel olarak yerleştirilir. Yaklaşık 300 °C'deki güneş enerjisinden sağlanan ısı, besleme suyunu ısıtmak için türbinden çekilen ara buharın yerine kullanılır. Ara buhar çekilmesi önlediğinden, aynı miktarda yakıt kullanılarak türbinde daha fazla iş üretilmiş olur [1].
- Güneş destekli kızdırıcı Şekil 3.6 (c)'de gösterilmiştir. Bu hibritleştirmede, güneş alanı kazana paralel olarak yerleştirilir ve kızgın buharın bir kısmı güneş enerjisinden sağlanan ısı ile sağlanır [1].



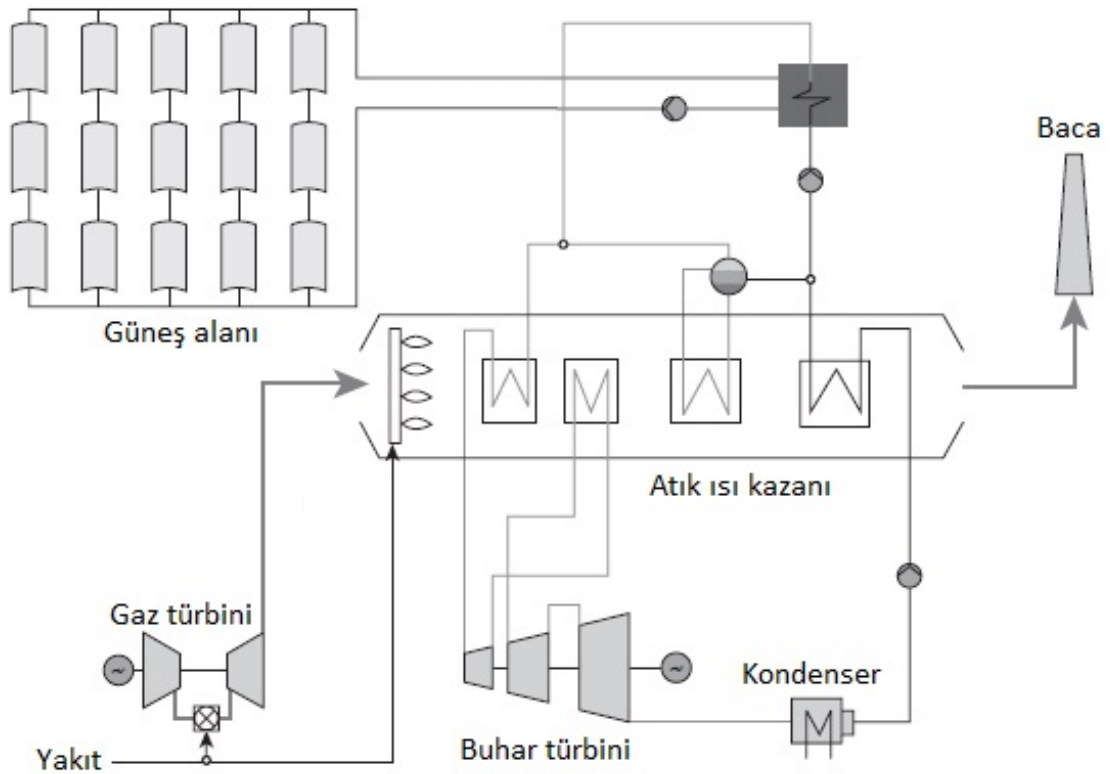
Şekil 3. 6 Güneş destekli kömür yakıtlı santraller için proses şemaları [1]

Bu üç hibritleştirmeden, güneş enerjisinden sağlanan ısı ile besleme suyunun ısıtılması en kolay olanıdır. Bu sistem, 300 MW'tan daha düşük bir kapasiteye sahip olan, kömür yakıtlı santrallerin yenilenmesi için kullanılabilir. Yoğunlaştırıcılı güneş enerjisi sistemlerinin aksine, bu hibrit santrallerde güneş enerjisi depolama donanımına gerek kalmaz. Ayrıca, mevcut besleme suyu ısıtıcıları, güneş enerjili besleme suyu ısıtıcısı ile paralel olarak çalıştırılır. Böylece, hibritleştirilmiş enerji santralinin, düşük güneş ışınımında dahi tam kapasitede çalıştırılması garanti altına alınmış olur [1].

3.3.2 Entegre Güneş Kombine Çevrim Santralleri

Kombine çevrim santralleri, Rankine çevrimi ile Brayton çevriminin birleşiminden oluşan santrallerdir. Bu tip santrallerde gaz türbinleri ve buhar türbinleri birlikte kullanılmaktadır. Temel olarak; gaz türbininden çıkan yüksek ısılı egzoz gazlarının buhar çevriminde kullanılarak ek bir enerji üretilmesi ilkesine dayanır. Bu tip santrallerin hibritleştirilmesinde, güneş enerjisinden sağlanan ısı ile üretilen buhar, atık ısı kazanının farklı bölümlerine veya doğrudan kombine çevrim santralinin buhar türbinine enjekte edilebilir. Böylece herhangi bir ek yakıt yakılmadan ilave güç elde edilir [1].

Entegre güneş kombine çevrim santrali proses şeması Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 7 Entegre güneş kombine çevrim santrali proses şeması [1]

Çizelge 3.3’de de dünyadaki bazı güneş destekli hibrit santrallere örnekler verilmiştir.

Çizelge 3. 3 Güneş destekli hibrit santraller [39]

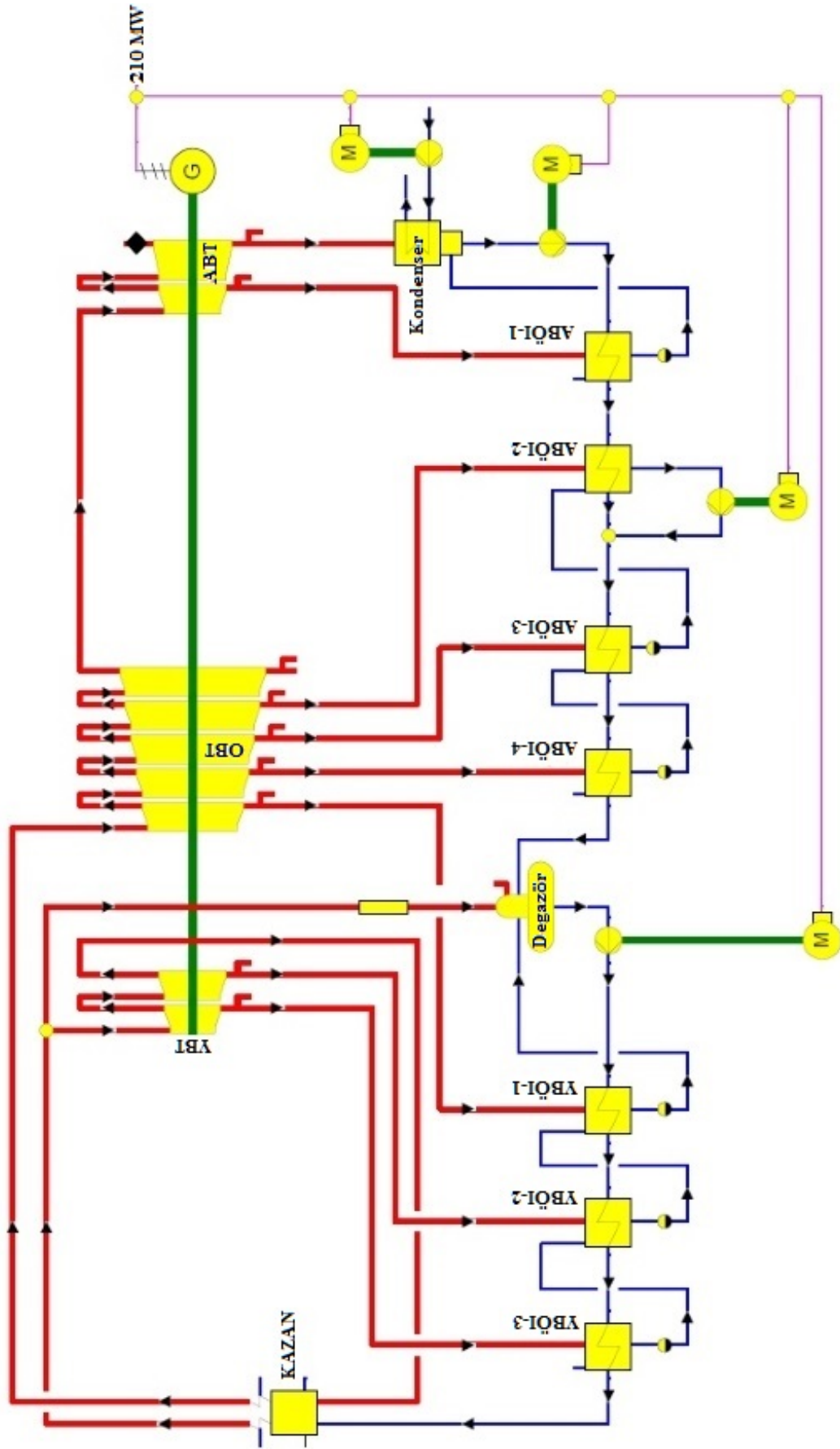
ÜLKE	KULLANILAN TEKNOLOJİ	TOPLAM KAPASİTE (MWe)	GÜNEŞ KAPASİTESİ (MWe)	GÜNEŞ PAYI (%)
HİNDİSTAN (Dadri)	Fresnel Tipi	210	14	6,25
FAS (Aln Beni Mathar)	Parabolik oluk tipi	470	20	4,2
CEZAYİR (Hassi R’mel)	Parabolik oluk tipi	150	20	11,8
MISIR (Kuraymat)	Parabolik oluk tipi	120	20	14,2
MEKSİKA (Sonora State)	Parabolik oluk tipi	464	14	3,0
İTALYA (Sicilya)	Parabolik oluk tipi	130	5	3,7
İRAN (Yazd)	Parabolik oluk tipi	467	17	3,6
ABD (Victorville)	Parabolik oluk tipi	563	50	8,9
ABD (Indiantown)	Parabolik oluk tipi	1.125	75	6,7
ABD (Palmdale)	Parabolik oluk tipi	570	50	8,8

ÖRNEK UYGULAMALAR

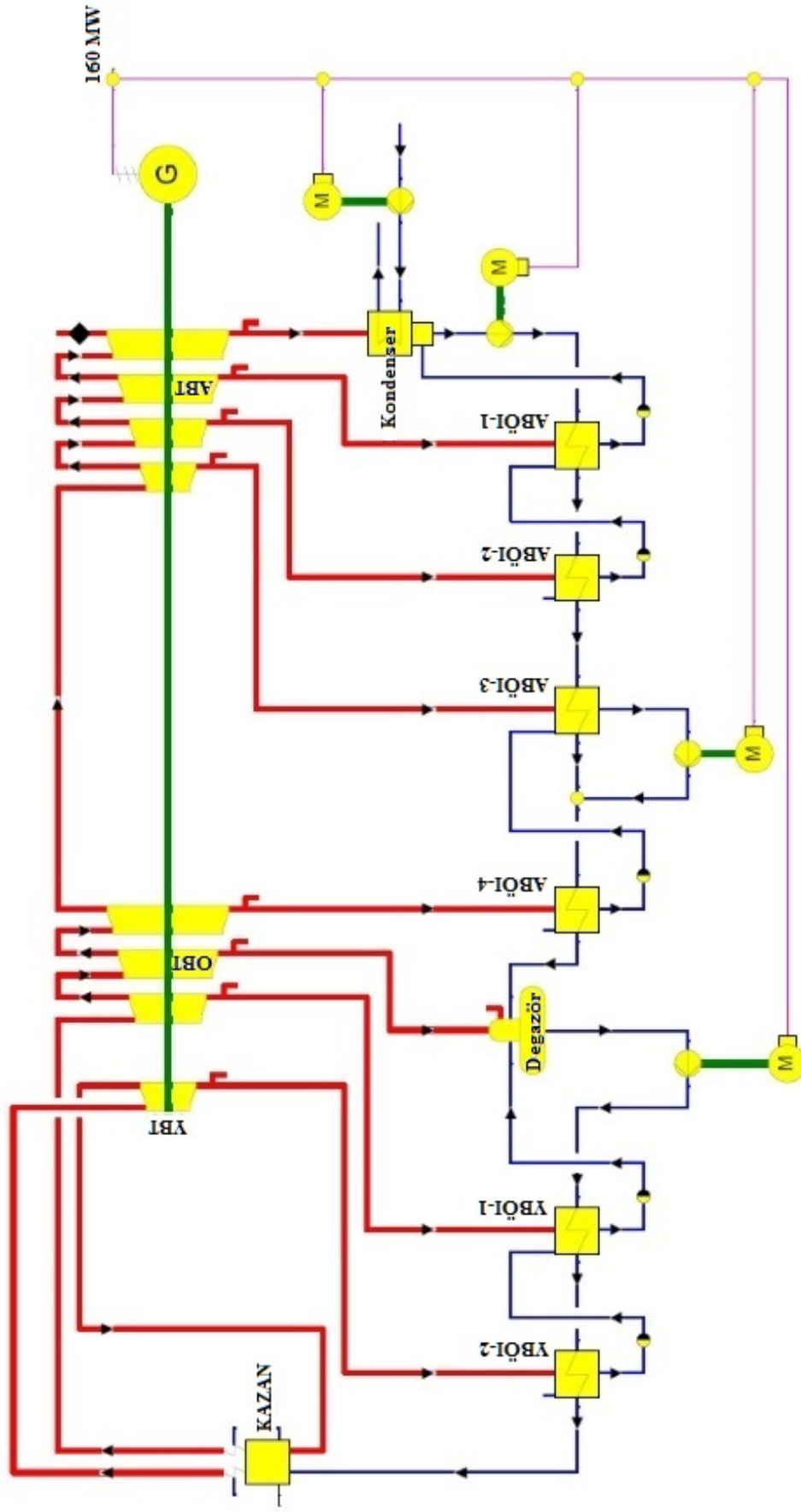
Bu çalışmada, mevcut kömürlü bir termik santralin güneş destekli hibrit bir termik güç santraline dönüşümünün termodinamik ve ekonomik analizleri yapılmıştır. Ekonomik analizlerde emisyon tasarrufundan sağlanan gelirler ve YEKDEM teşvik fiyatları da dikkate alınmıştır. Çalışmada ilk olarak besleme suyu ön ısıtıcısına paralel olarak yerleştirilen güneş alanının büyüklüğü optimize edilmiştir. Optimizasyon parametreleri olarak modül sayısı ve besleme suyu debisi alınmıştır. Literatürde güneş destekli hibrit santrallerin analizleriyle ilgili sabit güç üretimi ve yakıt tasarrufu gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada, optimizasyon yapılırken hibrit santralde güç artışının olmadığı, sadece yakıt tasarrufunun olduğu düşünülmüştür. Besleme suyu ön ısıtıcıları için çekilen ara buhar debisini sıfır yapacak güneş alanı değeri optimizasyonun sınır şartını oluşturur. Güneş destekli hibrit santral için tasarım şartları olarak kuzey yarım kürede en uzun günün yaşandığı tarih olan 21 Haziran, bu tarihte güneşin en yüksek noktada olduğu yerel saat olan 13.00, 900 W/m^2 ışıma (radyasyon) değeri ve santralin %100 yük koşulları altında çalıştığı varsayımı kabul edilmiştir. Spesifik tarihler (21 Mart, 21 Haziran ve 21 Aralık), zaman, güneş radyasyon değeri, güneş alanı ve yük faktörü parametre olarak alınmıştır. Ele alınan parametrelere göre hibrit santralin enerji ve ekserji verimi ile özgül yakıt tüketimi hesaplanmış olup referans alınan santrallere göre değişimleri irdelenmiştir. Daha sonra %100, %75 ve %50 yük koşullarında ilk önce yıllık yakıt tasarrufu ve daha sonra yakıt tasarrufuna bağlı olarak karbondioksit emisyon azaltımı hesaplanmıştır. Son olarak ekonomik hesaplar için emisyon, güneş alanı ve YEKDEM elektrik birim fiyatı parametre olarak alınarak yatırımların geri ödeme süreleri irdelenmiştir.

