T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KÖMÜR GÜÇ SANTRALİNİN ENERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ: TÜRKİYE VE NİJER ÖRNEĞİ

Hazırlayan
Seyni YOUNOUSSİ SAİDOU

Danışman
Prof. Dr. Gamze GENÇ

Doktora Tezi

Şubat 2024
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KÖMÜR GÜÇ SANTRALİNİN ENERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ: TÜRKİYE VE NİJER ÖRNEĞİ

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Seyni YOUNOUSSİ SAİDOU

Danışman
Prof. Dr. Gamze GENÇ

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2019-9440 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Şubat 2024
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı Soyadı : Seyni YOUNOUSSİ SAİDOU

İmza :

"Güneş Enerjisi Destekli Kömür Güç Santralinin Enerji, Ekonomik Ve Çevresel Analizi: Türkiye ve Nijer Örneği" adlı Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi 'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	**Danışman**
Seyni YOUNOUSSİ SAİDOU	Prof. Dr. Gamze GENÇ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca her türlü desteğini esirgemeyen, her durumda bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren ve tez çalışmamın sonuçlandırmasında çok büyük katkıları olan danışmanım kıymetli hocam Prof. Dr. Gamze GENÇ'e sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca, Tez İzleme Komitemde yer alıp çalışmalarımda yol gösteren hocalarım Doç. Dr. Gülşah ELDEN ve Dr. Öğretim Üyesi S. Buğra SELÇUKLU'ya teşekkür ederim.

Enerji sistemleri mühendisliğinde eğitime ve akademik çalışmalarıma katkıda bulunan bütün hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmayı maddi olarak destekleyen Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje Kodu: FDK-2019-9440) teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim boyunca bana doğrudan veya dolaylıdan yardımcı olan Türkiye Devleti olmak üzere herkese en derin şükranlarımı sunarım. Sürekli teşvikleriniz, tavsiyeleriniz ve destekleriniz benim için paha biçilmez bir ilham ve motivasyon kaynağı oldu. Allah'a şükürler olsun.

"Bu tez bana her şeyi veren ülkem Nijer'e, babam Elh.Younousi Saidou'ya, annem Hamsa Idé'ye, eşim Djamila'ya, kızım Kasseye'ye, danışmanım Prof. Dr Gamze GENÇ'e ve kardeşim Habibou'ya ithaf ediyorum".

Seyni YOUNOUSSİ SAİDOU

Şubat 2024, KAYSERİ

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KÖMÜR GÜÇ SANTRALİNİN ENERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ: TÜRKİYE VE NİJER ÖRNEĞİ

Seyni YOUNOUSSİ SAİDOU
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Şubat 2024
Danışman: Prof. Dr. Gamze GENÇ

ÖZET

Sunulan tez çalışmasında, güneş destekli kömür yakıtlı bir güç santralinin tekno-ekonomik uygulanabilirliğini belirlemek için 330 MW kapasiteli santralin enerji, ekonomik ve çevresel analizleri yapıldı. Güneş enerjisinin doğası gereği iklimin ve meteorolojik koşulların sistemin performansına etkisini araştırmak için Türkiye ve Nijer ülkelerinde hali hazırda kömür santrallerinin bulunduğu Çanakkale ve Agadez şehirleri için analizler yapılmıştır. Güneş enerjisini toplamak için parabolik oluklu güneş kolektörlerinin olduğu güneş alanı kömür santraline entegre edilmiştir. Ele alınan sistemde güneş enerjisi kazandan önce, ilk yüksek basınçlı besleme suyu ısıtıcısından hemen sonra güneş enerjisi ön ısıtıcısı aracılığıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada besleme suyu ısıtıcısının yer değiştirmesi olmadığından tesisin tamamen yakıt tasarrufu modunda çalışacağını belirtmek gerekir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre Türkiye ve Nijer'de güneşten elde edilen enerji üretimi sırasıyla 168 ve 208 GWh olmuştur ve bu değerlere karşılık yıllık elektrik üretimindeki ortalama payları yaklaşık %12 ve 15'tir. Güneşten elde edilen enerjinin sayesinde yıllık kömür tüketiminde Çanakkale'de 107.8 kton ve Agadez'de 135.7 kton tasarruf sağlanmıştır ve bunun sonucunda engellenen CO_2 salınım miktarları ise 303 ve 381 kton olmuştur. Ayrıca hibrit sistemde güneş enerjisinden enerji üretim birim maliyeti ise Çanakkale için 0.065 $/kWh iken Agadez için 0.0357 $/kWh'dır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar güneş destekli kömür yakıtlı güç santrallerinin kömür tüketiminin ve CO_2 emisyonlarının azaltılmasında büyük avantajlar sağladığı ve daha sürdürülebilir bir gelecek için temiz enerjinin sağlanmasındaki cazip bir seçenektir.

Anahtar Kelimeler: Güneş Destekli Kömür Yakıtlı Güç Santrali, Termal Güneş Enerjisi, Enerji, CO_2 Emisyonu, Kademelendirilmiş Maliyet Analizi, Sürdürülebilirlik.

ENERGY, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF SOLAR-AIDED COAL-FIRED POWER PLANT: THE CASE OF TURKEY AND NIGER

Seyni YOUNOUSSİ SAİDOU
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
PhD. Thesis, February 2024
Supervisor: Prof. Dr. Gamze GENÇ

ABSTRACT

In the presented thesis study, energy, economic, and environmental analyses of the 330 MW capacity power plant were carried out to determine the techno-economic feasibility of a solar-supported coal-fired power plant. To investigate the effect of climate and meteorological conditions on the performance of the system due to the nature of solar energy, analyzes were made for the cities of Çanakkale and Agadez, where coal power plants are already located in Turkey and Niger. A solar field with parabolic trough solar collectors is integrated into the coal power plant to collect solar energy. In the considered system, solar energy is used before the boiler, through the solar preheater immediately after the first high-pressure feed water heater. It should be noted that since there is no displacement of the feed water heater in this study, the plant will operate completely in fuel-saving mode. According to the results obtained from the study, the energy production from solar energy in Turkey and Niger was 168 and 208 GWh, respectively, and their average shares in annual electricity production are approximately 12 and 15%. Resulting of the energy obtained from the sun, 107.8 ktons of annual coal consumption was saved in Çanakkale and 135.7 ktons in Agadez, and as a result, the prevented CO_2 emissions were 303 and 381 ktons. In addition, the levelized cost of energy production from solar energy in the hybrid system is 0.065 $/kWh for Çanakkale and 0.0357 $/kWh for Agadez. The results obtained from the study bring out that solar-aided coal-fired power plants provide great advantages in reducing coal consumption and CO_2 emissions and are an attractive option for providing clean energy for a more sustainable future.

Keywords: Solar-aided Coal-fired Power Plant, Solar Thermal Energy, Energy, CO_2 Emission, Levelized Cost Analysis, Sustainability.

İÇİNDEKİLER

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KÖMÜR GÜÇ SANTRALİNİN ENERJİ, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ: TÜRKİYE VE NİJER ÖRNEĞİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ..... İİ
TEŞEKKÜR V
ÖZET ..... Vİ
ABSTRACT ..... Vİİ
İÇİNDEKİLER ..... Viİİ
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ ..... Xİİ
TABLOLAR LİSTESİ ..... XİV
ŞEKİLLER LİSTESİ XV
GİRİŞ 1

1. BÖLÜM
GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş 4
1.2. Dünya'da Elektrik Üretimi 6
1.3. Türkiye'de Elektrik Üretimi 8
1.4. Nijer'de Elektrik Üretimi 9
1.5. Kömür Yakıtlı Güç Santralleri (Termik Santraller) 10
1.6. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Sistemleri 13
1.7. Hibrit Enerji Santralleri 15
1.8. Güneş Enerjisi Destekli Kömür Yakıtlı Güç Santralleri 15

2. BÖLÜM
GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KÖMÜR YAKITLI GÜÇ SANTRALLERİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi 17
2.2. Tez Çalışmasının Katkısı 25

3. BÖLÜM
GÜNEŞ ALANI MATEMATİKSEL MODELİ

3.1. Parabolik Güneş Kolektörünün Temel Bileşenleri 26
3.2. Güneş Alanının Sayısal Modellenmesi 28
3.3. Güneş Alanının Matematiksel Modeli 29
3.3.1. Absorbe edilen güneş ışınım miktarının hesaplanması 29
3.3.2. Günel alanındaki ısı kayıplarının hesaplanması 35
3.3.3. Güneşten ısı transfer akışkanına aktarılan faydalı enerjinin hesaplanması 36

4. BÖLÜM
GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KÖMÜR YAKITLI GÜÇ SANTRALİ VE HESAPLAMA MODELİ

4.1. Seçilen Bölgelerin Coğrafi Bilgileri 38
4.2. Güneş Potansiyellerinin Değerlendirilmesi 39
4.2.1. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli 39
4.2.2. Nijer'in güneş enerjisi potansiyeli 40
4.2.3. %100 Kömür Yakıtlı Güç Santrali 42
4.2.4. Güneş Enerjisi Destekli Kömür Yakıtlı Güç Santrali 46
4.2.5. Güneş alanının boyutlandırılması 48
4.3. Sistem Modellenmesi 49
4.4. Sistemin Performans Değerlendirmesi 50
4.4.1. Enerji performansının değerlendirilmesi 51
4.4.2. Ekonomik performansının değerlendirilmesi 53
4.4.3. Çevresel performansının değerlendirilmesi 55

5. BÖLÜM
SAYISAL SONUÇLAR

5.1. Duyarlık Analizi 57
5.2. Sistemin Performansının Aylara Göre Değişimi 58

6. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar....71
6.2. Öneriler....73
KAYNAKÇA....74
ÖZGEÇMİŞ....80