4.1 Sistemlerin Tanımı

Bu çalışmada Yatağan Termik Santrali (YTS) ve Çan Termik Santrali (ÇTS) referans alınmıştır. Yatağan Termik Santrali 210 MW güce sahip üç eş üniteden, Çan Termik Santrali 160 MW güce sahip iki eş üniteden oluşmaktadır. Her iki santralde yakıt olarak linyit kullanılmaktadır. Santrallerde kömürün yanma işlemi kazanda gerçekleşir. Kondenserden gelen kazan besleme suyu alçak basınç besleme suyu ön ısıtıcılarından (ABÖI-1, ABÖI-2, ABÖI-3, ABÖI-4), bir degazörden ve yüksek basınç besleme suyu ön ısıtıcılarından (YBÖI-1, YBÖI-2, YBÖI-3) geçtikten sonra kazana girer. Kazandan çıkan kızgın buhar sırasıyla YBT, OBT VE ABT’de genişler. Son olarak ABT çıkışındaki buhar kondensere gönderilir ve burada yoğunlaşarak çevrim tamamlanır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de görüldüğü gibi yüksek basınç, orta basınç ve alçak basınç türbinlerinden çekilen ara buharlar besleme suyunun ön ısıtılması için kullanılır. Referans alınan YTS ve ÇTS için kabul edilen tasarım şartları Çizelge 4.1’de verilmiştir [40], [41].



Şekil 4. 1 Yatağan Termik Santrali akış şeması



Şekil 4. 2 Çan Termik Santrali akış şeması

Çizelge 4. 1 Tek ünite için YTS ve ÇTS verileri [40], [41]

	YTS	ÇTS
Tam Yükte Kömür Tüketimi (kg/s)	55,4	36,3
Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	160	138
Ana Buhar Basıncı (bar)	127,5	172
Ana Buhar Sıcaklığı (°C)	535	540
Ana Buhar Debisi (kg/s)	176,7	127
Ara Kızdırma Buhar Basıncı (bar)	22,4	37,2
Ara Kızdırma Buhar Sıcaklığı (°C)	535	540
Ara Kızdırma Buhar Debisi (kg/s)	152	116,5
Kazan Verimi (%)	87,5	92
Alçak Basınç Türbin Verimi (%)	83	90
Orta Basınç Türbin Verimi (%)	89	92
Yüksek Basınç Türbin Verimi (%)	86	88
Pompa Verimleri (%)	80	80
Generatör Verimi (%)	98,5	98,5
Kondenser Basıncı (bar)	0,072	0,085
Kondenser Sıcaklığı (°C)	39,4	42,7
Kondenser Soğutma Suyu Sıcaklığı (°C)	27	25,4
Kondenser Soğutma Suyu Debisi (kg/s)	9.092,0	4.388,9

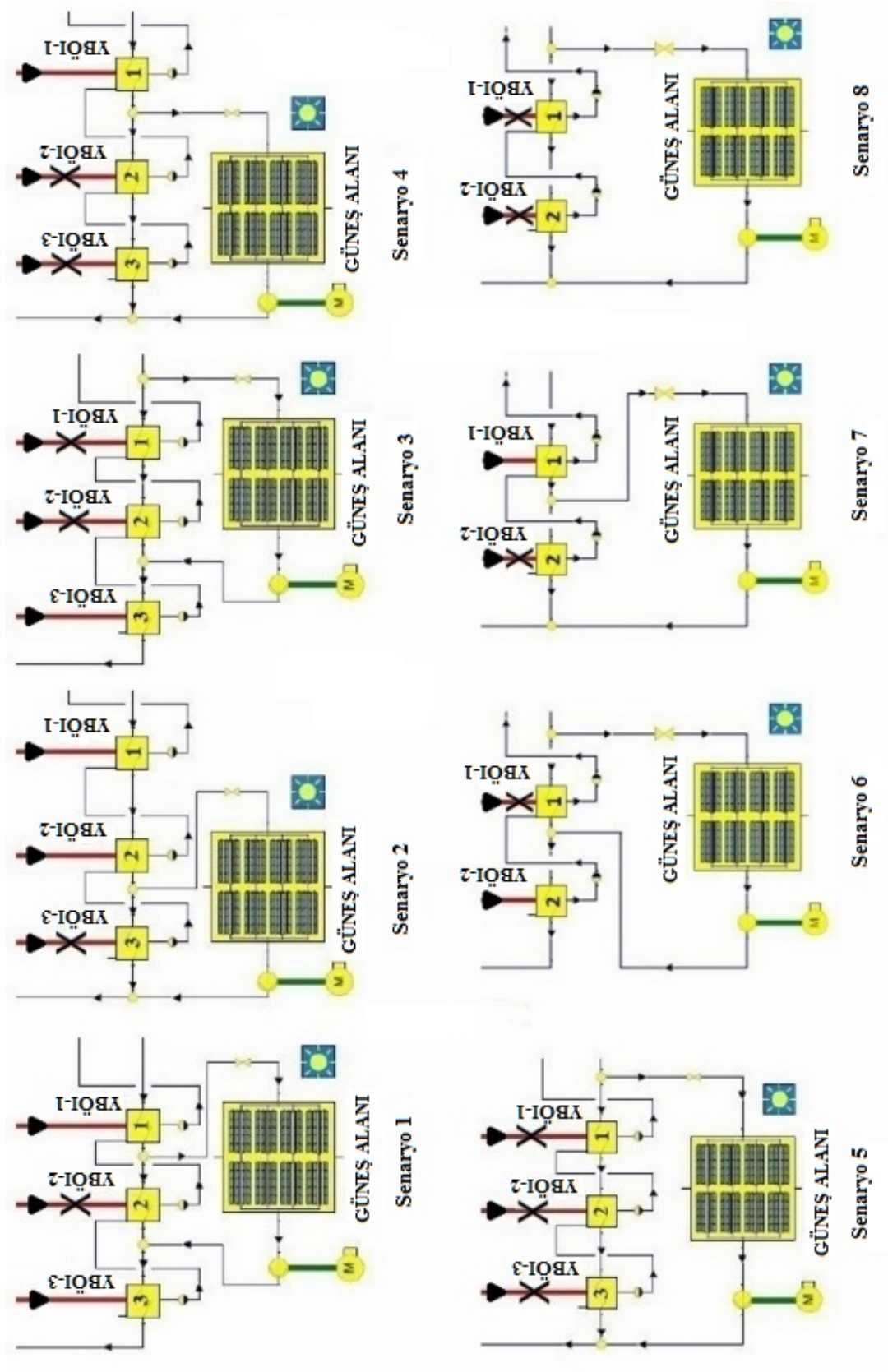
YTS ve ÇTS’de güneş alanının ön ısıtıcılara paralel olarak yerleştirilmesiyle analizi yapılan güneş destekli hibrit santraller elde edilmiştir. Burada amaç besleme suyunun ön ısıtılmasında güneş enerjisi tarafından sağlanan ısıyı kullanarak ara buhar alma işlemini sınırlamaktır. Sistemde güneş ışınlı yeterli olduğunda (örneğin gündüzleri) yüksek basınç ön ısıtıcıları için çekilen ara buhar miktarı ışınlı şiddetine bağlı olarak ya sıfırlanmakta ya da azalmaktadır. Ara buhar miktarının sıfırlandığı durumlarda yüksek

basınç ön ısıtıcıları çalışmaz ve besleme suyu güneş alanında ısıtılır. Güneş ışınlamı yeterli olmadığında (örneğin geceleri) yüksek basınç ön ısıtıcıları çalışır ve güneş alanının bir işlevi olmaz [12], [42]. Böylece ek olarak enerji depolama sistemine de ihtiyaç kalmaz. Hesaplamalarda EBSILON Professional yazılımı kullanılmıştır. EBSILON Professional, enerji santrali planlaması ve geliştirilmesindeki termodinamik süreçler için geliştirilmiş bir yazılımdır [43]. Bu yazılımla öncelikle referans alınan YTS ve ÇTS tasarım şartlarına göre analiz edilmiştir. Daha sonra da elde edilen güneş destekli hibrit santrallerin analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yakıt tasarrufu ve karbondioksit emisyonunun azaltımı açısından düşünüldüğünde, güneş enerjisini yüksek basınç ön ısıtıcılarına giren besleme suyunu ısıtmak için kullanmanın alçak basınç ön ısıtıcılarına giren besleme suyunu ısıtmak için kullanmaya göre daha iyi sonuçlar ortaya çıkardığı daha önce literatür kısmında belirtilmişti [7], [8], [9]. Bu nedenle senaryolar oluşturulurken sadece yüksek basınç ön ısıtıcıları dikkate alınmıştır. YTS için beş, ÇTS için üç farklı senaryo oluşturulmuştur. Oluşturulan senaryolar aşağıda verilmiştir.

- Senaryo 1: YTS’de YBÖİ 2’ye güneş alanının paralel yerleştirilmesi
- Senaryo 2: YTS’de YBÖİ 3’e güneş alanının paralel yerleştirilmesi
- Senaryo 3: YTS’de YBÖİ 1 + YBÖİ 2’ye güneş alanının paralel yerleştirilmesi
- Senaryo 4: YTS’de YBÖİ 2 + YBÖİ 3’e güneş alanının paralel yerleştirilmesi
- Senaryo 5: YTS’de YBÖİ 1 + YBÖİ 2 + YBÖİ 3’e güneş alanının paralel yerleştirilmesi
- Senaryo 6: ÇTS’de YBÖİ 1’e güneş alanının paralel yerleştirilmesi
- Senaryo 7: ÇTS’de YBÖİ 2’ye güneş alanının paralel yerleştirilmesi
- Senaryo 8: ÇTS’de YBÖİ 1 + YBÖİ 2’ye güneş alanının paralel yerleştirilmesi

Oluşturulan senaryoların akış şemaları Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4. 3 Senaryoların akış şeması

4.2 Sistemlerin Analizi

4.2.1 Termik Santrallerin Analizi

4.2.1.1 Enerji Analizi

Enerji analizi, termodinamiğin birinci yasasına dayanır. Enerji analizinde, termik santral bileşenlerinin giriş ve çıkış değerleri entalpi, basınç, sıcaklık, entropi, kütleli debi gibi termodinamik büyüklükler kullanılarak belirlenebilir. Buna göre, net güç çıkışı aşağıdaki gibi yazılabilir [44].

$$\dot{W}_{Net} = [\dot{m}_g(h_g - h_1) + (\dot{m}_g - \dot{m}_1)(h_1 - h_2) + (\dot{m}_g - \dot{m}_1 - \dots - \dot{m}_n)(h_n - h_g)] - [\dot{m}(h_g - h_g) / \eta_p] \quad (4.1)$$

Burada, 1, 2,...n numaraları buhar türbininden çekilen ara buhar sayısını ifade etmektedir. Santralde sadece pompalar tarafından güç tüketildiği göz önüne alınmıştır. Diğer iç tüketimler ihmal edilmiştir. Kazanda suya verilmesi gereken toplam ısı enerjisi şu şekilde belirlenir [44]:

$$\dot{Q}_K = [\dot{m}_{kb}(h_{kb,\zeta} - h_{kb,g}) + \dot{m}_{akb}(h_{akb,\zeta} - h_{akb,g})] / \eta_K \quad (4.2)$$

(4.2)'deki kazan giriş entalpisi $h_{kb,g}$ besleme suyu ön ısıtıcısı için tanımlanan enerji dengesi eşitliğinden hesaplanır [44]:

$$(\dot{m}_{b,g} h_{b,g}) + (\dot{m}_{bs,g} h_{bs,g}) = (\dot{m}_{b,\zeta} h_{b,\zeta}) + (\dot{m}_{bs,\zeta} h_{bs,\zeta}) \quad (4.3)$$

Ayrıca, diğer besleme suyu ön ısıtıcılarının çıkış sıcaklıkları da (4.3) eşitliğine göre bulunabilir. Termik güç santrallerinin termik verimi aşağıdaki gibi yazılabilir [44]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{Q}_K} \quad (4.4)$$

Yakıt (kömür) debisini belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılabilir [44]:

$$\dot{m}_{kömür} = \frac{\dot{Q}_K}{AID} \quad (4.5)$$

Yakıt debisine bağlı olarak karbondioksit emisyon miktarı (4.6) eşitliği ile bulunur [45]:

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_{kömür} \times 3,664 \times X_C \quad (4.6)$$

Özgöl yakıt tüketimi b_e ise, birim elektrik enerjisi üretebilmek için gereken yakıt tüketimidir ve eşitlik (4.7)'deki gibi tanımlanır [11]:

$$b_e = \frac{M}{\dot{W}_{Net}} \quad (4.7)$$

4.2.1.2 Ekserji Analizi

Ekserji analizi, termodinamiğin ikinci yasasına dayanır. Ekserji analizinden elde edilen sonuçlar, enerji santrallerindeki tersinmezliklerin azaltılması için kullanılabilir. Tüm santral için ekserji verimliliği aşağıdaki gibi verilebilir [44]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{m}_{kömür} Ex_{kömür}} \quad (4.8)$$

Kömürün kimyasal bileşimine bağlı olarak ekserji değeri çok değişkenlik gösterir. Nem içermeyen katı yakıtlar için kimyasal ekserjinin yakıtın alt ısı değerine oranı (ϕ_{kuru}) aşağıdaki gibi hesaplanabilir [46], [47]:

$$\phi_{kuru} = 1,0437 + 0,1882(X_H / X_C) + 0,0610(X_O / X_C) + 0,0404(X_N / X_C) \quad (4.9)$$

Kükürt ve nem içeren katı yakıtlar için kimyasal ekserji (4.10) eşitliği ile verilebilir [46]:

$$Ex_{kömür} = [AID + 2442X_W] \phi_{kuru} + 9471X_S \quad (4.10)$$

Bu çalışmada kullanılan kömürlerin analizi Çizelge 4.2'de verilmiştir [48].

Çizelge 4. 2 Kömürlerin element analizi [48]

	YTS	ÇTS
Karbon (C) (%)	29,16	30,18
Hidrojen (H) (%)	2,55	2,45
Oksijen (O) (%)	12,68	10,06
Kükürt (S) (%)	1,85	5,28
Nitrojen (N) (%)	0,27	0,31
Nem (W) (%)	31,17	20,36

Çizelge 4. 2 Kömürlerin element analizi (devamı) [48]

	YTS	ÇTS
Kül (%)	22,32	31,36
Alt Isıl Değer (AID) (kJ/kg)	10.253,54	10.604,66
Kimyasal Ekserji (kJ/kg)	12.148,3	12.484,5

4.2.2 Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemlerinin Analizi

Yoğunlaştırıcı güneş enerjisi santrallerinde, ısı veya elektrik üretmek için güneş ışınlarını belli bir noktaya yoğunlaştırmak amacıyla aynalar ve aynaların güneşi takip edebilmeleri için izleme sistemleri kullanılır. LFS bu santrallerde kullanılan sistemlerden birisidir. LFS birçok düzlemsel aynaya sahiptir. Aynalardan belli bir yükseklikte merkezinde bir tüp olan alıcı bulunur. Tüpün içerisinde çevrim akışkanı dolaşır. Aynalar güneş ışınını alıcıya yansıtır ve böylece tüpün içindeki akışkan ısınır. Alıcı sabittir, aynalar ise güneşi takip eder. Düzlemsel aynaların yapısı basittir ve diğer yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerine göre daha ucuzdur [49].

4.2.2.1 Güneş Alanı Optimizasyonu

Bu çalışmada, Çizelge 4.3'de özellikleri verilen Novatec Solar Linear Fresnel Collector NOVA-1 kullanılmıştır [50]. Bu model EBSILON Professional yazılımı kütüphanesinde de mevcuttur [43].