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$A_{net\ kol}$	Güneş Kollektör Açlık Alanı, m^2
BSI	Besleme Suyu Isıtıcı
CRF	Yatırım Geri Kazanım Faktörü
DNI	Doğrudan Normal Işınım, W/m^2
E	Zaman Düzeltme Faktörü, dakika
$E_{güneş}$	Güneş Enerjisi Üretimi, kWh
E_{GDKGS}	Güneş Destekli Kömür Santralinin Enerji Üretimi, kWh
$EX_{kömür}$	Kömürün ekserji miktarı, kW
$EX_{güneş}$	Güneş enerjisin ekserji miktarı, kW
f	Odak Hat Uzunluğu, m
$f_{uçkaybi}$	Alıcı Elemanın Uçlarından Kaynaklanan Kayıp Faktörü
$f_{sıra,golge}$	Paralel Kollektör Sıralarının Karşılıklı Gölgelenme Faktörü
$f_{temizlik}$	Güneş Kollektör Temizlik Faktörü
$h_{BS,çıkan}$	Güneş besleme suyu ısıtıcısından çıkan besleme suyu entalpisi, kJ/kg
$h_{BS,giren}$	Güneş besleme suyu ısıtıcısına giren besleme suyu entalpisi, kJ/kg
$GDKGS$	Güneş Destekli Kömür Güç Santrali
GS	Güneş Saati, h
IAM	Geliş Açısı Değiştirici Faktörü
ITA	Isı Transfer Akışkanı
I_{gelir}	İlk Yılın Sonunda Beklenen Gelir, $
I_{yg}	Yatırımın Geri Ödeme Süresi, yıl
L_{bosluk}	Kollektörler Sıralarının Arasındaki Boşluğun Genişliği, m
L_{GKA}	Güneş Kollektörü Modül Uzunluğu, m
L_{st}	Yerel Saat Dilimi için Standart Boylamı, Açısal Derece (°)
$LCOE$	Kademelendirilmiş Enerji Maliyeti, $/kWh
m_{BS}	Kazan besleme suyu kütlesel akış hızı, kg/s
m_{ITA}	Isı Transfer Akışkanının Kütlesel Debisi, kg/s

m_{CO2}	Karbondioksit emisyon mikatarı, ton
$m_{kömür}$	Kömürün kütlesel debisi, kg/s
MS	Memleket Saati (Yerel saat), h
N_{GKA}	Parabolik güneş kollektör sayısı
$NCV_{kömür}$	Kömürün net ısıl değeri, kJ/kg
PGK	Parabolik Güneş Kollektör
$P_{güneş}$	Güneşten Anlık Güç Üretimi, kW
P_{GDKGS}	Güneş Destekli Kömür Santralinin Güç Çıkışı, kW
Q_{abs}	Absorbe edilen ısı miktarı, kW
$Q_{güneş}$	Kazan besleme suyu tarafından güneşten kazanılan faydalı ısı, kW
Q_{kazan}	Kazanın ısı yükü, kW
$Q_{isikaybi}$	Toplam ısı Kaybı, kW
$Q_{isikaybi,alıcı}$	Alıcı ısı kaybı, kW
$Q_{isikaybi,boru}$	Boru hat sisteminden ısı kaybı, kW
Q_u	Faydalı güneş enerjisi, kW
T_f	Ortalama güneş alanın sıcaklığı, °C
$T_{f,çıkış}$	Isı transfer akışkanın güneş kollektör çıkışındaki sıcaklığı, °C
$T_{f,giriş}$	Isı transfer akışkanın güneş kollektör girişindeki sıcaklığı, °C
T_{cevre}	Çevre Sıcaklığı, °C
ω	Saat Açısı, °
W_{eff}	Etkin Güneş Kollektör Eni (Gölgeli Kısmı), m
W	Güneş Kollektör Eni, m
YGS	Yoğunlaştırılmış Güneş Sistemleri
ΔT	Sıcaklık farkı, °C
$\Delta h_{gunesalanı}$	Isı Transfer Akışkanının Entalpi Değişimi, kJ/kg
Δm_{yt}	Tasarruf edilen yakıt miktarı, ton
α_c	Alıcı yüzey kaplamasının soğuruculuk faktörü
δ	Deklinasyon açısı, açısal derece (°)
$\varepsilon_{\mathrm{cl}}$	Temiz ayna yansıması faktörü

η_{opt}	Güneş alanın optik verimi
η_{nom}	Güneş kollektör tepe optik verimi
η_{GA}	Güneş alanının termal verimi
η_{kazan}	Kazan verimi
η_{DKGS}	Güneş destekli kömür santralinin termal verimi
$\eta_{güneş-payı}$	Güneş destekli kömür santralinin güç çıkışındaki güneş payı
$\eta_{güneş}$	Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülme verimi
$\eta_{ex,\mathrm{GDKGS}}$	Güneş destekli kömür santralinin ekserji verimi
ρ_{ITA}	Isı transfer akışkanının yoğunluğu, kg/m^3
θ	Geliş açısı, açısal derece, °
θ_z	Zenit açısı, açısal derece, °
ϕ	Enlem derecesi, açısal derece, °
τ	Alıcı cam zarfın geçirgenlik faktörü

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimindeki payları 6
Tablo 1.2 Nijer'in mevcut enerji kaynakları, rezervleri ve santral durumu 10
Tablo 3.1. Vakum yalıtımlı alıcı teknolojisi PTR 70 2008 için ısı kayıp katsayıları 35
Tablo 4.1. Kömür santralin ana parametreleri 45
Tablo 4.2. Kömür santralin tüm akış parametreleri 45
Tablo 4.3 Kollektörün optik parametreleri 46
Tablo 4.4. Meteorolojik dizayn parametreleri 48
Tablo 4.5. Güneş alan özellikleri 49
Tablo 4.6. Bu çalışmada kullanılan kömür özellikleri 53
Tablo 4.7. Güneş alanının yatırım maliyet verileri 55
Tablo 5.1. Çanakkale için birkaç ekonomik performans değerleri 69
Tablo 5.2. Agadez için yıl ortalama ekonomik performans değerleri 69
Tablo 6.1. Elektrik fiyatları karşılaştırması (Çanakkale Örneği) 72
Tablo 6.2. Elektrik fiyatları karşılaştırması (Agadez Örneği) 72
Tablo 6.3. Çalışmada elde edilen önemli parametrelerin değerleri 73

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yıllara ve kaynaklara göre elektrik üretim değişimi.....7
Şekil 1.2. Enerji kaynaklarına göre karbondioksit (CO_2) emisyonları.....8
Şekil 1.3. Bölgelere göre karbondioksit (CO_2) emisyonları.....8
Şekil 1.4. Türkiye'de Şubat 2024 itibariyle kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı 9
Şekil 1.5. 2021 yılı Nijer'de üretilen toplam elektriğin kaynaklara göre dağılımı 10
Şekil 1. 6. Örnek bir termik santralin şematik görünümü 11
Şekil 1.7. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinin çeşitleri 14
Şekil 1.8. Güneş enerjisi destekli kömür yakıtlı güç santralinin şematik görünümü.....16
Şekil 2.1. Basitleştirilmiş güneş-kömür hibrit enerji santralinin şematik diyagramı.....18
Şekil 2.2. THERMOFLEX yazılımında santral diyagramı.....19
Şekil 2. 3. Güneş kulesi destekli kömür yakıtlı güç sistemi diyagramı 20
Şekil 2.4. Güneş enerjisi destekli kömür santralinin farklı şemaları.....23
Şekil 2. 5. Bir kömür santralini güneş kulesi ile birleştiren önerilen hibrit santrali 24
Şekil 3.1. Parabolik güneş kolektörleri 26
Şekil 3.2. Parabolik güneş kolektörü yansıtıcısı ve alıcıları 27
Şekil 3.3. Parabolik güneş kolektörü alıcısı 27
Şekil 3.4. Güneş alanı modelinin bilgi akış şeması.....28
Şekil 3.5. 21 Aralık'ta gün boyunca DNI değişimi 30
Şekil 3.6. PGK üzerindeki geliş açısı.....31
Şekil 3.7. Deklinasyon açısının mevsimlere göre değişimi 32
Şekil 3.8. Kollektör üzerinde uç kayıp detayı.....34
Şekil 3.9. Kollektörler arası gölgelemenin gün içindeki değişimi.....34
Şekil 4.1. Türkiye'de güneş ışınım yoğunluğu 40
Şekil 4.2. Nijer'de güneş ışınım yoğunluğu.....40
Şekil 4.3. Çanakkale ve Agadez için DNI ve $T_{çevre}$'nin aylara göre değişimi 41
Şekil 4.4. Güneşlenme süresi ve gün uzunluğunun aylara göre değişimi.....42
Şekil 4.5. %100 kömür yakıtlı referans kömür santrali 44
Şekil 4.6. Güneş-destekli kömür yakıtlı güç santralinin şematik görünümü 47
Şekil 4.7. Kollektör sayısına göre besleme suyu sıcaklığın değişimi 49

Şekil 5.1. DNI'ya göre sistemin tepkisi 58
Şekil 5.2. Çanakkale için seçilen tarihlerde sistem parametrelerin anlık değişimi 60
Şekil 5.3. Agadez için seçilen tarihlerde sistem parametrelerin anlık değişimi 61
Şekil 5.4. Güneşten elde edilen enerji ve gücün aylara göre değişimi 62
Şekil 5.5. Kazan termik yükünün aylara göre değişimi 63
Şekil 5.6. Aylara göre güneş sistem ve GDKGS'nin ısıl verimlerinin değişimi 64
Şekil 5.7. Aylara göre güneş payının değişimi 64
Şekil 5.8. Aylara göre ekserji yıkımının dağlımı 65
Şekil 5. 9 a. Yakıt tüketimi, b. CO2 salınım miktarı (Çanakkale için) 67
Şekil 5. 10 a. Yakıt tüketimi, b. CO2 salınım miktarı (Agadez için) 68
Şekil 5.11. Aylara göre ekonomik performans değerlerinin değişimi 69
Şekil 5.12. Güneş sistem maliyetinin yıllara göre gelişimi 70

GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyıllarda insanoğlunun enerji ihtiyacının büyük kısmı biyokütleden karşılanıyordu. Günümüzde dünya enerji ihtiyacı büyük ölçüde elektrik enerjisiyle karşılanmaktadır. Bu ihtiyaç nüfus artışı ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak endişe verici bir hızla artmaya devam etmekte ve doğal olarak ihtiyaca karşılık talepte artmaktadır. Artan talebi karşılamak için enerji kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan sağlandığı için bu yakıtların tüketimi de gittikçe artmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı sonucu CO2 gibi sera gazı emisyonlarının yanı sıra bazı zehirli gazlarında (NOx, kükürt dioksit, ağır metaller ve ince parçacıklar) salınımı olmaktadır. Bu gaz emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerinde birçok olumsuz etkileri vardır. Petrol ve doğal gazın çok ötesinde, kömür en kirletici enerji kaynağıdır. Uluslararası Enerji Ajansı'na (UEA) göre, endişelere rağmen kömür kullanımı bir süre daha önemini koruyacaktır. Bu eğilime karşı, hükümetlerin ve sanayicilerin daha temiz ve çevre dostu enerji üretim teknolojilerinin daha büyük ölçekli kullanımını düşünmeleri gerekmektedir.

Daha temiz ve çevre dostu enerji üretim teknolojileri arasında yenilenebilir enerji ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında ise güneş enerjisinin özel bir yeri vardır. Aslında güneşin dünyadaki bol ve yaygın enerji kaynağı olduğu bilinen bir gerçektir. 2022 yılında güneş enerjisinin küresel elektrik üretimindeki payı %4'ü aştı ve UEA tahminlerine göre bu oran 2050 yılında %41'e ulaşacaktır. Bu enerji kaynağının büyük ölçekte kullanılması, ülkelerin enerji çeşitliğinde temiz enerjinin payının önemli ölçüde artmasına katkıda bulunabilir. Güneş enerjisi kaynakları arasında elektrik enerjisi üretiminde en yaygın kullanılan yöntem fotovoltaik güneş panellerinin kullanılmasıdır. Ancak yoğunlaştırılmış güneş sistemleri (YGS), büyük ölçekli enerji üretiminde kullanılabilecek en önemli güneş enerjisi teknolojisidir. YGS'ler son yıllarda üzerine yoğunlaşılan bir araştırma ve geliştirme konusu olmuştur. Muazzam potansiyeline rağmen, YGS, bağlı olduğu güneş ışınımının kendine özgü aralıklı doğasından dolayı sınırlıdır. Ancak bunu, termik santrallerine entegrasyon olasılığı ve teknik esnekliğine

mutlak bir engel teşkil etmemektedir. Bu sorunu çözmek için 1990 yıllarda Amerika ve Avrupa'da güneş enerjisi destekli termik güç santralleri kavramı önerildi [1]. Güneş enerjisini fosil yakıtlı güç santrallerine entegre etmenin yolları arasında, güneş enerjisini kömür güç santrallerine entegre etmek potansiyel bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu kömür tüketimini azaltmak için güneş enerjisini kullanacak bir yaklaşımdır. Ayrıca entegre sistem, 100% güneş enerjisi santrallerine kıyasla düşük maliyetli ve düşük riskli alternatifler sunmaktadır [2]. Bu entegrasyon tekniğinde, YGS ve kömür güç santrali aynı güç bloğunu kullanarak yakın etkileşime girer. Bu süreç "güneş destekli kömür güç santrali (GDKGS)" adı altında bilinmektedir ve ilk kez 1975 yılında Zoschak ve Wu tarafından önerilmiş ve incelenmiştir [3]. Ardından, bazı çalışmalar, farklı analiz yöntemleri altında, güneş enerjisi kullanılarak besleme suyunun ön ısıtılması esasına göre kömür güç santralleri ile entegrasyonunun ekonomik ve çevresel açıdan ilginç olabileceğini göstermiştir. Bu bağlamda, güneş enerjisi destekli kömür santrallerinin ekonomik olarak rolü, enerji sektörü üzerindeki etkisi ve özellikle Nijer ve Türkiye gibi stratejik konumda bulunan ülkeler üzerindeki potansiyel etkileri büyük önem taşımaktadır.

Sunulan tez çalışması, Nijer ve Türkiye'nin enerji ihtiyaçları, coğrafi konumu, iklim özellikleri ve enerji altyapısındaki mevcut durumu göz önüne alındığında, güneş enerjisi destekli kömür güç santrallerinin bu ülkelerdeki potansiyel etkilerini anlamayı amaçlamaktadır. Nijer, sahra-altı Afrika bölgesinde enerji güvenliği konusunda karşılaştığı zorluklarla mücadele ederken, Türkiye ise enerji talebinin sürekli arttığı bir bölgede konumlanmış olup enerji kaynakları çeşitlendirme stratejilerini geliştirmektedir. Bu iki ülkenin ortak yönleri ve farklılıkları, güneş destekli kömür güç santrallerinin bu bağlamdaki uygulanabilirliğini ve potansiyel katkılarını daha iyi anlamamıza olanak tanıyacaktır. Diğer yandan, bu tez çalışması doğrultusunda gerçekleştirilmiş analiz ve değerlendirmeler hem bilimsel literatüre katkı sağlamak hem de enerji sektöründeki araştırmacılara ve sanayicilere yönelik önemli öneriler sunarak sürdürülebilir enerji çözümleri üzerinde etki yaratmayı hedeflemektedir.

Bu çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde elektrik enerjisinin üretimi, kömür güç santralleri, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri, güneş enerjisi destekli kömür santralleri, Türkiye ve Nijer'in enerji üretimleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde güneş enerjisi destekli kömür güç santralleri hakkında yapılan

çalışmalarla ilgili literatür çalışması sunulmuştur. Üçüncü bölümde tez çalışması kapsamında ele alınan kömür güç santrali ve güneş enerjisi destekli kömür güç santrallerinin sistemleri açıklanarak bu sistemlerin sayısal modellemesi ve enerji, ekonomik ve çevresel analiz hesaplamaları verilmiştir. Dördüncü bölümde ise Türkiye ve Nijer için güneş potansiyelleri verilerek kömür güç santrali ve güneş enerjisi destekli kömür güç santrallerinin enerji, ekonomik ve çevresel analiz sonuçları sunulmuştur. Son olarak, beşinci bölümde çalışmadan elde edilen genel sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

1. BÖLÜM
GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnsanlık tarihinin en önemli keşiflerinden birisi olan elektrik yaşamımızın devam etmesi ve ilerlemesine katkı sağlamıştır. Elektrik gerek evlerde gerek sanayide aydınlatmadan ısınmaya, iletişimden ulaşıma kadar bir çok alanda ekipmanların çalışması için vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır. Elektrik üretiminin bazı temel noktaları ve kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

i. Ekonomik büyüme ve istihdam: Elektrik üretim sektörü bir ülkenin ekonomik büyümesine katkıda bulunabilir. Enerji yeterli ve istikrarlı miktarlarda üretildiğinde bu, endüstriyel kalkınmayı ve böylece bir ülkenin verimliliğini teşvik eder. Enerji sektörü aynı zamanda doğrudan istihdam yaratma potansiyeline de sahiptir.

ii. Aydınlatma: Elektrik, evlerde, kamusal alanlarda ve işyerlerinde aydınlatma sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu konfor ve güvenliği sağlayarak yaşam standardını artırır.

iii. İletişim ve Bilgi Teknolojileri: Elektrik enerjisi, ulaşım altyapısı, telekomünikasyon, bilgisayar, internet ve diğer iletişim teknolojileri için temel bir gereksinimdir. Bu teknolojiler günümüz toplumunun günlük yaşamını şekillendiren önemli unsurlardır.

iv. Sağlık: Sağlık sektöründe kullanılan tıbbi donanım ve teknolojilerin çalışması için elektrik şarttır. Hastaneler, laboratuvarlar ve sağlık kuruluşları elektrik enerjisine bağımlıdır.

v. Tarım ve sulama sistemleri: Elektrik enerjisi, sulama sistemlerinin işletilmesi, tarım makinelerinin çalışması ve gıda üretimi için önemlidir. Bu, tarımsal verimliliği artırabilir ve gıda güvenliğine katkıda bulunabilir.

vi. Çevresel etkilerin azaltılması: Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretmek, fosil yakıta dayalı enerji üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltarak çevresel etkileri azaltabilir ve sürdürülebilir bir enerji geleceği için önemlidir.

Teknolojinin ilerlemesi ve nüfusun artışıyla ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi ihtiyacı günden güne artmaktadır. İhtiyaç duyulan elektrik enerjisi termik santraller, hidroelektrik santraller, güneş santralleri, rüzgar santralleri ve nükleer santraller gibi tesislerde üretilerek elektrik dağıtım ve iletim hatlarıyla nihai kullanıcılara taşınır. Termik santrallerde elektriğin üretilmesi için doğal gaz, kömür ve petrol gibi yakıtların yanması sonucu açığa çıkan ısı üretiminden faydalanılırken nükleer santrallerde uranyumun parçalanması sonucu açığa çıkan ısıdan faydalanılır. Santrallerde açığa çıkan ısı önce mekanik daha sonra da jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür.