Çizelge 4. 3 NOVA-1 teknik verileri [50]

Modül Uzunluk/Genişlik (m)	44,8/16,56
Net Açıklık Alanı (m ²)	513,6
Odak Uzunluğu (m)	7,4

Güneş alanı optimizasyonu için EBSILON Professional yazılımı bünyesinde bulunan EbsOptimize modülü kullanılmıştır [43]. Optimizasyon için genetik algoritma yöntemi seçilmiştir. Genetik algoritma, doğal biyolojik evrim sürecini benzetmeye dayanan bir optimizasyon yöntemidir. Genetik algoritma beş adımdan oluşur:

- Başlatma; başlangıçta verilen nüfus büyüklüğüne göre birey üretmek.
- Bireysel değerlendirme; değerlendirme kriterlerine göre nüfus içindeki bireylerin uygunluğunu hesaplanmak.
- Seçim; bir sonraki nesli oluşturmak için mevcut nüfus içinden en iyi uyarlanmış bireyleri seçmek.
- Çaprazlama; genlerin bir kısmını rastgele değiştirerek yeni bireyler üretmek.
- Mutasyon; süreç içerisinde bazı genleri değiştirmek.

Tüm bu adımlardan sonra optimizasyon hesaplaması uygun bir çözüme ulaşıncaya kadar durur [51]. EBSILON Professional yazılımı tarafından önerilen genetik algoritma için optimizasyon değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Çizelge 4.5’de ise optimizasyon parametrelerinin değer aralıkları gösterilmiştir.

Çizelge 4. 4 Genetik algoritma için optimizasyon değerleri [43]

Nüfus Büyüklüğü	15
Çaprazlama Olasılığı	0,6
Mutasyon Olasılığı	0,5
Üretim Miktarını Değiştirme	0,75
Üretim Sayısı	30
Yakınsama	0,99

Çizelge 4. 5 Optimizasyon parametreleri

Değişkenler	YTS		ÇTS	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
Modül Sayısı (adet)	0	150	0	250
Besleme Suyu Debisi (kg/s)	0	128,333	0	176,667

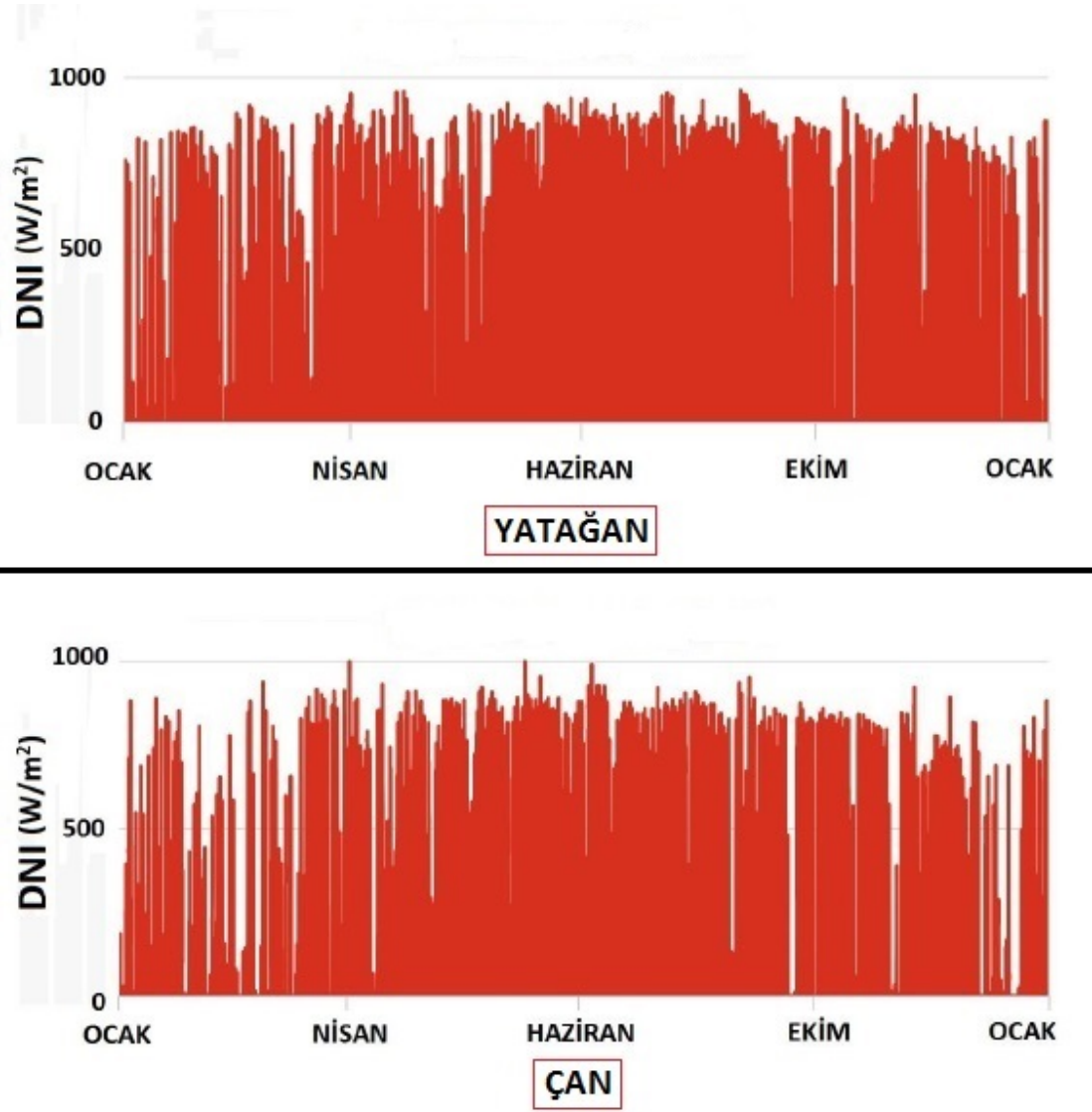
Güneş destekli hibrit santraller için tasarım şartları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Yaz aylarında güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanıldığından yazın başlangıcı ve yılın en uzun günü olan 21 Haziran ile bu tarihte güneş ışınlarının Yatağan’a ve Çan’a en

dik açıyla düştüğü saat olan 13.00 tasarım şartı olarak seçilmiştir. Hem Yatağan hem de Çan için yıl boyunca güneş radyasyonunun 900 W/m^2 değerini geçtiği gün sayısı çok azdır. Bu nedenle güneş radyasyonunun üst sınır değeri 900 W/m^2 olarak alınmıştır. Optimizasyon, tasarım şartlarında optimizasyon değişkenlerine göre yapılmıştır. Optimizasyon yapılırken hibrit santralde güç artışının olmadığı, sadece yakıt tasarrufunun olduğu kabul edilmiştir. Güneş alanının paralel olarak yerleştirildiği, besleme suyu ön ısıtıcıları için çekilen ara buhar miktarını sıfır yapacak güneş alanı büyüklüğü optimizasyonun sınır koşulu seçilmiştir. Tasarımda enerji depolama cihazı kullanılmamıştır.

Çizelge 4. 6 Güneş destekli hibrit santraller için tasarım şartları

	YTS	ÇTS
Tarih / Zaman	21 Haziran / Saat 13.00	21 Haziran / Saat 13.00
Zaman Dilimi	UCT +3	UCT +3
Enlem ($^{\circ}$)	37,33	40,02
Boylam ($^{\circ}$)	28,10	26,98
DNI (kW/m^2)	0,9	0,9
Çevre Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	25	15
Yük (%)	100	100

Yıllık hesaplamalarda kullanılan doğrudan ışınlam şiddetleri (DNI) Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi tarafından yayınlanan Tipik Meteorolojik Yıl (TMY) verilerinden sağlanmıştır. Yatağan ve Çan için TMY grafikleri Şekil 4.4’de verilmiştir [52].



Şekil 4. 4 TMY grafikleri [52]

4.2.2.2 Güneş Alanı Enerji Analizi

LFS enerji dengesi aşağıdaki eşitliklerden bulunabilir [53], [54]:

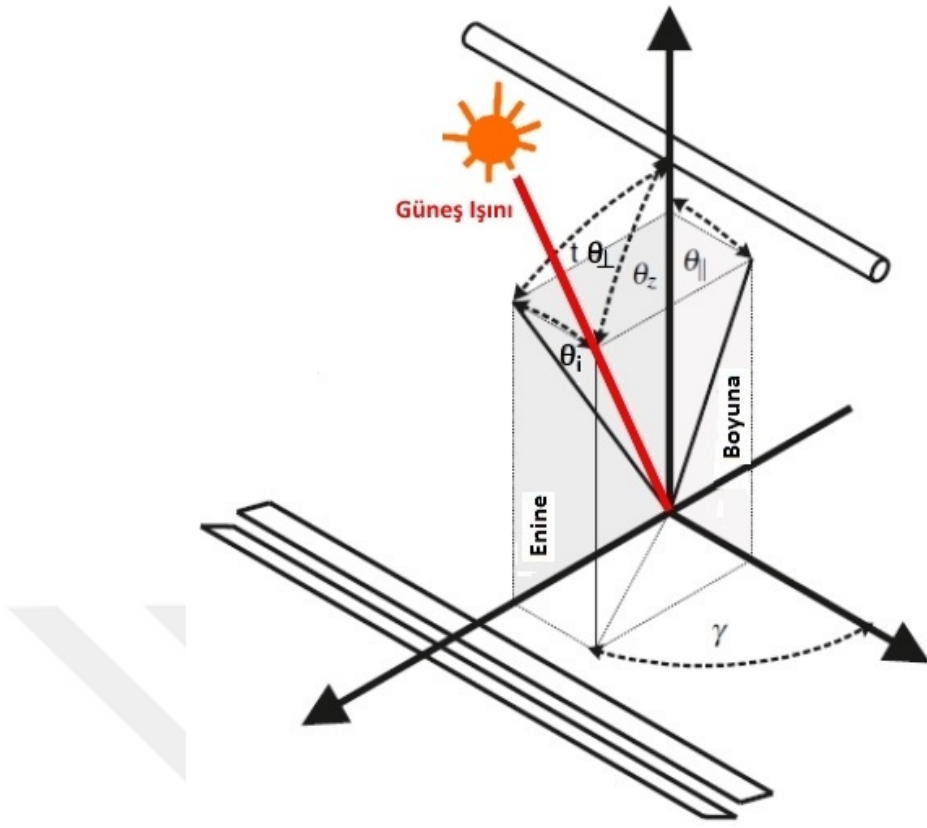
$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{güneş} - \dot{Q}_{kayıp,F} - \dot{Q}_{kayıp,H \& P} \quad (4.11)$$

$$\dot{Q}_{güneş} = DNI \times A_{Net} \times \eta_{opt} \quad (4.12)$$

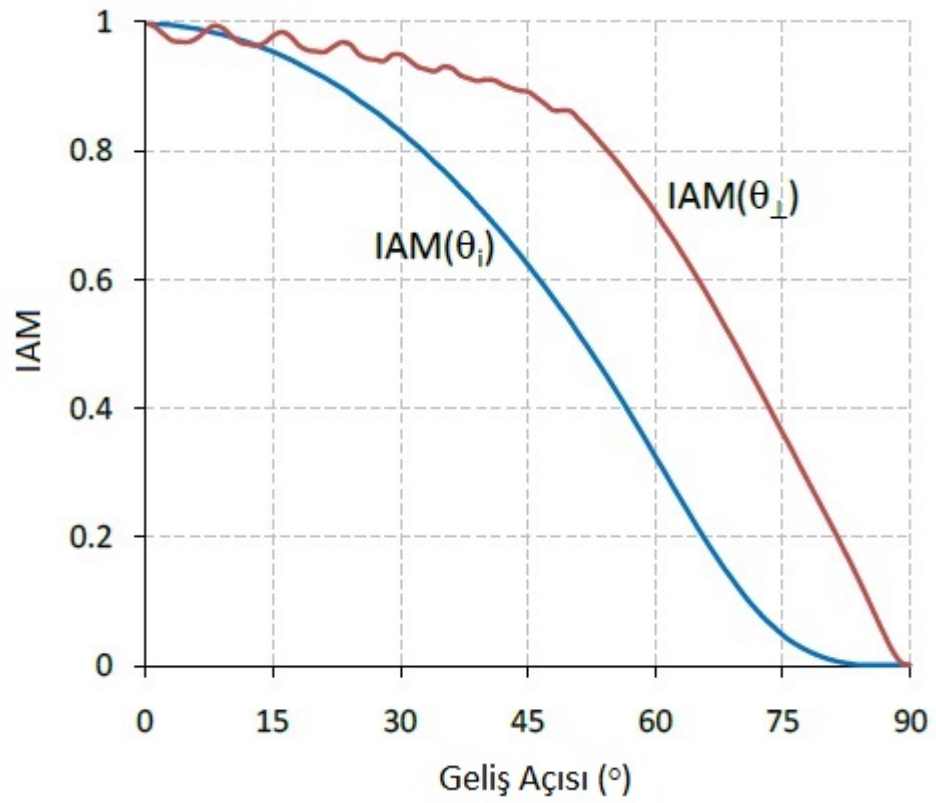
$$\eta_{opt} = \eta_{opt,maks} \times IAM \times \eta_{cl} \quad (4.13)$$

$$IAM = IAM_{\perp}(\theta_{\perp}) \times IAM_i(\theta_i) \quad (4.14)$$

IAM , $\theta_{\perp}$ ve θ_i açılarına bağlıdır. Açı tanımları Şekil 4.5’de gösterilmiştir. $IAM_{\perp}$ ile IAM_i değerleri ise Şekil 4.6’dan belirlenebilir [54].



Şekil 4. 5 Yatay Kuzey-Güney izleme eksenine sahip LFS için açı tanımı [54]



Şekil 4. 6 LFS için geliş açısı düzenleyicisi [54]

LFS kayıpları ile boru ve ekipman kayıpları ise aşağıdaki gibi tanımlanır [43]:

$$\dot{Q}_{kayıp,F} = [(c_0 \Delta T) + (c_1 \Delta T^2)] A_{Net} \quad (4.15)$$

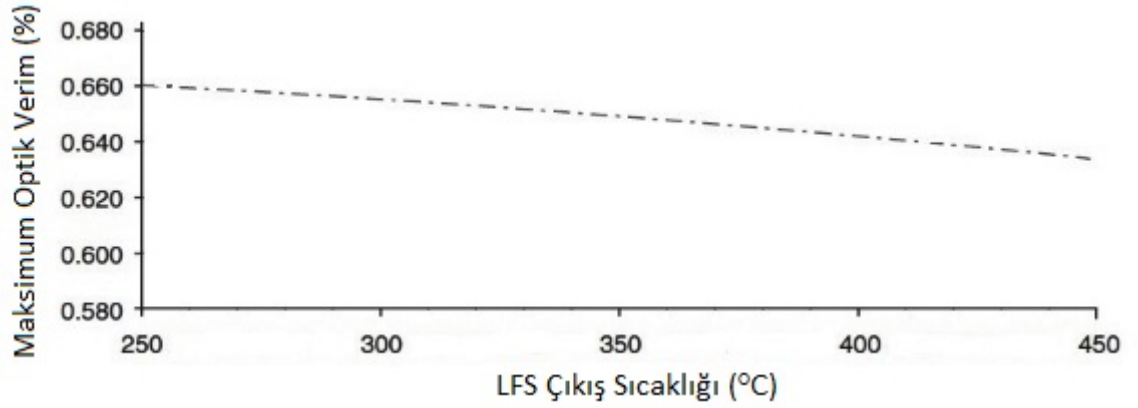
$$\dot{Q}_{kayıp,H\&P} = \dot{q}_{kayıp,H\&P} A_{Net} \quad (4.16)$$

Bu çalışmadaki güneş alanı hesaplamalarında Çizelge 4.7'deki veriler kullanılmıştır.

Çizelge 4. 7 LFS için veriler [43], [53]

η_{cl} (%)	98
$\eta_{opt,maks}$ (%)	67
c_0 (W/mK)	0,671
c_1 (W/mK ²)	0,00256
$\dot{q}_{kayıp,H\&P}$ (W/m ²)	7,5

Şekil 4.7'de ise, güneş alanına giren besleme suyunun çıkış sıcaklığına göre maksimum optik verimin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4. 7 LFS çıkış sıcaklığına göre maksimum optik verim [49]

4.2.2.3 Güneş Alanı Ekserji Analizi

LFS ekserji dengesi aşağıdaki eşitliklerden bulunabilir [35]:

$$Ex_{güneş} = (DNI \times A_{Net}) \left(1 - \frac{T_0}{T_{bg}}\right) \quad (4.17)$$

T_{bg} güneşin yüzey sıcaklığına bağlıdır ve (4.18) eşitliğinden hesaplanır [35]:

$$T_{bg} = \frac{3}{4} T_y \quad (4.18)$$

Güneşin yüzey sıcaklığının yaklaşık değeri 5770 K'dir. Bu nedenle hesaplarda T_{bg} 4330 K alınmıştır.

4.2.3 Güneş Destekli Hibrit Santrallerin Enerji ve Ekserji Analizi

Modellenen güneş destekli hibrit santraller için termik verim ve ekserji verimi aşağıda tanımlanmıştır [12]:

$$\eta_{th,hibrit} = \frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{Q}_K + (DNI \times A_{Net})} \quad (4.19)$$

$$\eta_{ex,hibrit} = \frac{\dot{W}_{Net}}{Ex_{kömür} \dot{m}_{kömür} + Ex_{güneş}} \quad (4.20)$$

Hibrit santrallerde net güç üretimindeki güneş enerjisinin payı ise (4.21) eşitliği kullanılarak bulunabilir [11]:

$$p_{güneş} = \frac{\dot{Q}_{güneş}}{\dot{Q}_K + \dot{Q}_{güneş}} \times 100\% \quad (4.21)$$

4.2.4 Güneş Destekli Hibrit Santrallerin Ekonomik Analizi

Güneş enerjisi sistemlerinin kaynağının bir maliyeti olmasada, güneş ışınlarını toplayabilmek ve yararlı bir işe dönüştürebilmek için gerekli olan ekipmanların bir maliyeti vardır. Güneş enerjisi sistemleri genellikle yüksek yatırım maliyeti ve düşük işletme maliyetleri ile tanımlanır. Bu nedenle bir güneş enerjisi sistemini kullanmaya karar vermek için aynaların ve diğer ekipmanların yatırım maliyetinin ne kadar bir süre içerisinde karşılandığının bilinmesi gerekir [35]. Bu çalışmada yatırımların geri ödeme süresi hesaplanmış olup, hesaplara yakıt ve emisyon tasarrufu ile güneş enerjisinden sağlanan elektrik üretim gelirleri de dahil edilmiştir.

Sistemin toplam ilk yatırım maliyeti (C_Y) aşağıdaki gibi hesaplanır [35]:

$$C_Y = C_{GA} + C_{Ek} \quad (4.22)$$

$$C_{GA} = g_{GA} \times A_{Net} \quad (4.23)$$

$$C_{el} = (g_{el} \times p_{güneş,yıl} \times E_{yıl}) \quad (4.24)$$

$$C_y = (g_y \times t_y) \quad (4.25)$$

$$C_{em} = (g_{em} \times t_{em}) \quad (4.26)$$

İlk yılın sonunda elde edilen toplam gelir ise aşağıdaki gibi tanımlanır [35]:

$$C_T = C_{el} + C_y + C_{em} - C_{O\&M} \quad (4.27)$$

Yatırımın geri ödeme süresi eşitlik (4.28)'den bulunabilir [35]:

$$\frac{C_y}{C_T} = BDF(n, i, r) \quad (4.28)$$

Bugünkü değer faktörü de faiz oranının ve iskonto oranının bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi tanımlanır [35]:

$$BDF(n, i, r) = \sum_{j=1}^n \frac{(1+i)^{j-1}}{(1+r)^j} \quad (4.29)$$

Ekonomik analiz için kabul edilen parametreler Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4. 8 Ekonomik parametreler [55], [56], [57], [58]

i (%)	4
r (%)	12
g_{el} (€/kWh)	0,12
g_y (€/ton)	30
g_{em} (€/tonCO ₂)	17,5
g_{GA} (€/m ²)	250
C_{Ek} (€)	$C_{GA} \times \%20$
$C_{O\&M}$ (€)	$C_{GA} \times \%2$

4.3 Uygulanan Senaryoların Bulguları

Her bir senaryo için tasarım şartlarındaki optimizasyon sonuçları Çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4. 9 Optimizasyon sonuçları

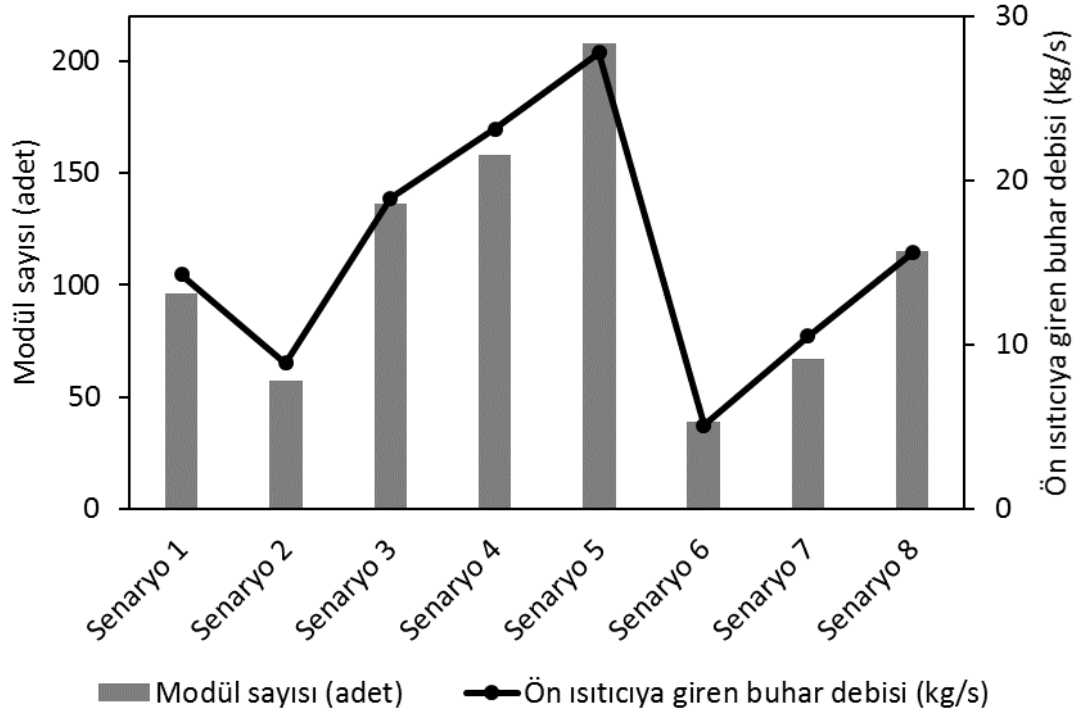
S e n a r y o	LFS Giriş Sıcaklığı (°C)	LFS Çıkış Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık Farkı (°C)	Ara Buhar Debisi (kg/s)	LFS'den Geçen Maksimum Debi (kg/s)	LFS Modül Sayısı (adet)	Güneş Alanı (m ²)
1	183,3	218,4	35,1	14,2	164,1	96	49.285,1
2	221,7	240,5	18,8	8,9	172,8	57	29.263,0
3	162,5	218,4	55,9	18,9	148,3	136	69.820,6
4	183,3	240,5	57,2	23,1	162,9	158	81.115,0
5	162,5	240,5	78,0	27,8	159,5	208	106.784,4
6	186,7	207,8	21,1	5,1	109,5	39	20.022,0
7	211,6	242,4	30,8	10,5	121,5	67	34.396,9
8	186,7	242,4	55,7	15,6	118,0	115	59.039,4

Şekil 4.8'de modül sayısının, dolayısıyla güneş alanı büyüklüğünün, ön ısıtıcılara giren buhar debisine bağlı değişimi gösterilmiştir. Ön ısıtıcılara giren buhar debisi miktarı ne kadar büyükse güneş alanı da o derece büyük olacak demektir.

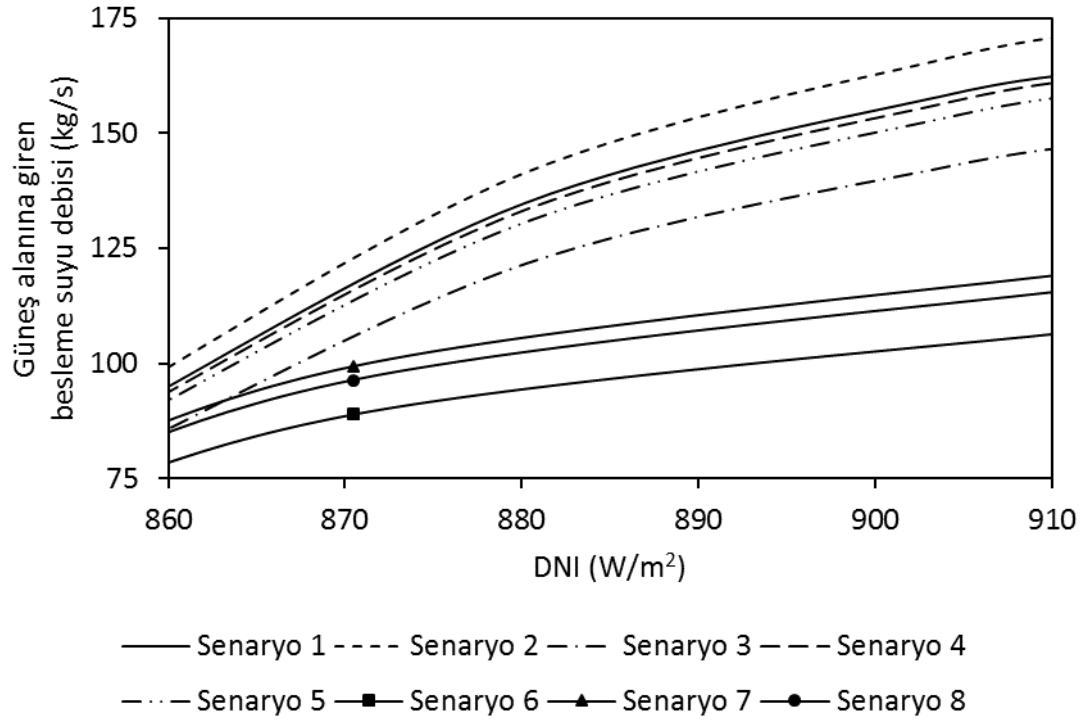
Güneş alanından geçen besleme suyu debisinin DNI ile değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. DNI arttıkça güneş alanına giren besleme suyu debisi de yükselmektedir. Böylece hibrit sisteme giren güneş enerjisi miktarı da artmış olur.

Çizelge 4.10'da referans santraller ile uygulanan senaryoları karşılaştırmak için tasarım şartlarında yapılan hesaplamaların sonuçları ve sonuçların referans santrale göre azalma yüzdeleri verilmiştir.

Tüm senaryolar için, yıllık yakıt tasarrufu ile yıllık emisyon azaltımı miktarı, yıllık yakıt tüketimindeki ve emisyon salınımındaki azalma yüzdesi, ilk yatırım maliyeti ile yakıt tasarrufundan, emisyon azaltımından ve üretilen elektrikteki güneş enerjisi payından elde edilen yıllık gelir Çizelge 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4. 8 Ön ısıtıcıya giren buhar debisine göre modül sayısı değişimi



Şekil 4. 9 DNI'ya göre güneş alanına giren besleme suyu debisi

Çizelge 4. 10 Tasarım şartlarında elde edilen sonuçlar

	Yük	$\dot{W}_{Net}$ (MW)	$\dot{Q}_K$ (MW)	η_{th} (%)	η_{ex} (%)	$\dot{m}_{kömür}$ (kg/s)	$\dot{m}_{CO_2}$ (kg/s)	b_e (g/kWh)	$\dot{Q}_u$ (MW)	$\dot{Q}_{güneş}$ (MW)	$\dot{Q}_{kayıp,F}$ (MW)	$\dot{Q}_{kayıp,H\&P}$ (MW)	$EX_{güneş}$ (MW)	$p_{güneş}$ (%)
Y T S	%100	210,0	567,9	37,0	31,2	55,4	59,2	949,5	-	-	-	-	-	-
	%75	157,5	437,3	36,0	30,0	42,7	45,6	975	-	-	-	-	-	-
	%50	105,0	303,6	35,0	29,0	29,6	31,6	1.015,00	-	-	-	-	-	-
S e n a r y o 1	%100	210,0	552,1 (-%2,8)	35,1 (-%5,1)	30,0 (-%3,8)	53,9 (-%2,7)	57,6 (-%2,7)	923,2 (-%2,8)	25,7	26,9	0,8	0,4	41,6	4,6
	%75	157,5	424,1 (-%3,0)	33,6 (-%6,7)	28,9 (-%3,7)	41,4 (-%3,0)	44,2 (-%3,1)	945,6 (-%3,0)	18,3	26,9	8,2	0,4	41,6	6,0
	%50	105,0	295,9 (-%2,5)	30,8 (-%12,0)	26,7 (-%7,9)	28,9 (-%2,4)	30,9 (-%2,2)	989,5 (-%2,5)	9,8	26,9	16,7	0,4	41,6	8,3
S e n a r y o 2	%100	210,0	560,0 (-%1,4)	35,8 (-%3,2)	30,5 (-%2,2)	54,6 (-%1,4)	58,4 (-%1,4)	936,4 (-%1,4)	15,2	16,0	0,6	0,2	24,7	2,8
	%75	157,5	429,6 (-%1,8)	34,5 (-%4,2)	29,5 (-%1,7)	41,9 (-%1,9)	44,8 (-%1,8)	957,7 (-%1,8)	11,0	16,0	4,8	0,2	24,7	3,6
	%50	105,0	297,9 (-%1,9)	32,4 (-%7,4)	27,8 (-%4,1)	29,1 (-%1,7)	31,1 (-%1,6)	996,1 (-%1,9)	6,8	16,0	9,0	0,2	24,7	5,1

Çizelge 4. 10 Tasarım şartlarında elde edilen sonuçlar (devamı)

	Yük	$\dot{W}_{Net}$ (MW)	$\dot{Q}_K$ (MW)	η_{th} (%)	η_{ex} (%)	$\dot{m}_{k\ddot{o}m\ddot{u}r}$ (kg/s)	$\dot{m}_{co2}$ (kg/s)	b_e (g/kWh)	$\dot{Q}_u$ (MW)	$\dot{Q}_{g\ddot{u}n\ddot{e}ş}$ (MW)	$\dot{Q}_{kayıp,F}$ (MW)	$\dot{Q}_{kayıp,H\&P}$ (MW)	$Ex_{g\ddot{u}n\ddot{e}ş}$ (MW)	$p_{g\ddot{u}n\ddot{e}ş}$ (%)
S e n a r y o 3	%100	210,0	543,3 (-%4,3)	34,6 (-%6,5)	29,8 (-%4,5)	53,0 (-%4,3)	56,6 (-%4,4)	908,4 (-%4,3)	36,6	38,3	1,1	0,5	58,9	6,6
	%75	157,5	424,7 (-%2,9)	32,3 (-%10,3)	28,0 (-%6,7)	41,4 (-%3,0)	44,3 (-%2,9)	946,8 (-%2,9)	17,4	38,3	20,4	0,5	58,9	8,3
	%50	105,0	295,9 (-%2,5)	29,2 (-%16,6)	25,6 (-%11,7)	28,9 (-%2,4)	30,8 (-%2,5)	989,3 (-%2,5)	9,8	38,3	28,3	0,5	58,9	11,5
S e n a r y o 4	%100	210,0	536,3 (-%7,0)	34,4 (-%7,0)	29,8 (-%4,5)	52,3 (-%5,6)	55,9 (-%5,6)	896,8 (-%5,6)	42,3	44,5	1,5	0,6	68,4	7,7
	%75	157,5	413,5 (-%5,4)	32,3 (-%10,3)	28,2 (-%6,0)	40,3 (-%5,6)	43,1 (-%5,5)	921,7 (-%5,5)	29,7	44,5	14,2	0,6	68,4	9,7
	%50	105,0	289,1 (-%4,8)	29,0 (-%17,1)	25,5 (-%12,1)	28,2 (-%4,7)	30,1 (-%4,7)	966,9 (-%4,7)	17,1	44,5	26,8	0,6	68,4	13,3