Gelişen teknolojilerle ve artan nüfusla beraber artan enerji ihtiyaçlarını karşılayacak enerji kaynaklarına sahip olmak ve enerjiyi üretebilmek, üretilen enerjinin nihai kullanıcılara en az kayıplarla kontrollü ve güvenilir şekilde taşınması ülkelerin enerji politikalarında önemlidir. Genel olarak enerji üretiminde en büyük paya sahip olan kaynaklar sırasıyla petrol, kömür ve doğalgazdır. Elektrik üretimindeki birincil enerji kaynaklarının payı ülkeden ülkeye farklılık göstermekte olup, enerji politikalarındaki gelişmeler ve yenilenebilir enerji yatırımlarına bağlı olarak değişime tabidir. Tez çalışması kapsamında Türkiye ve Nijer ülkeleri ele alındığı için aşağıda Dünya'nın yanı sıra Türkiye ve Nijer'de elektrik üretiminin enerji kaynaklarına göre değerlendirilmesi detaylı olarak verilmiştir.

1.2. Dünya'da Elektrik Üretimi

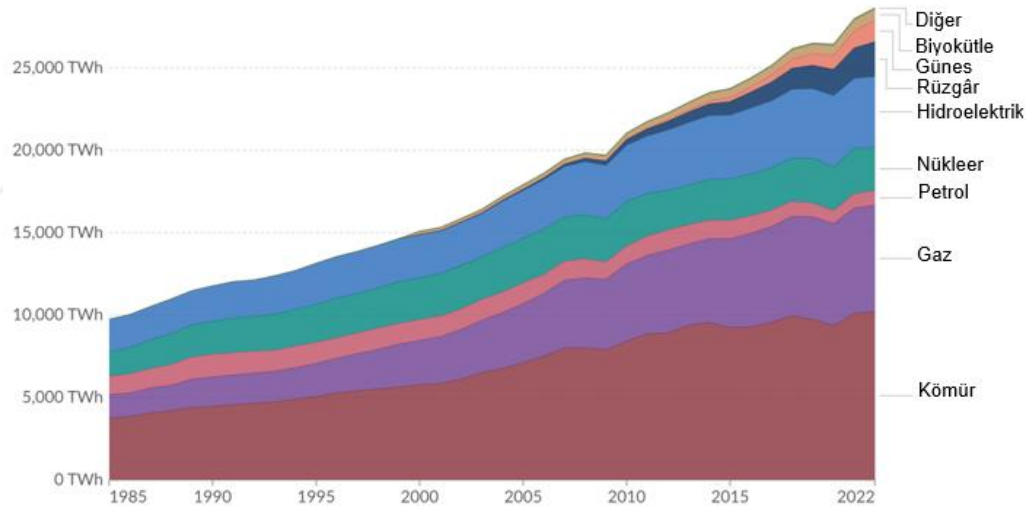
Elektrikli araçların gelişmesi, konut ısıtması, elektronik cihazlar, fabrika robotlaşması ve tabii ki dünya nüfusunun artmasından kaynaklı enerji ihtiyacını karşılamak için elektrik üretimi de her geçen yıl hızlı bir şekilde artmaktadır. 2010-2022 yılları arasında %50 artmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (UEA) 2022-2040 tahminlerine göre yüzde ise %100, yani büyümenin iki katına çıkması ve ardından 2040 ile 2050 arasında ise %25 daha artması öngörülmektedir. Dünya'da 2022 yılında farklı enerji kaynaklarından olmak üzere toplam 28510 TWh elektrik üretilmiştir [4]. Üretim pazarındaki ana kaynaklar şunlardır: Kömür, petrol, gaz, nükleer, hidroelektrik, güneş ve rüzgârdır. Ancak fosil yakıtlar bu pazara büyük ölçüde hâkimdir. Küresel elektrik üretiminde enerji kaynaklarının 2022 ve 2050 yıllarındaki payları Tablo 1.1'de gösterilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi en büyük pay %36 ile kömüre aittir. Ardından %22 ile doğalgaz gelmektedir. Tablo 1.1'de görüldüğü gibi UEA projeksiyonlarına göre 2050 yılında fosil enerjilerin payının %60'tan sıfıra düşerken yenilenebilir enerjilerin payının ise güneş termal, biyoenerji, jeotermal ve deniz enerjilerinin katkısıyla %26'dan %89'a çıkacağı düşünülmektedir.

Tablo 1.1. Enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimindeki payları

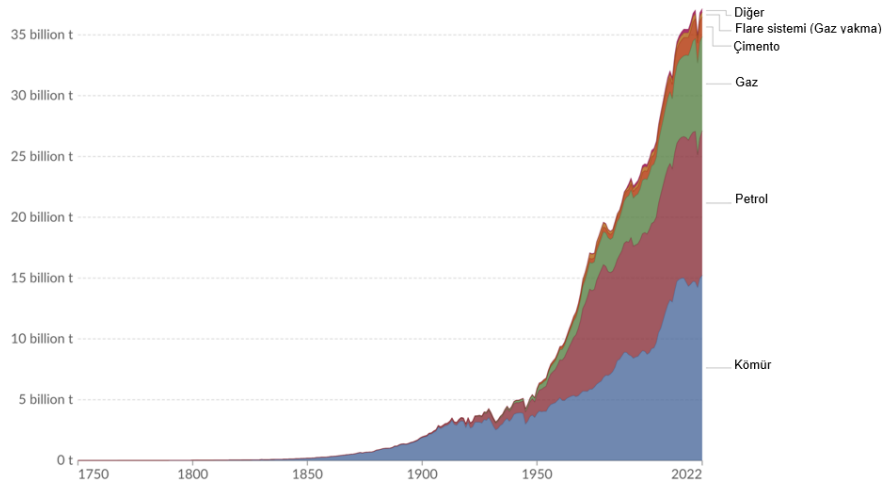
Enerji Kaynakları	**Toplamdaki payı [%]**	
	2022	**2050**
Kömür	36	0
Doğalgaz	22	0
Petrol	2	0
Nükleer	9	8
Hidroelektrik	15	11
Rüzgâr	7	31
Güneş	4	41

Şekil 1.1'de 1985'ten 2022 yılına kadar elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımını göstermektedir. Bu şekilden de küresel elektrik üretiminde her yıl en büyük payın kömürde olduğu ve kömürü doğalgazın takip ettiği görülmektedir. Elektrik üretiminde en büyük paya sahip olan fosil yakıtların kullanılması ise sera gazı emisyonu olan

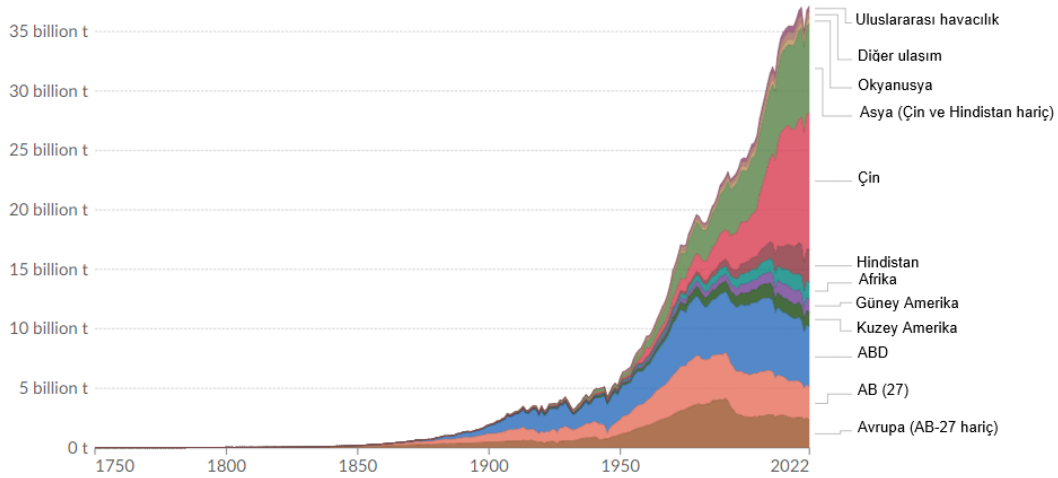
karbondioksit (CO_2) salınımına neden olur. Küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarının azaltılması için elektrik üretim sistemlerinin enerji verimliklerinin artırılması veya düşük yada sıfır emisyonlu alternatif enerji sistemlerinin geliştirilmesi üzerine her geçen gün çalışmalar artmaktadır. Bu nedenle, elektrik üretiminde çevresel kaygılardan dolayı, başta kömür olmak üzere fosil yakıtların kullanımının karbon ayak izi dikkate alınmalıdır. Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'te sırasıyla enerji kaynaklarına ve dünya bölgelerine göre 1750 yılından 2022 yılına kadar CO_2 salınımının değişimini göstermektedir [5, 6]. Enerji kaynaklarına göre değerlendirildiğinde 2022 yılındaki toplam karbon emisyonunun %73'ü kömürden kaynaklı iken %22'si doğalgazdan kaynaklıdır [5]. Bölgelere göre dağılıma bakıldığında ise Dünya'daki CO_2 salınımında en büyük paya Çin'in sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 1.1. Yıllara ve kaynaklara göre elektrik üretim değişimi



Şekil 1.2. Enerji kaynaklarına göre karbondioksit (CO_2) emisyonları

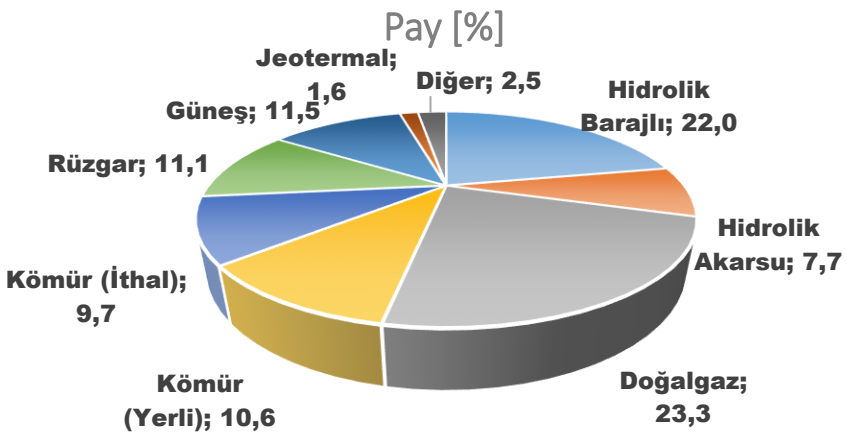


Şekil 1.3. Bölgelere göre karbondioksit (CO_2) emisyonları

1.3. Türkiye'de Elektrik Üretimi

Türkiye'de elektrikte ithalat payının azaltılması için son yıllarda artan yenilenebilir enerji yatırımları neticesinde kurulu elektrik gücü artış göstermektedir. 2024 yılı Şubat ayı sonu itibarıyla Türkiye'nin kurulu gücü 107594 MW'a olmuştur ve bu gücün kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi dağılımda en büyük pay %29.7 ile hidrolik enerjidedir. Onu %23.3 ile doğalgaz ve sonrasında %20.3 ile kömür takip etmektedir. Türkiye'de kurulu santrallerden üretilen elektriğin %36.3'ü kömürden, %21.4'ü doğal gazdan, %19.6'sı hidrolik enerjiden, %10.4'ü rüzgardan, %5.7'si güneşten,