Çizelge 4. 10 Tasarım şartlarında elde edilen sonuçlar (devamı)

	Yük	$\dot{W}_{Net}$ (MW)	$\dot{Q}_K$ (MW)	η_{th} (%)	η_{ex} (%)	$\dot{m}_{kömür}$ (kg/s)	$\dot{m}_{CO_2}$ (kg/s)	b_e (g/kWh)	$\dot{Q}_u$ (MW)	$\dot{Q}_{güneş}$ (MW)	$\dot{Q}_{kayıp,F}$ (MW)	$\dot{Q}_{kayıp,H\&P}$ (MW)	$EX_{güneş}$ (MW)	$p_{güneş}$ (%)
S e n a r y o 5	%100	210,0	525,9 (-%7,4)	33,7 (-%8,9)	29,4 (-%5,8)	51,3 (-%7,4)	54,8 (-%7,4)	879,2 (-%7,4)	55,9	58,8	1,9	0,8	90,1	10,1
	%75	157,5	410,2 (-%6,2)	31,1 (-%13,6)	27,3 (-%9,0)	40,0 (-%6,3)	42,8 (-%6,1)	914,4 (-%6,2)	33,9	58,8	24,1	0,8	90,1	12,5
	%50	105,0	289,2 (-%4,7)	27,2 (-%22,3)	24,2 (-%16,6)	28,2 (-%4,7)	30,1 (-%4,7)	966,9 (-%4,7)	17,1	58,8	40,9	0,8	90,1	16,9
Ç T S	%100	160,0	385,5	41,5	35,3	36,3	40,2	817,8	-	-	-	-	-	-
	%75	120,0	292,9	41,0	34,8	27,6	30,6	828,6	-	-	-	-	-	-
	%50	80,0	197,6	40,5	34,4	18,6	20,6	838,7	-	-	-	-	-	-
S e n a r y o 6	%100	160,0	381,1 (-%1,1)	40,2 (-%3,1)	34,4 (-%2,5)	35,9 (-%1,1)	39,8 (-%1,0)	808,7 (-%1,1)	9,7	10,2	0,4	0,2	15,9	2,6
	%75	120,0	288,7 (-%1,4)	39,3 (-%4,1)	33,7 (-%3,2)	27,2 (-%1,4)	30,1 (-%1,6)	816,7 (-%1,4)	7,6	10,2	2,4	0,2	15,9	3,4
	%50	80,0	195,3 (-%1,2)	37,7 (-%6,9)	32,6 (-%5,2)	18,4 (-%1,1)	20,4 (-%1,0)	828,6 (-%1,2)	4,4	10,2	5,6	0,2	15,9	5,0

Çizelge 4. 10 Tasarım şartlarında elde edilen sonuçlar (devamı)

Yük	$\dot{W}_{Net}$ (MW)	$\dot{Q}_K$ (MW)	η_{th} (%)	η_{ex} (%)	$\dot{m}_{kömür}$ (kg/s)	$\dot{m}_{CO_2}$ (kg/s)	b_e (g/kWh)	$\dot{Q}_u$ (MW)	$\dot{Q}_{güneş}$ (MW)	$\dot{Q}_{kayıp,F}$ (MW)	$\dot{Q}_{kayıp,H\&P}$ (MW)	$EX_{güneş}$ (MW)	$p_{güneş}$ (%)
S en a r y o 7	%100 160,0	374,9 (-%2,7)	39,6 (-%4,6)	34,1 (-%3,4)	35,3 (-%2,8)	39,1 (-%2,7)	795,3 (-%2,8)	16,5	17,5	0,8	0,3	27,3	4,5
%75	120,0	284,3 (-%2,9)	38,3 (-%6,6)	33,1 (-%4,9)	26,8 (-%2,9)	29,7 (-%2,9)	804,3 (-%2,9)	12,1	17,5	5,1	0,3	27,3	5,8
%50	80,0	193,0 (-%2,3)	36,0 (-%11,1)	31,4 (-%8,7)	18,2 (-%2,2)	20,1 (-%2,4)	819,0 (-%2,3)	6,9	17,5	10,3	0,3	27,3	8,3
S en a r y o 8	%100 160,0	365,0 (-%5,3)	38,5 (-%7,2)	33,6 (-%4,8)	34,4 (-%5,2)	38,1 (-%5,2)	774,4 (-%5,3)	28,4	30,1	1,2	0,4	46,8	7,6
%75	120,0	277,2 (-%5,4)	36,6 (-%10,7)	32,1 (-%7,8)	26,1 (-%5,4)	28,9 (-%5,6)	784,3 (-%5,3)	20,9	30,1	8,8	0,4	46,8	9,8
%50	80,0	189,1 (-%4,3)	33,4 (-%17,5)	29,7 (-%13,7)	17,8 (-%4,3)	19,7 (-%4,4)	802,6 (-%4,3)	11,9	30,1	17,8	0,4	46,8	13,7

Çizelge 4. 11 Her bir senaryo için yıl bazında sonuçlar

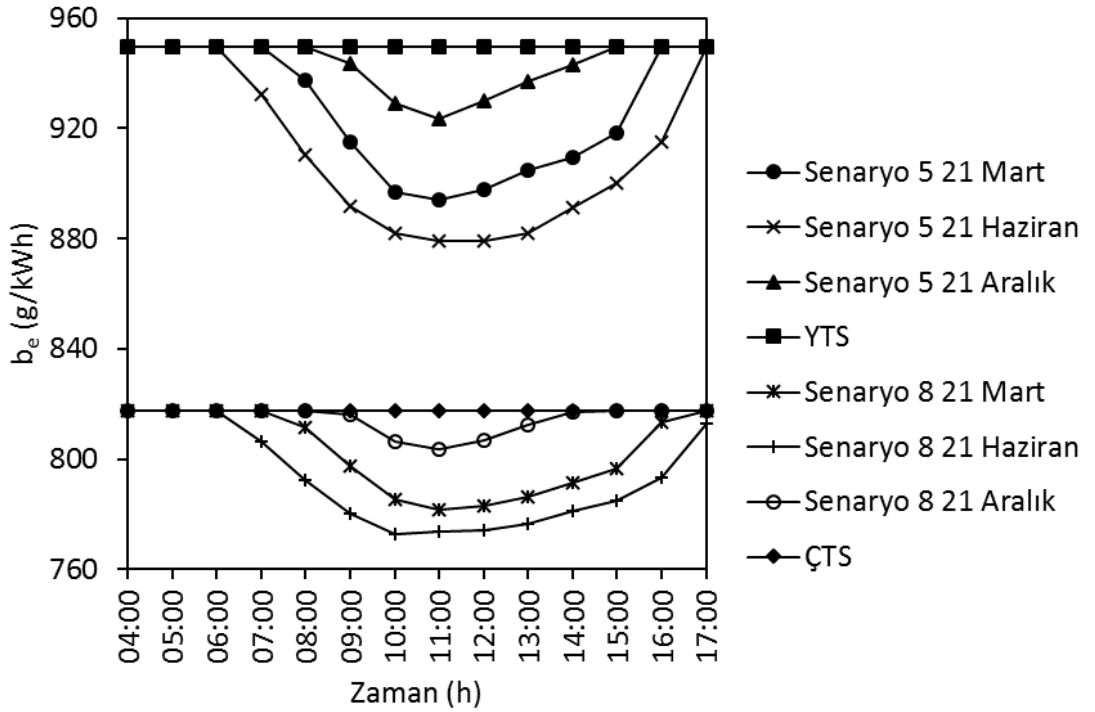
	Yük	t_y (ton/yıl)	t_{em} (ton/yıl)	$p_{güneş,yıl}$ (%)	C_y (€)	C_y (€/yıl)	C_{em} (€/yıl)	C_{el} (€/yıl)
S e n a r y o 1	%100	6.233,6 (-%0,36)	6.663,8 (-%0,36)	0,63	14.785.531,2	187.007,9	116.615,6	1.398.387,7
	%75	6.741,1 (-%0,50)	7.206,2 (-%0,50)	0,77		202.232,1	126.109,2	1.277.818,3
	%50	5.141,2 (-%0,55)	5.495,9 (-%0,55)	0,81		154.235,2	96.179,0	891.013,0
S e n a r y o 2	%100	3.100,0 (-%0,18)	3.314,0 (-%0,18)	0,38	8.778.909,0	93.001,0	57.994,2	833.230,4
	%75	3.846,9 (-%0,29)	4.112,3 (-%0,29)	0,46		115.405,5	71.965,4	767.987,2
	%50	3.588,2 (-%0,38)	3.835,9 (-%0,38)	0,54		107.647,4	67.127,5	590.862,8
S e n a r y o 3	%100	9.712,6 (-%0,56)	10.382,9 (-%0,56)	0,90	20.946.168,9	291.379,9	181.700,6	1.975.405,9
	%75	7.894,0 (-%0,59)	8.438,8 (-%0,59)	0,91		236.821,1	147.678,4	1.499.918,3
	%50	5.604,5 (-%0,60)	5.991,2 (-%0,60)	0,91		168.134,8	104.846,6	1.001.041,6
S e n a r y o 4	%100	12.363,3 (-%0,71)	13.216,4 (-%0,71)	1,04	24.334.519,8	370.898,2	231.287,1	2.296.104,6
	%75	12.337,7 (-%0,92)	13.189,0 (-%0,92)	1,26		370.129,8	230.808,0	2.088.299,4
	%50	9.535,2 (-%1,02)	10.193,1 (-%1,02)	1,38		286.054,9	178.380,0	1.518.516,6

Çizelge 4. 11 Her bir senaryo için yıl bazında sonuçlar (devamı)

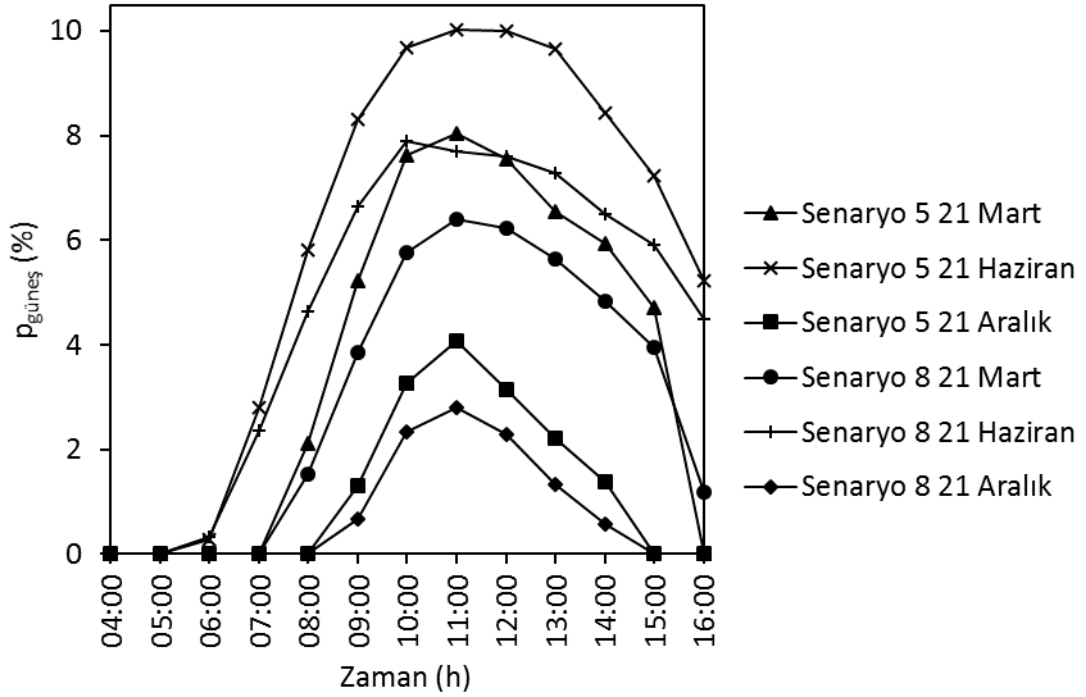
	Yük	t _y (ton/yıl)	t _{em} (ton/yıl)	p _{günes,yıl} (%)	C _y (€)	C _y (€/yıl)	C _{em} (€/yıl)	C _{el} (€/yıl)
S e n a r y o 5	%100	16.513,3 (-%0,95)	17.652,9 (-%0,95)	1,36	32.035.317,3	495.400,2	308.925,0	3.010.293,0
	%75	15.211,5 (-%1,13)	16.261,2 (-%1,13)	1,56		456.345,5	284.571,0	2.587.619,3
	%50	10.228,7 (-%1,10)	10.934,6 (-%1,10)	1,51		306.862,4	191.355,3	1.671.357,3
S e n a r y o 6	%100	1.477,9 (-%0,13)	1.635,1 (-%0,13)	0,32	6.006.621,9	44.336,5	28.614,7	541.381,2
	%75	1.769,6 (-%0,20)	1.957,8 (-%0,20)	0,40		53.087,0	34.262,3	504.779,4
	%50	1.256,4 (-%0,21)	1.390,1 (-%0,21)	0,44		37.691,6	24.326,1	372.840,2
S e n a r y o 7	%100	3.607,4 (-%0,31)	3.991,2 (-%0,31)	0,55	10.319.070,0	108.221,2	69.845,9	927.991,0
	%75	3.683,9 (-%0,42)	4.075,8 (-%0,42)	0,67		110.516,1	71.327,0	845.510,9
	%50	2.485,0 (-%0,42)	2.749,3 (-%0,42)	0,73		74.548,6	48.113,6	611.325,7
S e n a r y o 8	%100	7.003,7 (-%0,61)	7.748,8 (-%0,61)	0,94	17.711.835,0	210.110,0	135.604,9	1.584.811,4
	%75	6.740,3 (-%0,77)	7.457,5 (-%0,77)	1,14		202.208,8	130.505,4	1.439.989,1
	%50	4.561,1 (-%0,78)	5.046,4 (-%0,78)	1,24		136.832,4	88.311,5	1.038.702,4

Grafiklerin daha anlaşılabilir olması için şekillerde sadece Senaryo 4, Senaryo 5 ve Senaryo 8'e yer verilmiştir. Grafikler diğer senaryolar için de aynı karakterdedir.

Şekil 4.10'da ve Şekil 4.11'de sırasıyla spesifik tarihlerde özgül yakıt tüketimi ve net güç üretimindeki güneş enerjisi payının değişimi gösterilmiştir. DNI değerinin arttığı saatlerde, hibrit santralde güneş enerjisinin payı da artmaktadır. Buna bağlı olarak özgül yakıt tüketimi de azalmaktadır. 21 Haziran tarihinde güneş enerjisi payı en yüksek düzeye ulaşmıştır. Dolayısıyla özgül yakıt tüketimi bu tarihte diğer tarihlere göre daha fazla azalmaktadır. Bunun nedeni, 21 Haziran'da güneşin geliş açısının diğer tarihlere göre daha dik olması ve güneş enerjisinden daha fazla yararlanılmasıdır.