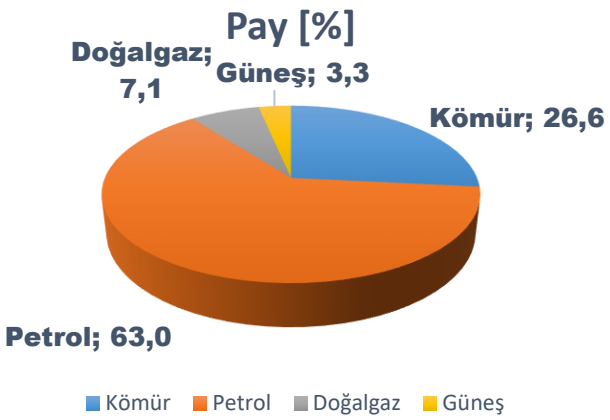
%3.4'ü jeotermal enerjiden ve %3.2'si diğer kaynaklardan olmak üzere 2023 yılında 326.3 TWh elektrik enerjisi üretilmiştir.



Şekil 1.4. Türkiye'de Şubat 2024 itibariyle kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı

1.4. Nijer'de Elektrik Üretimi

Nijer'de elektriğe erişim hâlâ bir sorun olmaya devam etmektedir ve ülke, elektrik arzının önemli bir kısmı için ithalata bağımlı durumdadır. Ülke bir petrol kaynağı merkezidir ve dünyanın en büyük on uranyum kaynağı sahibinden biridir. Nijer'de 2021 yılında üretilen toplam elektriğin kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.5'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi Nijer'deki elektrik üretimi kaynaklara göre çeşitlilik göstermemektedir. Ancak politikacıların mevcut kaynakları sadece çeşitlendirmek için değil dışa bağımlılığı da önemli ölçüde azaltmak istemeleri ile birlikte, ülkenin tüm enerji kaynaklarının (bkz. Tablo.1.2) kullanılmasıyla kısa ve orta vadede yeni bir yükseliş eğilimi gözlenmesi beklenmektedir.



Şekil 1.5. 2021 yılı Nijer'de üretilen toplam elektriğin kaynaklara göre dağılımı

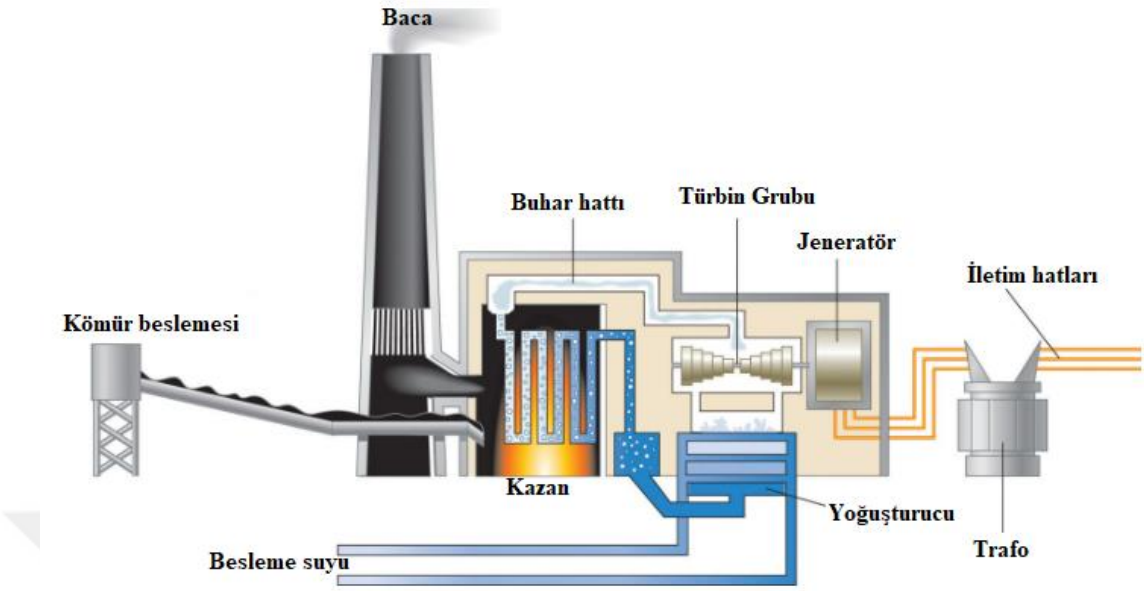
Tablo 1.2. Nijer'in mevcut enerji kaynakları, rezervleri ve santral durumu

Kaynak	**Rezervler**	**Durum**
Uranyum	450000 ton	faaliyette
Taş kömürü	90 milyon ton	faaliyette (Kısmen)
Petrol	1.18 milyar varil	faaliyette (Kısmen)
Doğalgaz	18.6 milyar m^3	Proje halinde
Hidroelektrik	280.5 MW	Proje halinde
Güneş	6 - 7 kWh/m^2-gün	faaliyette (Kısmen)
Rüzgâr	5 m/s	Proje halinde

1.5. Kömür Yakıtlı Güç Santralleri (Termik Santraller)

Yukarıda anlatıldığı gibi ülkeler elektrik üretimi amacıyla yaygın olarak kömür yakıtını kullanmaktadır. Kömür gibi fosil yakıtlardan elektrik üretimi amaçlı kullanılan santraller Termik Santral olarak isimlendirilmektedir. Bu santraller, genellikle büyük kapasiteli ve enerji yoğunluğu yüksek olmaları nedeniyle elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılır. En fazla termik santrallerin kullanımı olan ülkelerin başında %95 ile Hollanda gelmektedir ve Hollanda'yı %76 ile İngiltere, %70 ile ABD, %68 ile Almanya ve %64 ile Japonya takip etmektedir.

Örnek bir kömür santralinin şematik görünümü Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1. 6. Örnek bir termik santralin şematik görünümü

Termik santrallerde yakıt taşıma maliyetlerinin düşürülmesi ve dolayısıyla santrallerin maliyetlerinin daha düşük seviyede olmasını sağlamak için genellikle termik santraller rezervlerin bulunduğu bölgelerin yakınına inşa edilirler. Termik santraller aşağıda sıralanan on ana bölümden oluşur.

1. Kazan: Santralin sıcak kaynağını oluşturur. Yüksek basınçlı ısıtıcılardan gelen yüksek basınçlı sıvı suyu, yakıtın termal enerjisini kullanarak yüksek basınçlı kızgın buhara dönüştürür ve türbinlere gönderir.

2. Baca: Yanma gazlarının çevreye verilmeden önce arıtılıp soğutulduğu kuledir.

3. Türbin Grubu: Genellikle yüksek, orta ve alçak basınç olarak adlandırılan türbinlerden oluşan ünitedir. Bu bölümde kazandan çıkan buharın ısıl enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür.

4. Jeneratör: Mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi olarak görülebilir. Türbin grubuyla aynı mil sistemini paylaşır. Yani türbin şaftı döndüğünde jeneratör şaftı da döner ve elde edilen mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür.

5. Yoğuşturucu: Bu kısım santralin soğuk kaynağını oluşturur. Bu kısımda alçak basınç türbininden çıkan düşük basınçlı ve düşük sıcaklıktaki buhar, bir su kaynağından (nehir, deniz vb.) gelen soğutma suyu kullanılarak soğutularak sıvı hale getirilerek tekrar sisteme pompalanır.

6. Yoğuşturucu pompası: Kondenserden sonra elde edilen sıvı suyun alçak basınçlı ısıtıcılara iletilmesinden sorumludur.

7. Alçak basınç besleme suyu ısıtıcılar: Kondenser pompasından gelen düşük basınçlı ve düşük sıcaklıktaki sıvı suyun, türbinlerden çıkan buharla ısıtılmasını sağlarlar.

8. Dearatör: Alçak basınçlı ısıtıcılardan gelen besi suyu ile ara basınç türbininden alınan buhar arasındaki enerji alışverişini sağlayan açık ısı değiştiricidir. Sadece ısı değiştirici rolünü oynamakla kalmaz, aynı zamanda hava giderici rolünü de oynar, yani besleme suyunun gazlardan ayrılmasını sağlar. Suda bulunan gazlar ayrıştırılıp hava gidericinin üst kısmına atıldıktan sonra kalan su ısıtılarak doymuş sıvıya dönüştürülür.

9. Besleme suyu pompası: Degazörden gelen besi suyunun basıncını kazan basıncına yükselterek ısıtıcılara yüksek basınçla göndermek için kullanılır.

10. Yüksek basınç besleme suyu ısıtıcılar: Besleme suyu pompasından gelen sıvı suyu, yüksek basınç türbinlerinden gelen buharla ısıtırlar.