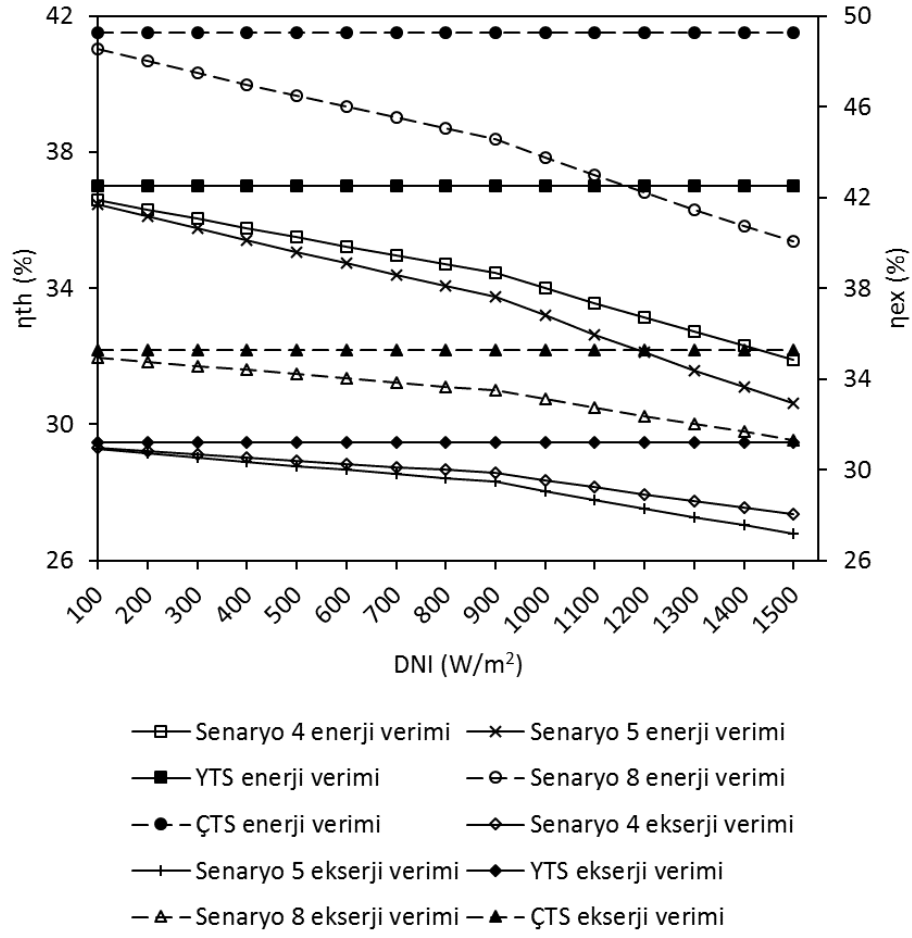
Şekil 4. 10 Spesifik tarihlere göre özgül yakıt tüketimindeki değişim



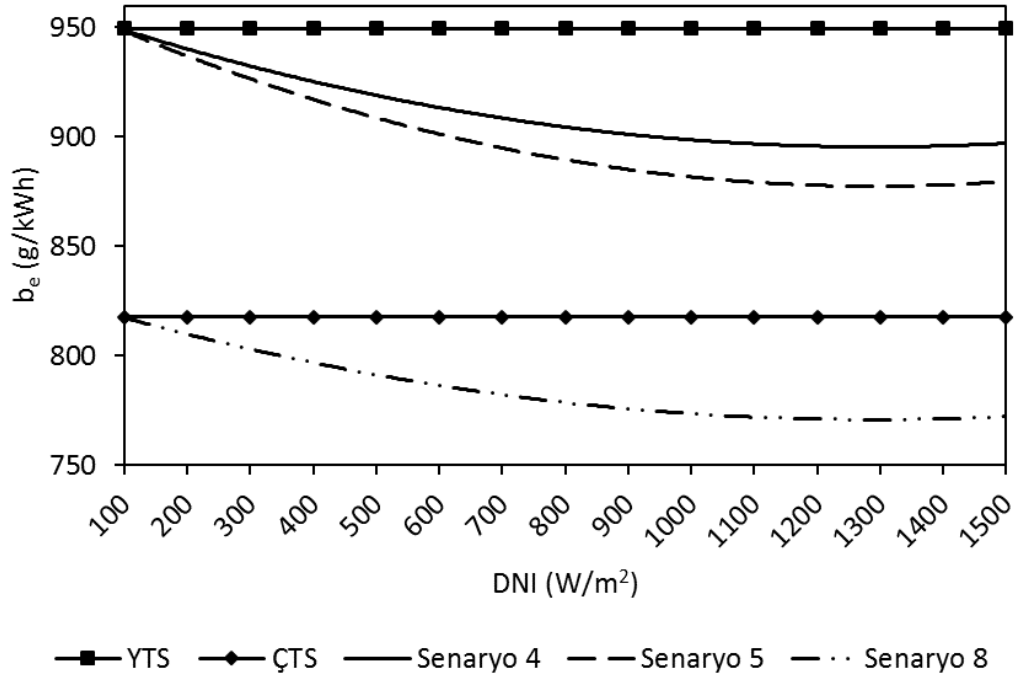
Şekil 4. 11 Spesifik tarihlere göre güneş enerjisi payının değişimi

Şekil 4.12’de DNI’ya bağlı olarak enerji ve ekserji veriminin değişimi gösterilmiştir. DNI arttıkça referans alınan santrallere (YTS ve ÇTS’ye) göre hibrit santralin enerji ve ekserji veriminin azaldığı görülmüştür. DNI’nın artmasıyla beraber kazandan sisteme olan ısı girişi azalmış, buna bağlı olarak da kömür tüketimi düşmüştür. Başka bir deyişle özgül yakıt sarfiyatı azalmıştır (Şekil 4.13). Bundan dolayı sisteme giren kömür kaynaklı enerji ve ekserji değeri küçülmüştür. Fakat sisteme giren güneş kaynaklı enerji ve ekserji girişi, yakıt kaynaklı enerji ve ekserji düşüşünden daha büyüktür. Bu durum Eşitlik (4.19) ve Eşitlik (4.20)’de paydanın değerini büyüteceğinden verimler de azalmış olur.

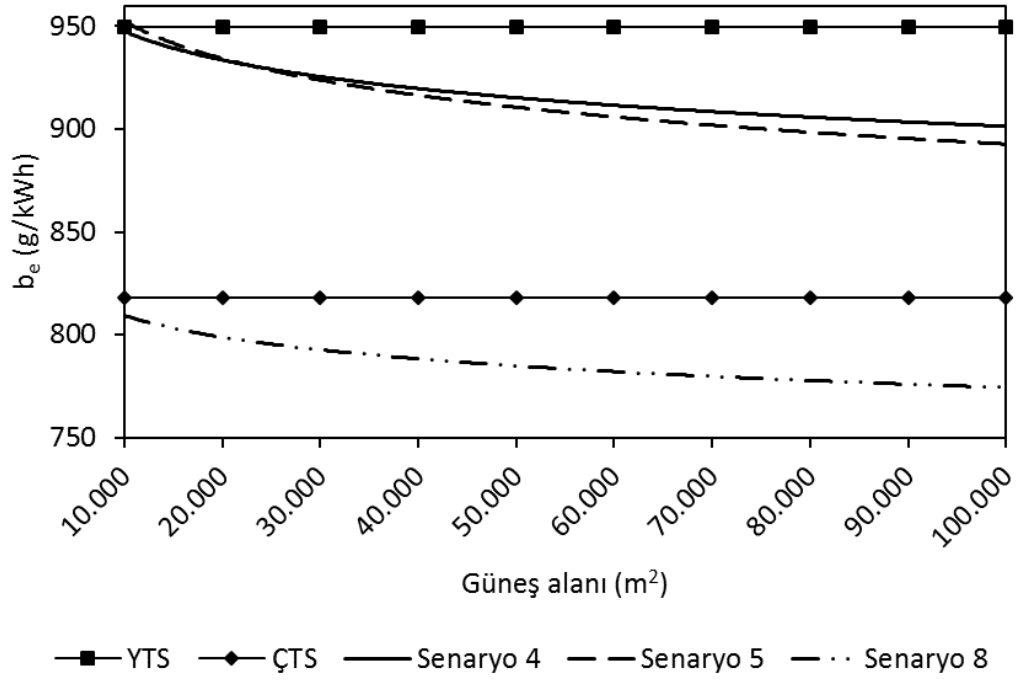
Bunun yanında güneş alanının büyümesi, özgül yakıt tüketimi ve verimler üzerinde DNI artışıyla aynı etkiye sahiptir. Çünkü güneş alanının büyümesi ile daha fazla güneş ışıınımı toplanacaktır ve böylece sisteme giren güneş kaynaklı enerji ve ekserji girişi de artacaktır (Şekil 4.14), (Şekil 4.15).



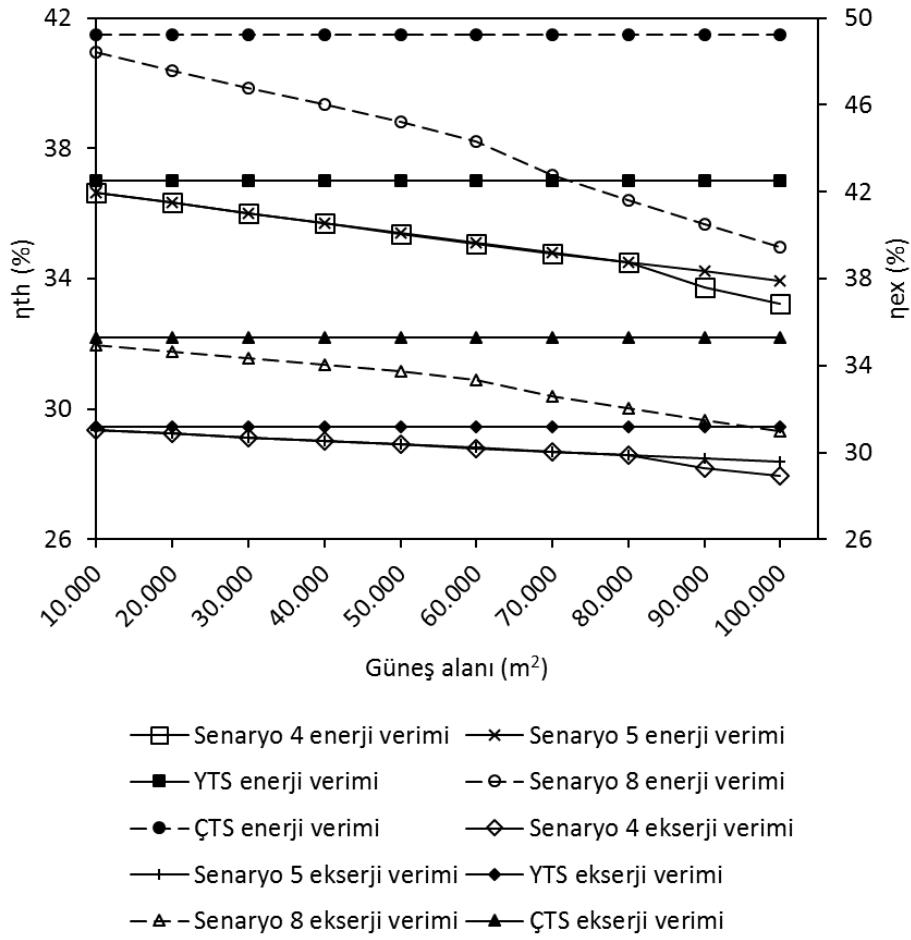
Şekil 4. 12 DNI'ya göre enerji ve ekserji veriminin değişimi



Şekil 4. 13 DNI'ya göre özgül yakıt tüketiminin değişimi

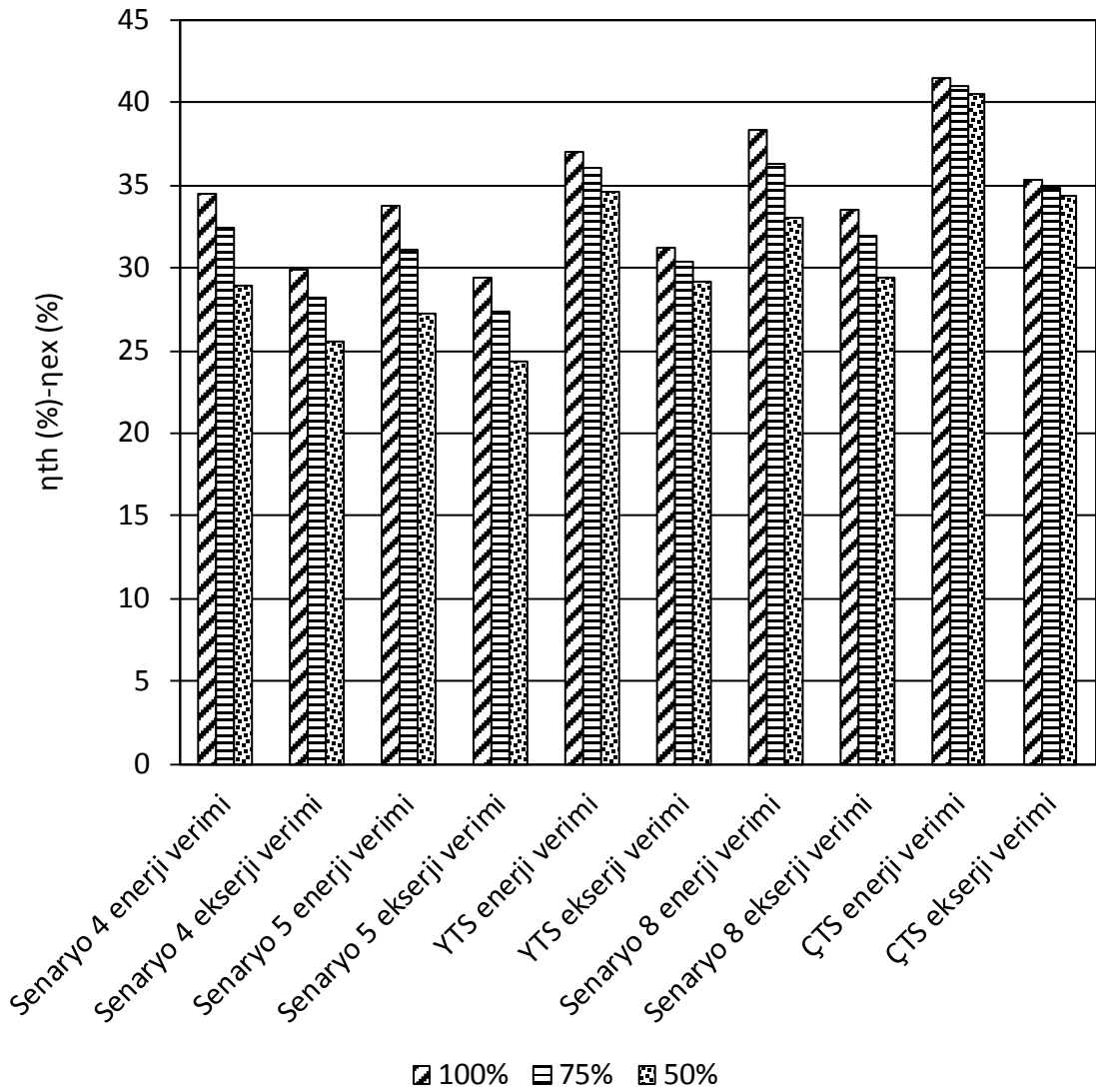


Şekil 4. 14 Güneş alanına göre özgül yakıt tüketiminin değişimi



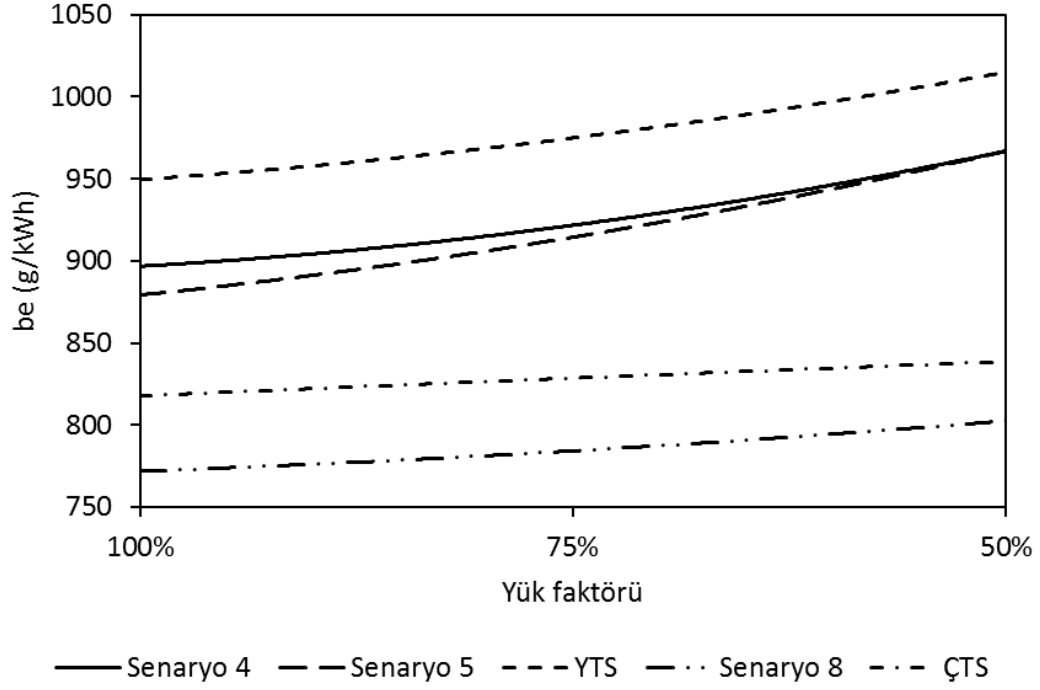
Şekil 4. 15 Güneş alanına göre enerji ve ekserji veriminin değişimi

Termik santrallerde yük faktörünün düşmesiyle enerji ve ekserji veriminin azaldığı bilinmektedir. Aynı durum hibrit santraller için de geçerlidir. Fakat bu azalmanın hibrit santrallerde termik santrallere kıyasla daha fazla olduğu Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Hibrit santrallerin %75’den daha az yük koşullarında çalışması durumunda verimlerdeki düşüşün daha da arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. 16 Yük faktörüne göre enerji ve ekserji veriminin değişimi

Aynı şekilde, termik santrallerde olduğu gibi hibrit santraller için de yük faktörünün azalmasıyla özgül yakıt tüketimi artar. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi yük faktörünün özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi ise hem termik hem de hibrit santraller için benzer olmuştur.



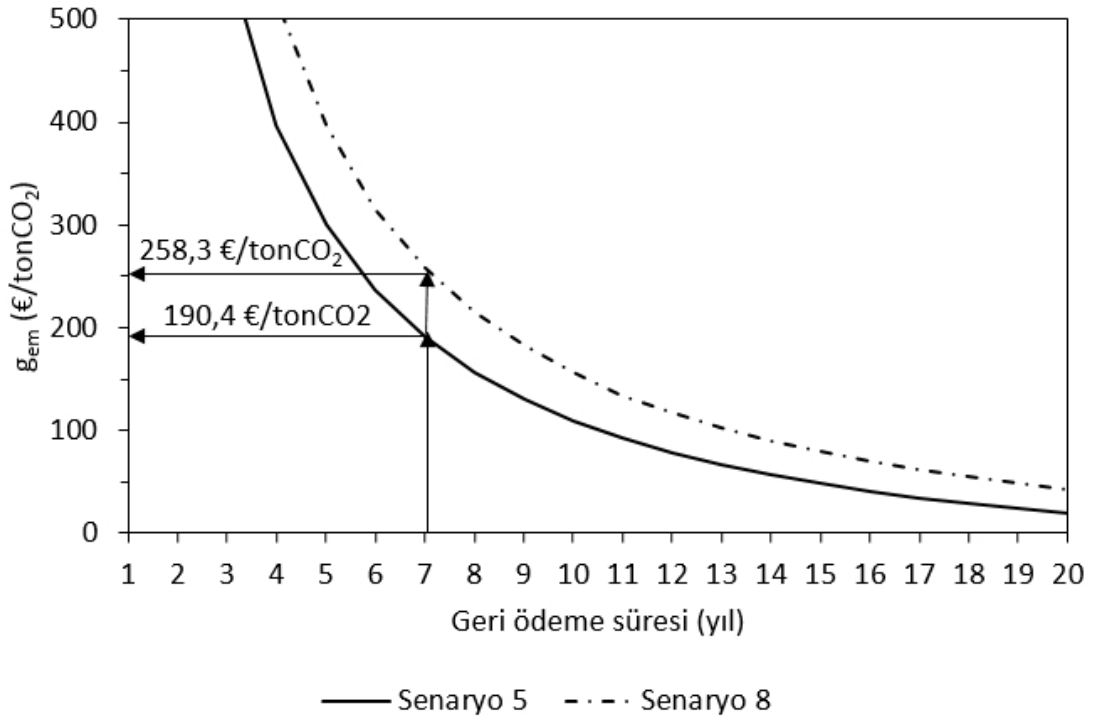
Şekil 4. 17 Yük faktörüne göre özgül yakıt tüketiminin değişimi

Bir yatırım için geri ödeme süresi, yatırım için harcanan toplam sermayenin ne kadar sürede geri alınabildiğini gösteren sayısal bir değerdir. Bir diğer ifade ile yatırımın sağlayacağı net nakit girişlerinin yatırım tutarını karşılayabilmesi için geçmesi gereken süredir [35]. Kabul edilen ekonomik parametreler ile senaryolar için geri ödeme süreleri yirmi yılın üzerinde çıkmıştır (Çizelge 4.12). Fakat iskontosuz geri ödeme süresi Senaryo 5 için 8,5 yıl, Senaryo 8 için ise 9 yıl olarak bulunmuştur. Geri ödeme süresi grafiklerinde her iki santral için en iyi tasarruf sağlayan ve gelir getiren Senaryo 5 ve Senaryo 8 gösterilmiştir. Bu çalışmada yedi yıl olarak kabul edilen geri ödeme süresinin emisyon, güneş alanı ve elektrik birim fiyatı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Geri ödeme süresinin yedi yıl olabilmesi için emisyon birim fiyatı, Senaryo 5 için 190,4 €/tonCO₂ ve Senaryo 8 için 258,3 €/tonCO₂ olmalıdır (Şekil 4.18). Benzer şekilde güneş alanı birim fiyatının Senaryo 5 için 138,9 €/m² ve Senaryo 8 için 127,1 €/m² olması durumunda geri ödeme süresi yedi yıl olacaktır (Şekil 4.19). YEKDEM kapsamında yer alan güneş enerjisine dayalı üretim tesisleri için elektrik birim fiyatı 13,3 UScent/kWh şeklindedir [57]. Bu çalışmada elektrik birim fiyatı yaklaşık olarak 0,12 €/kWh kabul edilmiştir. Geri ödeme süresi yedi yıl kabul edildiğinde elektrik birim fiyatı ise, Senaryo 5 için 0,24 €/kWh ve Senaryo 8 için 0,26 €/kWh olmalıdır (Şekil 4.20). Bu üç durum göz önüne

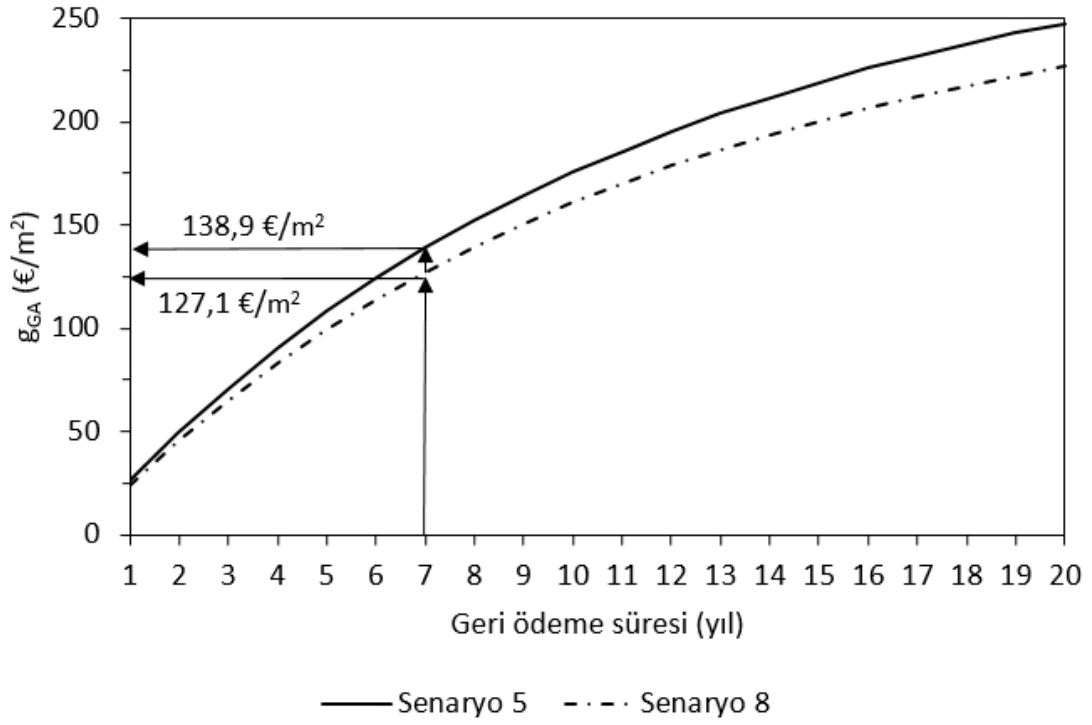
alındığında Senaryo 5, emisyon ve elektrik birim fiyatının daha az artmasını gerektirdiği ve güneş alanı birim fiyatını daha az düşürmesi gerektirdiği için Senaryo 8'den daha olumlu sonuç vermiştir.

Çizelge 4. 12 Senaryolar için geri ödeme süreleri

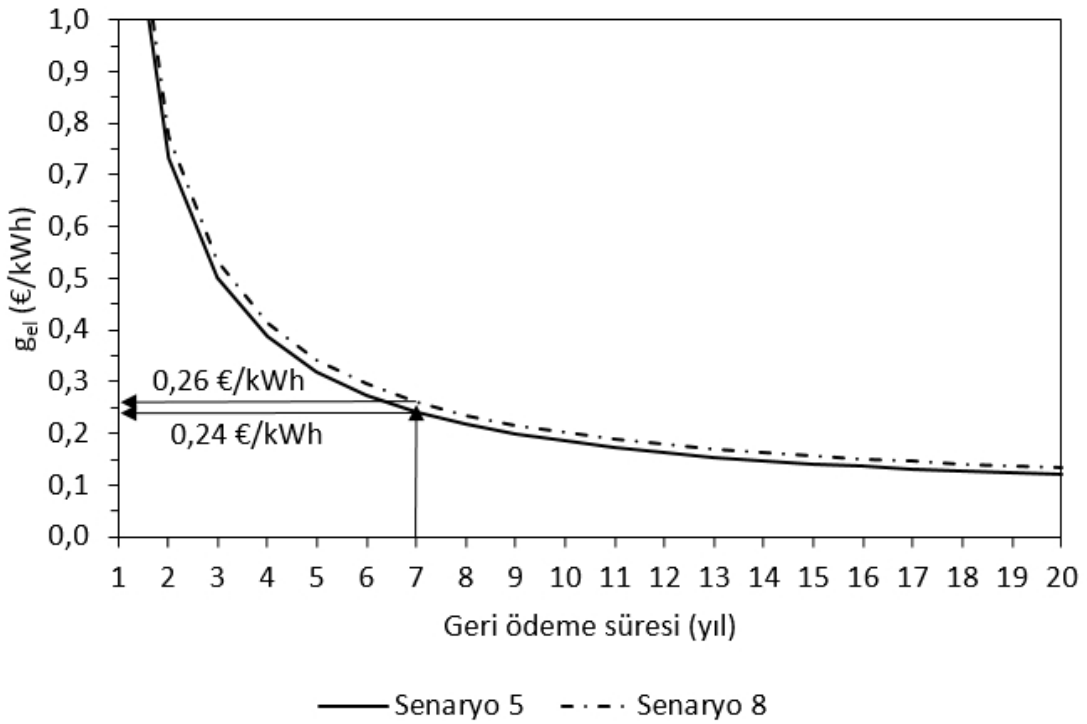
	Yük	GÖS (yıl)		Yük	GÖS (yıl)
Senaryo 1	%100	22,6	Senaryo 5	%100	20,5
	%75	27,5		%75	33,6
Senaryo 2	%100	24,6	Senaryo 6	%100	36,8
	%75	27,3		%75	50,7
Senaryo 3	%100	21,6	Senaryo 7	%100	29,0
	%75	47,6		%75	45,3
Senaryo 4	%100	20,5	Senaryo 8	%100	27,2
	%75	25,8		%75	43,1



Şekil 4. 18 Emisyon birim fiyatı ile geri ödeme süresinin değişimi



Şekil 4. 19 Güneş alanı birim fiyatı ile geri ödeme süresinin değişimi



Şekil 4. 20 YEKDEM elektrik birim fiyatı ile geri ödeme süresinin değişimi

SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemiz enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamak için ithal yakıt kullanmaktadır. Ekonomik büyüme, nüfus artışı, sanayileşme gibi enerji tüketiminin artmasına neden olan sebepler ülkemizin sahip olduğu yerli linyit ve yenilenebilir enerji kaynaklarını enerji üretmek için kullanmayı bir zaruret haline getirmiştir. Bundan dolayı ısı değeri ve kalitesi çok düşük olan yerli linyitin tüketimi çevreye zararlı emisyon gazlarının salınımının artmasına neden olacaktır. Bu durum ise ileriki yıllarda ülkemizin emisyon azaltma yükümlülüğünü yerine getirmesinde sorunlara neden olabilir. İşte linyit yakıtlı termik santral ile güneş enerjisini birleştirme fikri, her iki kaynağın birlikte kullanılarak ortaya çıkan olumsuz sonuçları azaltmak için yeni bir yol sunmaktadır.

Bu çalışmada biri Yatağan Termik Santrali diğeri Çan Termik Santrali olmak üzere iki farklı linyit yakıtlı termik santralin güneş enerjisi ile hibridize edilmesinin teknik ve ekonomik analizleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Her bir senaryo için güneş alanı büyüklüğü, referans alınan santrallerdeki ön ısıtıcılar için çekilen ara buhar debisine bağlıdır. Çekilen ara buhar debisi ile güneş alanı büyüklüğü doğru orantılıdır. Senaryo 5, 27,8 kg/s'lik ara buhar debisi ile 106.784,4 m²'lik en büyük güneş alanına sahiptir.
- Senaryo 4 ve Senaryo 8 için LFS giriş ve çıkış sıcaklıkları birbirine çok yakındır. Senaryo 4'ün güneş alanı ise Senaryo 8'den yaklaşık olarak 22.000 m² daha büyüktür. Alanlardaki bu farklılık, Senaryo 4'deki hibrit sistemden geçen besleme suyu debisinin Senaryo 8'dekinden fazla olmasının sonucudur.