Kömür yakıtlı santraller buhar türbinli enerji santralleridir. Bu santrallerin temel çalışma prensibine bakıldığında elektrik üretmek için ilk olarak kazana besleme suyu alınır ve kazanda ısıtılır. Kazanda buharlaşan su kızdırıcı cihazlardan geçirilerek kızgın buhar elde edilir. Kızgın buhar türbine gönderilir ve türbinin kanatlarına çarparak türbinin bağlı olduğu mili hareket ettirir. Türbine bağlı bir jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Trafolar üretilen elektrik enerjisini enerji nakil hatlarına aktarır. Türbinden çıkan ıslak buhar yoğuşturuculara gönderilir ve burada yoğuşarak suya dönüşür ve su besleme suyu pompaları aracılığıyla tekrar sisteme aktarılır.

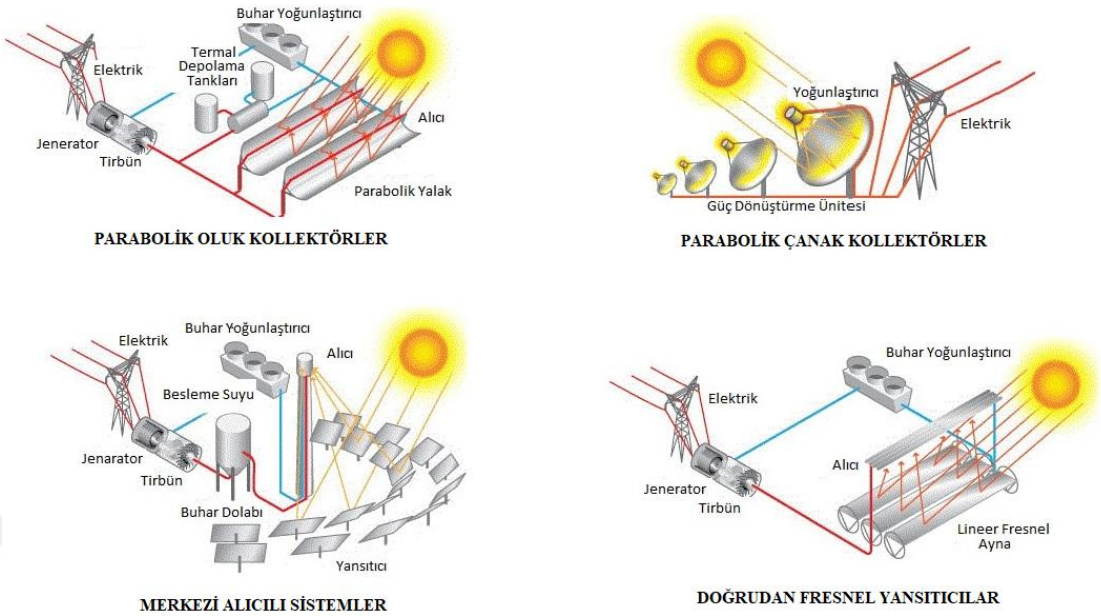
Termik santrallerin elektrik üretiminde diğer santrallere göre düşük maliyetli bir yöntem olması bu santrallerin bir avantajıdır. Bunun yanı sıra yerleşim alanlarına yakın kurulabildiği için elektriğin son kullanıcılara taşınması kolaydır ve bu da güç dağıtım maliyetini düşürür. Enerji ihtiyacını kesintisiz karşılamada uzun yıllardır en çok tercih

edilen kömür yakıtlı santrallerin güvenilir bir seçenektir. Bu avantajlarının yanı sıra termik santraller en büyük dezavantajları elektrik üretimi için fosil yakıt kullanılmasından dolayı sürdürülebilir bir enerji üretim sistemi değildirler ve doğayı olumsuz etkilerler. Ayrıca, bu sistemlerin çalışmasında büyük miktarda su gerektiğinden dolayı su kaynaklarının azalmasına neden olurlar.

1.6. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Sistemleri

Güneş enerjisi ile termal enerji üretmek için güneş kollektörleri kullanılmaktadır. Ancak, düzlemsel kollektörler kullanıldığı zaman 100ºC'ye kadar düşük sıcaklıklarda ısı elde edilmektedir. Elektrik enerji üretiminde güneşten faydalanmak için kullanılan fotovoltaik panellerin yanı sıra termal enerjiden de faydalanılarak elektrik üretilebilmektedir. Gerek yüksek sıcaklık uygulamalarında gerekse güneşin termal enerjisinden elektrik üretimi için güneş ışınlarını toplamak ve yoğunlaştırmak için yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri (YGES) geliştirilmiştir. Bu sistemler ısı veya elektrik enerjisi üretmek için güneş ışınlarını bir noktada yoğunlaştıran bir dizi parabolik ayna veya fresnel lens kullanırlar. Yoğunlaştırılarak toplanan güneş ışınları alıcılar içerisindeki akışkana aktarılır ve ısının akışkan buhar üretmek için kullanılır. Üretilen buhardan ise türbinler vasıtasıyla elektrik üretilir. Isı enerjisinden elektrik enerjisi üretildiği için bu sistemler termal enerji depolama sistemleri ve türbin içerirler.

YGES sistemlerinde odaklama teknolojisine göre parabolik oluk kollektörler, parabolik çanak kollektörler, merkezi alıcılı sistemler ve doğrusal Fresnel yansıtıcıları olmak üzere dört grupta sınıflandırılırlar. Bu sistemler şematik olarak Şekil 1.7'de gösterilmiştir. Bunlar arasında en yaygın kullanılan parabolik oluk kolektörlerdir. Bu kolektörler düşük bir optik yoğunlaştırma faktörüne (40-80) [7] ve sınırlı soğutma sıvısı sıcaklığına (400°C) limitine sahiplerdir. Yansıtma oranı yüksek olan malzemeden yapılmış parabolik yansıtıcılar ile güneş ışınları odaklanır ve odakta yer alan alıcı içerisindeki akışkana enerjisi aktarılır.



Şekil 1.7. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojilerinin çeşitleri

Parabolik çanak sistemleri iki eksende güneşi takip ederek çanak şeklinde bir yoğunlaştırıcı ile güneş ışınlarını 1000 ila 3000 arasında yüksek yoğunlaştırma faktörlerinde odaklama bölgesine yoğunlaştırırlar ve alıcıdaki akışkanın sıcaklığı 1500°C'ye kadar çıkabilir. Bununla birlikte, sıcaklık, parabol odağındaki ısıl makinalara bağlı olarak 700°C'den 850°C'ye sınırlanmaktadır. İş akışkanı genellikle, sistemin yapısı ile hareket eden alıcının üzerine monte edilmiş bir ısıl makinayla doğrudan kullanılır. Bu sistemlerde yaygın olarak Stirling motoru kullanılmaktadır. Stirling çevrimi, genellikle termal enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi için kullanılır [8]. Merkezi alıcı sistemlerde güneş ışınlarını üç boyutlu olarak takip edebilen aynalar ile güneş enerjisi toplanarak bir kulenin tepesine yerleştirilmiş alıcıya yansıtılarak yoğunlaştırılır. Bu sistemlerde optik yoğunlaştırma faktörü 200'den 1000'e kadar değişirken ısı transfer sıvısına ve alıcıya bağlı olarak akışkan sıcaklığı 250 ile 1000°C arasında değişir. Bu da Rankine veya bir gaz (Brayton) veya kombine (buhar-gaz) çevrimini uygulamaya izin verir. 10 ila 200 MW arasında elektrik üretim kapasitesine sahiptir [9]. Doğrudan Fresnel yansıtıcılarda ise çok sayıda ince ayna dizileri ile güneş ışınları odak noktasında yer alan çift tüplü alıcı içerisindeki akışkana aktarılır. Bu sistemlerde yoğunlaştırma oranı yaklaşık 30'dur.

1.7. Hibrit Enerji Santralleri

Hibrit enerji sistemleri çeşitli enerji kaynaklarının bir arada kullanılmasıyla oluşturulan enerji sistemleridir. Artan enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında daha temiz enerji çözümlerinin başında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gelmektedir. Ancak güneş ve rüzgar gibi enerji kaynaklarının coğrafik koşullara ve meteorolojik verilere bağlı olmalarından yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretiminde süreksiz olmaları nedeniyle tek bir kaynak olarak yeterli olmamaktadır. Bu nedenle sürekliliği sağlamak için farklı enerji kaynakları birlikte kullanılarak enerji üretiminde süreklilik sağlanmış olur ve böylece sistem performansı da artırılmış olur. Bu şekilde bir enerji santralinde birbirlerini tamamlayan farklı enerji kaynakları kullanıldığında, geleneksel yakıtların yanmasından kaynaklı emisyonlar azaltabilir ve daha fazla arz istikrarı sağlanabilir. Hibrit sistem olarak rüzgar ve güneş, rüzgar, güneş ve hidrojen, güneş ve hidrojen, güneş, kömür ve hidrojen, güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi bir çok farklı enerji kaynağının kombinasyonları yapılabilmektedir.