- Senaryo 4 için 21 Haziran, 23 Mart ve 21 Aralık tarihlerinde özgül yakıt tüketimindeki azalma miktarları sırasıyla %5,6, %4,3, %1,5 olmuştur. Aynı azalma miktarları senaryo 8 içinde yaklaşık olarak aynıdır. Bunun nedeni her iki senaryonun da kapsadığı besleme suyu ön ısıtıcılarının çalışma sıcaklık aralıklarının aynı olmasıdır. Bu sonuçlara göre kuzey yarım kürede bulunan hibrit sistemler için en iyi çalışma şartlarının yaz aylarında sağlandığı görülmektedir.
- Hibrit santrallerde, DNI ve A_{Net} artışı ile verimler düşmekte ve özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. Senaryo 5, termik verimde %8,9'luk, ekserji veriminde %5,8'lik ve özgül yakıt tüketiminde %7,4'lük düşüş ile diğer senaryolara göre en fazla düşüş gösteren senaryodur. DNI ve A_{Net} artışının yakıt tüketiminin azalmasında olumlu bir etkisi olsa da verimler üzerinde olumsuz bir etkisi vardır.
- Senaryo 5 için %100, %75 ve %50 yüklerde termik verimdeki düşüş sırasıyla %8,9, %13,6, %22,3 olmaktadır. Aynı şekilde ekserji verimindeki düşüş ise sırasıyla %5,8, %9,0, %16,6 olmaktadır. Fakat %100, %75 ve %50 yüklerde özgül yakıt tüketimindeki azalma sırasıyla %7,4, %6,2 ve %4,7'dir. Hibrit santralin düşük yüklerde çalışması durumunda özgül yakıt tüketimindeki azalma %50 yük için %100 yüke göre %36 düşmüştür. Fakat bu düşüş verimlerde daha fazla olmuştur. Örneğin, %50 yük için termik verim %100 yüke göre %150'lik bir düşüş göstermiştir. Bu durum hibrit santrallerin düşük yüklerde çalışmasının olumsuz olduğunu göstermektedir.
- %100 yükte Senaryo 5 için tasarruflardan sağlanan gelir 3.814.618,2 €/yıl iken, Senaryo 4 için bu gelir 2.898.289,9 €/yıl olmuştur. Senaryo 5'in yatırım maliyeti ise, güneş alanı büyük olduğundan, Senaryo 4'e göre yüksektir. Fakat her iki senaryo için BDF'nin değeri aynı bulunmuştur. Böylece bu iki senaryo için tasarruflardan sağlanan gelirler farklı olmasına karşın geri ödeme süresi 20,5 yıl olmuştur.
- %75 yükte geri ödeme süresi Senaryo 5 ve Senaryo 4 için sırasıyla 33,6 ve 25,8 yıl olarak bulunmuştur. Bu geri ödeme süreleri, %100 yük geri ödeme sürelerine göre daha fazladır. Çünkü yatırım maliyeti sabit kalırken tasarruflardan sağlanan gelirlerde düşüş olmuştur. Hibrit santralin düşük yükte çalışması yatırımın geri

ödeme süresi üzerinde negatif etkiye neden olmuştur. Senaryo 5'in güneş alanı Senaryo 4'den daha büyük olduğu için bu durum Senaryo 5'i olumsuz yönde daha fazla etkilemiştir.

- Daha öncede belirtildiği gibi Senaryo 4 ve Senaryo 8 için LFS çalışma sıcaklık aralıkları birbirine çok yakındır ve güneş alanı büyüklükleri arasındaki fark besleme suyu debi miktarlarının aynı olmamasından kaynaklanır. Tasarım şartlarında her iki senaryo için net güç üretimindeki güneş enerjisinin payı ($p_{\text{güneş}}$) ise %7,6 değerindedir. Bu durum iki senaryonun tasarım açısından benzer olduğunu gösterir. Her iki senaryo da benzer olmasına karşın net güç üretimindeki güneş enerjisinin yıllık payı ($p_{\text{güneş,yıl}}$) Senaryo 4 ve Senaryo 8 için sırasıyla %1,04 ve %0,94'tür. Geri ödeme süreleri ise Senaryo 4 için 20,5 yıl, Senaryo 8 için 27,2 yıldır. Bu iki farkın nedeni YTS'nin ÇTS'den daha güneyde olmasından dolayı yıllık DNI miktarının ve yıllık güneşlenme süresinin daha fazla olmasıdır.
- Tüm senaryolar için geri ödeme süreleri 20 yılın üzerinde çıkmıştır. Geri ödeme süresinin 7 yıl olabilmesi, en iyi senaryo olan Senaryo 5 için dahi YEKDEM elektrik birim fiyatının 2 kat ve emisyon birim fiyatının ise yaklaşık 10 kat artmasını gerektirir. Güneş alanı birim fiyatının 120 ile 140 €/m² arasında olması durumunda ise tüm senaryolar için 7 yıllık geri ödeme süresi sağlanabilir.

Yapılan çalışmalara göre (gelişen teknoloji ile birlikte yeni malzemelerin geliştirilmesi, yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğinin artırılması gibi) güneş alanı birim fiyatının 2025 yılında 100-160 €/m² arasında olacağı tahmin edilmektedir [59]. Sonuç olarak, bu tahminler gerçekleşir ve YEKDEM kapsamındaki elektrik birim fiyat desteği devam ederse, gelecek yıllarda yatırımların geri ödeme süreleri istenilen seviyeye düşeceğinden ülkemiz için bu sistemlerin kullanımının önü açılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Jin, H.G. ve Hong, H., (2012). "Hybridization of Concentrating Solar Power (CSP) with Fossil Fuel Power Plants", 395-436; Derleyen: Lovegrove, K. ve Stein, W. (2012). Concentrating Solar Power Technology Principles, Developments and Applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [2] Yang, Y., Cui, Y., Hou, H., Guo, X., Yang, Z. ve Wang, N., (2008). "Research on Solar Aided Coal-Fired Power Generation System and Performance Analysis", Science in China Series E-Technological Sciences, 51 (8): 1211-1221.
- [3] Gupta, M.K. ve Kaushik, S.C., (2009). "Exergetic Utilization of Solar Energy for Feed Water Preheating in a Conventional Thermal Power Plant", International Journal of Energy Research, 33 (6): 593-604.
- [4] Hou, H., Mao, J., Yang, Y. ve Luo, N., (2012). "Solar-Coal Hybrid Thermal Power Generation-an Efficient Way to Use Solar Energy in China", International Journal of Energy Engineering, 2 (4): 137-142.
- [5] Hong, H., Peng, S., Zhao, Y., Liu, Q. ve Jin, H., (2014). "A Typical Solar-Coal Hybrid Power Plant in China", Energy Procedia, 49: 1777-1783.
- [6] Zhao, Y., Hong, H. ve Jin, H., (2016). "Economic Analysis of a Typical Solar-Coal Hybrid Power Plant", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 38 (12): 1798-1804.
- [7] Suresh, M.V.J.J., Reddy, K.S. ve Kolar, A.K., (2010). "4-E (Energy, Exergy, Environment, and Economic) Analysis of Solar Thermal Aided Coal-Fired Power Plants", Energy for Sustainable Development, 14 (4): 267-279.
- [8] Popov, D., (2011). "An Option for Solar Thermal Repowering of Fossil Fuel Fired Power Plants", Solar Energy, 85 (2): 344-349.
- [9] Zhao, H. ve Bai, Y., (2014). "Thermodynamic Performance Analysis of the Coal-Fired Power Plant with Solar Thermal Utilizations", International Journal of Energy Research, 38 (11): 1446-1456.
- [10] Yang, Y., Yan, Q., Zhai, R., Kouzani, A. ve Hu, E., (2011). "An Efficient Way to Use Medium-or-low Temperature Solar Heat for Power Generation-Integration into Conventional Power Plant", Applied Thermal Engineering, 31 (2-3): 157-162.

- [11] Yan, Q., Hu, E., Yang, Y. ve Zhai, R., (2011). "Evaluation of Solar Aided Thermal Power Generation with Various Power Plants", *International Journal of Energy Research*, 35 (10): 909-922.
- [12] Zhai, R., Zhu, Y., Yang, Y., Tan, K. ve Hu, E., (2013). "Exergetic and Parametric Study of a Solar Aided Coal-Fired Power Plant", *Entropy*, 15 (3): 1014-1034.
- [13] Zhao, Y., Hong, H. ve Jin, H., (2014). "Evaluation Criteria for Enhanced Solar-Coal Hybrid Power Plant Performance", *Applied Thermal Engineering*, 73 (1): 577-587.
- [14] Feng, L., Chen, H., Zhou, Y., Zhang, S., Yang, T. ve An, L., (2016). "The Development of a Thermo-Economic Evaluation Method for Solar Aided Power Generation", *Energy Conversion and Management*, 116: 112-119.
- [15] Hou, H., Wang, M., Yang, Y., Chen, S. ve Hu, E., (2016). "Performance Analysis of a Solar-Aided Power Generation (SAPG) Plant Using Specific Consumption Theory, *Science China Technological Sciences*, 59 (2): 322-329.
- [16] Ahmadi, G., Toghraie, D. ve Akbari, O.A., (2017). "Solar Parallel Feed Water Heating Repowering of a Steam Power Plant: A Case Study in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77: 474-485.
- [17] Zhai, R., Liu, H., Li, C., Zhao, M., ve Yang, Y., (2016). "Analysis of a Solar-Aided Coal-Fired Power Generation System Based on Thermo-Economic Structural Theory, *Energy*, 102: 375-387.
- [18] Peterseim, J.H., White, S., Tadros, A., ve Hellwig, U., (2013). "Concentrated Solar Power Hybrid Plants, Which Technologies Are Best Suited for Hybridisation?", *Renewable Energy*, 57: 520-532.
- [19] Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., (2008). *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, Beşinci Baskı, Güven Bilimsel, İzmir.
- [20] Yerebakan, M., (2010). *Güneş Kollektörü Uygulamaları*, 2010-22, İstanbul Ticaret Odası Yayınları, İstanbul.
- [21] Çetin, B., (2014). "An Economic Model for the Revamping of a Pulverized Coal-Fired Boiler", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 9 (3): 307-313.
- [22] Gökırmak, H., (2017). "The Energy Policies for a Sustainable Economic Growth in Turkey", *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7 (1): 55-61.
- [23] Çetin, B. ve Abacıoğlu, M., (2013). "Economic Analysis for Rebuilding of an Aged Pulverized Coal-Fired Boiler with a New Boiler in an Aged Thermal Power Plant", *Advances in Mechanical Engineering*, 5: 1-6.
- [24] Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ), (Mayıs 2018). *2017 Elektrik Üretim Sektör Raporu*, Ankara.
- [25] Erdem, H.H., Dağdaş, A., Sevilgen, S.H., Çetin, B., Akkaya, A.V., Şahin, B., Teke, İ., Güngör, C. ve Ataş, S., (2010). "Thermodynamic Analysis of an Existing Coal-Fired Power Plant for District Heating/Cooling Application", *Applied Thermal Engineering*, 30 (2): 181-187.

- [26] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), (Kasım 2017). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2015-2019 Stratejik Planı, Ankara.
- [27] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), (2018). Elektrik Piyasası 2017 Yılı Piyasa Gelişim Raporu, Ankara.
- [28] Toptaş, M., (2015). "Turkey's Energy Demand, Production and Policies", International Journal of Energy Economics and Policy, 5 (2): 631-638.
- [29] Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ), (Mayıs 2017). 2016 Yılı Kömür (Linyit) Sektör Raporu, Ankara.
- [30] Erdem, H.H., Sevilgen, S.H., Akkaya, A.V. ve Çetin, B. (2007). "Emission Assessment for Cogeneration Systems", Energy Sources Part B: Economics, Planning, and Policy, 2 (3): 267-275.
- [31] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), (13 Nisan 2018). Haber Bülteni, Sayı: 27675, Ankara.
- [32] International Energy Agency (IEA), (2016). Energy Policies of IEA Countries Turkey 2016 Review, France.
- [33] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı (ÇOB), (Ocak 2011). Karbon Piyasalarında Ulusal Deneyim ve Geleceğe Bakış, Ankara.
- [34] Breeze, P., (2016). Solar Power Generation, First Edition, Academic Press, London.
- [35] Kalogirou, S.A., (2014). Solar Energy Engineering Processes and Systems, Second Edition, Academic Press, Oxford.
- [36] Şentürk, A.E., (2013). Bir Entegre Güneş Kombine Çevrim Santrali Fizibilite Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [37] International Renewable Energy Agency (IRENA), (2012). Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series Concentrating Solar Power, Volume:1 Issue 2/5, Abu Dhabi.
- [38] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, www.ygm.gov.tr, 1 Mart 2018.
- [39] National Renewable Energy Laboratory, Concentrating Solar Power Projects, www.nrel.gov, 9 Mart 2018.
- [40] Çoban, A., (2011). Yatağan Termik Santralinde Bölgesel Isıtmada Santral İçi Dönüşüm Sistemlerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- [41] Oktay, Z., (2009). "Investigation of Coal-Fired Power Plants in Turkey and a Case Study: Can plant", Applied Thermal Engineering, 29 (2-3): 550-557.
- [42] Zhao, Y., Hong, H. ve Jin, H., (2017). "Optimization of The Solar Field Size for The Solar-Coal Hybrid System", Applied Energy, 185 (2): 1162-1172.
- [43] STEAG Energy Services GmbH. Epsilon Professional, 2017.

- [44] Erdem, H.H., Akkaya, A.V., Çetin, B., Dağdaş, A., Sevilgen, S.H., Şahin, B., Teke, İ., Güngör, C. ve Ataş, S., (2009). "Comparative Energetic and Exergetic Performance Analyses for Coal-Fired Thermal Power Plants in Turkey", *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (11): 2179-2186.
- [45] Telli, Z.K., (1998). *Yakıtlar ve Yanma*, Üçüncü Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [46] Kaushik, S.C. ve Singh, O.K., (2014). "Estimation of Chemical Exergy of Solid, Liquid and Gaseous Fuels Used in Thermal Power Plants, *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 115 (1): 903-908.
- [47] Özen, E., (2017). *Ultra Süper Kritik Termik Santrallerin Termodinamik ve Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- [48] Ehsan, A. ve Yilmazoğlu, M.Z., (2011). "Design and Exergy Analysis of a Thermal Power Plant Using Different Types of Turkish Lignite, *International Journal of Thermodynamics*, 14 (3): 125-133.
- [49] Mills, D.R., (2012). "Linear Fresnel Reflector (LFR) Technology", 153-196; Derleyen: Lovegrove, K. ve Stein, W. (2012). *Concentrating Solar Power Technology Principles, Developments and Applications*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [50] Novatec Solar, NOVA-1 Technical Data, www.novatecsolar.com, 6 Nisan 2018.
- [51] Zhai, R., Peng, P., Yang, Y. ve Zhao, M., (2014). "Optimization Study of Integration Strategies in Solar Aided Coal-Fired Power Generation System", *Renewable Energy*, 68: 80-86.
- [52] European Commission Joint Research Centre Photovoltaic Geographical Information System, Typical Meteorological Year, re.jrc.ec.europa.eu, 6 Nisan 2018.
- [53] Schenk, H., Hirsch, T., Feldhoff, J.F. ve Wittmann, M., (2014). "Energetic Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector Systems", *Journal of Solar Energy Engineering*, 136 (4): 1-11.
- [54] Giostri, A., Binotti, M., Silva, P., Macchi, E. ve Manzolini, G., (2011). "Comparison of Two Linear Collectors in Solar Thermal Plants: Parabolic Trough vs Fresnel", *Proceeding of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, 7-10 Ağustos 2011, Washington.
- [55] Morin, G., Lerchenmüller, H., Mertins, M., Ewert, M., Fruth, M., Bockamp, S., Griestop, T. ve Haberle, A., (2004). "Plug-in Strategy for Market Introduction of Fresnel-Collectors", *12th SolarPACES Conference*, Kasım 2004, Oaxaca-Mexico.
- [56] European Energy Exchange, Environmental Markets, www.eex.com, 9 Ağustos 2018.
- [57] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM), www.epdk.org.tr, 9 Ağustos 2018.
- [58] Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası, Döviz Ticari Kredi Faiz Oranları, www.tcmb.gov.tr, 9 Ağustos 2018.

- [59] Greenpeace International, European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA), SolarPACES, (2016). Solar Thermal Electricity Global Outlook 2016, Amsterdam, Brussels, Tabernas.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hakan AVCI
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.04.1988, Samsun
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : avcihakan1@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Fen Bilimleri	Samsun Huriye Süer Anadolu Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016 - 2017	ASK Mekanik Mühendislik	Proje Mühendisi
2014 - 2016	Mek Proje Mühendislik	Proje Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Çetin, B., Avcı, H., (2018). “Güneş Destekli Hibrit Bir Güç Santralının Termodinamik Analizi”, III. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi, 21-22 Haziran 2018, Gaziantep.