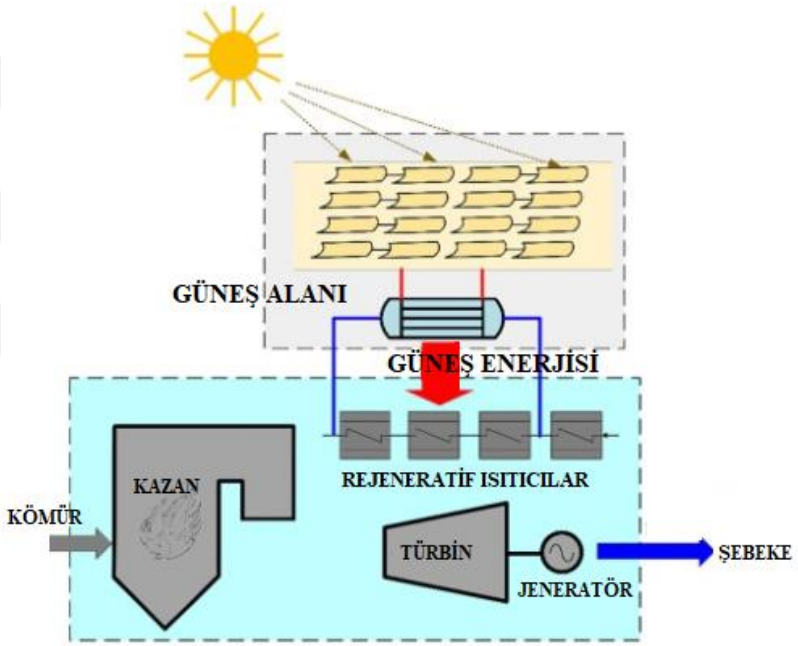
1.8. Güneş Enerjisi Destekli Kömür Yakıtlı Güç Santralleri

Güneş enerjisi destekli kömür yakıtlı güç santralleri (GDKGS) yoğunlaştırılmış güneş santralleri ve konvansiyonel kömür santrallerinin entegrasyonundan oluşan sistemlerdir. Güneş enerjisi kullanarak besleme suyunun ön ısıtılması esasına göre çalışan kömür yakıtlı bir enerji santrali ile kombinasyonu ile kömür tüketiminin azaltılması ve dolayısıyla çevrenin korunmasında bu sistemler büyük bir avantaj sağlayacaktır. Kömürlü termik santralde güneş enerjisi besleme suyu ön ısıtma tekniğinin kullanılması, kömürlü termik santralde güç çıkışını artırma ve/veya yakıt tasarrufu konsepti etkisine sahiptir.

Bu sistemler güneş alanı alt sistemi ve kömürle çalışan güç sistemi olmak üzere iki ana kısımdan meydana gelir. Güneş alanı alt sisteminden emilen ısı enerjisi, doğrudan veya bir ısı eşanjörü aracılığıyla kömür yakıtlı güç sistemine aktarılabilir. Bu sistemlerin temel mantığı rejeneratif Rankine güç çevriminde besleme suyunun ön ısıtılması için türbinden çıkan buharın yerine güneş termal enerjisinin kullanılmasıdır.

Şekil 1.8'de kömür santrali ile güneş sisteminin entegrasyonu basit bir şema olarak gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi rejeneratif ısıtıcılar, kazan besi suyunun ön

ısıtılması için güneş alanı ile paralel çalışır. Modern kömür yakıtlı enerji santralleri 500°C veya daha yüksek sıcaklıkta çalışırken güneş enerjili termal santrallerin çoğu yaklaşık 300–400°C arasında çalışır. Bundan dolayı, güneş alanından gelen buharı sıcaklığı yüksek olmadığından türbine gönderilmeden önce ısıtılması gerekmektedir. Güneş alanı tarafında üretilen buharın ana türbine beslenmesi, güneş enerjisi alanından gelen buhar çıkışından en iyi şekilde yararlanılarak tesisin genel verimliliğini artırabilir. Alternatif olarak da kazana girmeden önce besleme suyunu ısıtmak için güneş enerjisi termal enerjisi kullanılabilir.



Şekil 1.8. Güneş enerjisi destekli kömür yakıtlı güç santralinin şematik görünümü

2. BÖLÜM
GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KÖMÜR YAKITLI GÜÇ SANTRALLERİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

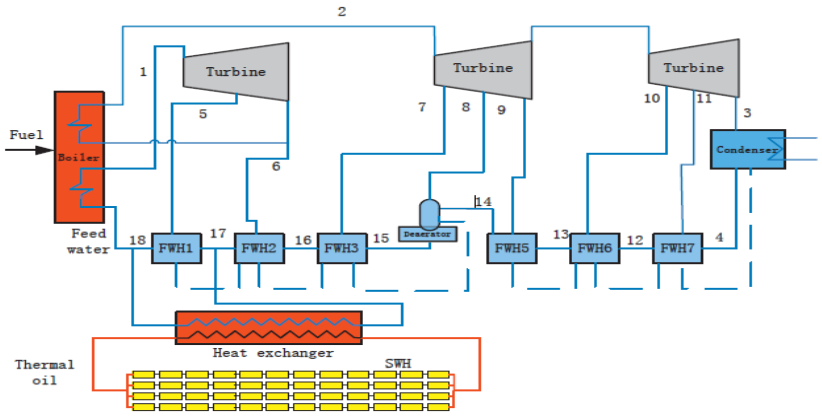
2.1. Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Günümüzde enerji sektöründe karşılaşılan karmaşık sorunlar, enerji kaynaklarının verimli ve sürdürülebilir kullanımını gerektirmektedir. Bu bağlamda güneş enerjisi destekli kömür güç santralleri sürekli ve çevre dostu enerji üretimi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu entegrasyon tekniğinde, YGS ve kömür güç santrali aynı güç bloğunu kullanarak yakın etkileşime girer. Bu süreç "güneş destekli kömür güç santrali (GDKGS)" adı altında bilinmektedir ve ilk kez 1975 yılında Zoschak ve Wu tarafından önerilmiş ve incelenmiştir [3]. Ardından, bazı çalışmalarda, farklı analiz yöntemleri altında, güneş enerjisi kullanılarak besleme suyunun ön ısıtılması esasına göre kömür güç santralleri ile entegrasyonu ekonomik ve çevresel açıdan araştırılmıştır. Hibrit güneş-kömürlü buhar güç santralleri, günümüzde güneş enerjisi maliyetinin en çekici yaklaşımlarından biridir. Bir diğer deyişle, termik güneş enerji konvansiyonel kömür yakıtlı elektrik santraline entegre etmenin, güneş enerjisini kullanmanın ve kömür yakıtlı elektrik santralinin üretim verimliliğini artırmanın etkili bir yolu olduğu kanıtlanmıştır.

Hekim [10] tarafından Merkezi Alıcı Sistemli (MAS) santral elemanların tasarımı, değerlendirilmesi, hesabı ve analizleri yapılmıştır. Meteorolojik veriler için METEONORM kullanılmıştır. SAM (System Advisor Model) yazılım yardımıyla santralin finansal modelleme ve teknik performans değerleri elde edilmiştir. SAM yazılımından elde edilen termodinamik çevrim hesaplamalarının değerleri, STEAG firmasının bir yazılımı olan EBSILON'dan elde edilen sonuçlar ile de karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır. Birecik ilçesinin yanı sıra Urfa, Ankara, Konya, Mersin, Muğla ve Van illerinde tüm teknik özellikleri aynı olacak şekilde kurulacak 10 MW kapasiteli

MAS santraller için de yıllık enerji üretim değerleri, kapasite faktörleri, kademelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) optimum değerleri hesaplanmıştır.

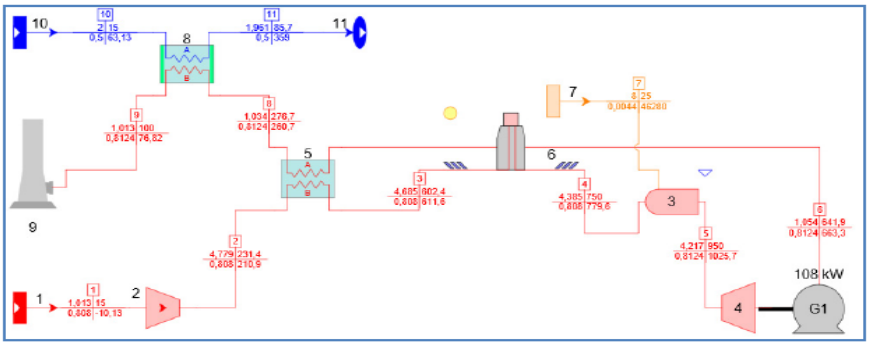
Hong ve arkadaşları [11] tarafından yapılan çalışma da Çin'de Sinkiang ilinde termal güneş sistemi (Parabolik oluk sistemi) ile hibritleştirilmiş 330 MW'lık bir kömür santrali (Şekil 2.1) önerilmektedir. Bu güneş hibrit tesisinde, 300°C'de güneş ısısı, yüksek basınçlı türbin kademesinden çıkarılan buharın yerine, ekonomizörden önce kazan besleme suyunun ön ısıtılması için kullanılmıştır. Bu şekilde, türbinden çıkarılmayan yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlı buhar, türbin içerisinde daha da genişleterek kömürle çalışan elektrik santralinin çıktısını artırmıştır. Ayrıca, bu tür güneş hibrit enerji santrali, depolama cihazı olmadan akşam ve bulutlu günler gibi düşük güneş radyasyonu periyotlarında tam kapasitede de çalıştırılabilir. LCOE değeri 0.8-1.0 Yuan/kWh'a düşmüştür. Bu değer sadece güneş enerjisi ile çalışan termik santrallerinkinden (1.1-1.3 Yuan/ kWh) yaklaşık %20-30 daha düşüktür. Bu tür güneş hibrit kömür santrali yakın ve orta vadede orta sıcaklıktaki güneş ısısının uygun maliyetli ve ölçeklenebilir kullanımına umut verici bir yaklaşım getirecektir.



Şekil 2.1. Basitleştirilmiş güneş-kömür hibrit enerji santralinin şematik diyagramı

Cameretti ve arkadaşları [12] İtalya'da SOLUGAS (Solar Hybrid Gas Turbine Electric Power System) projesinde ticari ölçekte ilk hibrit güneş gaz türbini sistemini geliştirmişlerdir ve genel tesis performansını THERMOFLEX yazılımı ile bulmuşlardır. Bu yazılım modelin çeşitli bileşenlerle (fonksiyonel blok halinde) monte edilmesini sağlayan modüler bir programdır. Şekil 2.2'de THERMOFLEX yazılımı ortamında

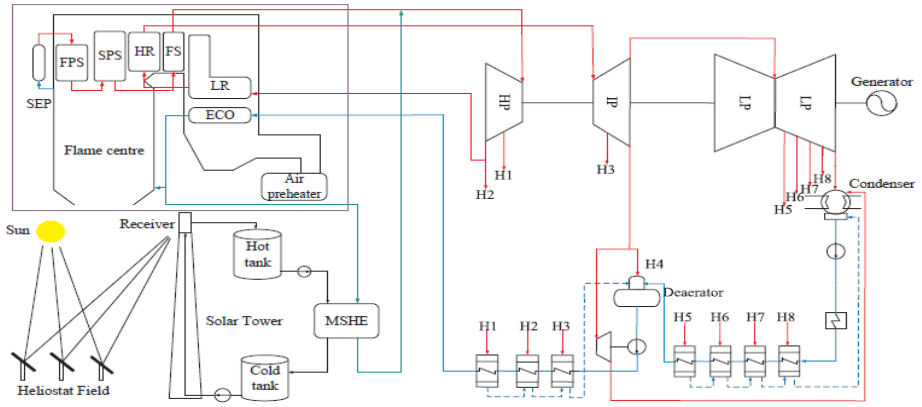
fonksiyonel blok halinde tesisin modeli görülmektedir. Bu çalışma, bir güneş tarlasıyla entegre gaz türbini veya buhar / gaz tesisine dayanan bir hibrit sistem önermektedir. Güneş ısısı ya türbin çalışması için gereken enerjinin bir kısmını sağlayıp ya da güneş ışınımının yeterli olması durumda yanma işlemini yakıt girişi olmadan sağlamaktır. Sistem, gün içinde veya mevsimlerde birkaç saat boyunca güneş ışınımı zayıfsa, tam yanma modunda çalışabilir. Sistem, rejenerasyon ve yanma ısısından faydalanmak üzere ısı değiştiricileri ve güneş tarlası tarafından desteklenen bir mikro gaz türbini içermektedir. Bu şekilde, biyogaz kullanımı ile güneş alanından gelen termal güç birleştiren bir hibrit termal enerji kaynağı göz önünde bulundurulur. İkinci aşamada, yanma etkinliğini ve gaz türbininin çevresel etkilerini birkaç yük seviyesinde ve ortam koşullarında kontrol etmek için, yazarlar, konvansiyonel doğal gazın yerine anaerobik sindirimden elde edilen tipik bir biyogazla beslendiklerinde mikro GT (Gaz Türbini) yanma odasından gelen reaksiyon akışının bir CFD analizini gerçekleştirmişlerdir. CFD modellemesi FLUENT yazılımı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2.2. THERMOFLEX yazılımında santral diyagramı

Li ve arkadaşları [13] güneş kulesi destekli kömür yakıtlı santralin yıllık performans analizi ve optimizasyonu yapmışlardır ve termal depolama sistemi kapasitesinin, yıllık üretilen güneş enerjisi ve yıllık güneş enerjisinden elektrik verimliliğine etkisini incelemişlerdir. Şekil 2.3'te STACP sisteminin basit bir diyagramı gösterilmiştir. Termal depolama sistemi kapasitesi, en düşük elektrik maliyeti elde etmek için optimize edilmiştir. Aynı zamanda, birçok önemli ekonomik faktörün etkisi ve hassasiyeti araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tek kömürle çalışan santrale kıyasla, Güneş Kulesi Destekli Kömür Yakıtlı Güç (STACP) sisteminin yüksek doğrudan normal ışınım (DNI), orta DNI ve düşük DNI ile yıllık ortalama kömür tüketim oranındaki azalmanın sırasıyla 5.79, 4.52 ve 3.22 gr/kWh olduğunu göstermektedir. Asgari seviyede, yıllık

kömür tüketimi 600MWe'lık bir güç üretim ünitesinde 14000 ton azaltılabilir. Aynı güneş alanı farklı DNI koşulları altında değerlendirildiğinden dolayı, yüksek DNI, orta DNI ve düşük DNI senaryolarındaki LCOE değerleri oldukça yakındır (sırasıyla 6.37, 6.40 ve 6.41 €/kWh). Güneş çarpanı 3.0 olduğunda, yüksek, orta ve düşük DNI'lere sahip STACP sisteminin optimum termal depolama kapasitesi sırasıyla 6.73, 4.42 ve 2.21 saattir.



Şekil 2. 3. Güneş kulesi destekli kömür yakıtlı güç sistemi diyagramı

Zhu ve arkadaşları [14] çok kriterli değerlendirme ile konsantre güneş enerjisi sistemi destekli kömür yakıtlı santralinin düzen planlarının optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışma, orta ve yüksek sıcaklıkta güneş enerjisi sistemi destekli kömür yakıtlı santrali için bir entegrasyon metodolojisi sunmuştur. Bu yöntemler hibrit (güneş / fosil) sistem taraması, ön değerlendirme ve karar verme için kullanılabilir. Sunulan metodoloji 100 + 1000 MW'lik güneş kulesi destekli kömür yakıtlı tesiste uygulanmıştır. Önerilen metodolojiye göre, en iyi entegrasyon şeması buharın tekrar ısıtılması için yüksek sıcaklıkta güneş ısıl enerjisinin kullanıldığı bir senaryoda bulunurken, kalan güneş ısıl enerjisi güneş enerjisinden maksimum faydalanmayı sağlayan besleme suyu ısıtmasında kullanılır. Analiz, en iyi entegrasyon şeması altında termal güneş enerjisinden 214.7 MWe'ye kadar güç üretilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, sonuçlara göre hibrit sistemin güneş/elektrik verimliliği ve güç bloğu verimliliği sırasıyla % 43.3 ile % 36.8'e ulaşabilir ve kömür tüketim oranı 203.5 g/kWh'dir.

Hong ve arkadaşları [15] besleme suyunun ön ısıtmasına dayalı güneş enerji destekli kömür yakıtlı santralinin performansını değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, ekserji metodolojisi yardımıyla bu tür güneş hibrit tesisi için güneş enerjisinin güce dönüştürülmesinin ifadeleri türetilmiştir, özellikle güneş enerjisinden elektriğe dönüşüm verimliliğini açıklamak için açık bir korelasyon elde edilmiştir. Türetilmiş ifadeleri kullanarak, tipik bir güneş enerjisi sistemi destekli 330 MW'lık kömür yakıtlı santralini incelemişler ve güneş enerjisinden elektriğe dönüşüm ısıl performansını değerlendirmişlerdir. Ek olarak, güneş ışınımı, geliş açısı ve türbin yükü gibi önemli işlem parametrelerinin güneş ısıl performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

Wang ve arkadaşları [16] Çin'de tipik bir güneş hibrit kömür yakıtlı santral için teknik ve ekonomik optimizasyon yapmışlardır. Çalışmada, çeşitli çalışma koşullarında ve yapı düzenlerinde, bir güneş hibrit kömürlü termik santralin termodinamik ve ekonomik performanslarını araştırmak için bir güneş alanı ve güç bloğu modeli geliştirilmiştir. Önemli işletme parametrelerinin güneş hibrit kömür yakıtlı elektrik santralinin performansları üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca, yıllık güneş enerjisinden elektriğe dönüşüm verimliliğini, yıllık güneş enerjisinden güç çıkışını ve güneş hibrit kömür yakıtlı santralinin elektrik maliyeti analiz edilmiştir. Çalışmalar sonucunda %13 ile 20 arasında verimlilik elde edilebildiği bulunmuştur ve bunun güneş çarpanı ve ikame yöntemine bağlı olarak elektrik maliyeti 0.10- 0.16 $/KWh aralığında değişmektedir.

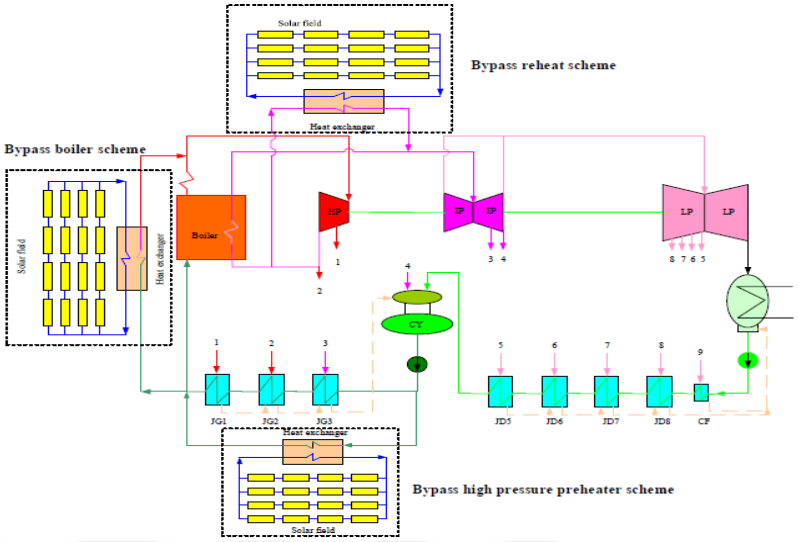
Zhong ve arkadaşları [17], güneş ışınımının değişkenliği nedeniyle, güneş ışığına göre güneş entegrasyon modunu anahtarlama programına dayanan bir optimizasyon stratejisi önermişlerdir. Sistem performansını analiz etmek için ısı ve güç kombine eden bir parabolik oluk güneş sistemi destekli kömür yakıtlı santrali modeli üretilmiştir. Minimum kademelendirilmiş elektrik maliyetlerini (LEC) elde etmek için, güneş enerjisi entegrasyon modunun genel bir üst yapısı kurulur ve yağ-su ısı eşanjörü alanını ve güneş enerjisi entegrasyon modunu optimize etmek için karma bir tam sayı doğrusal olmayan programlama yaklaşımı uygulanır. 150 MW'lik ısı ve güç kombine eden bir parabolik oluk güneş sistemi destekli kömür yakıtlı santrali optimize edilmiş sonuçları güneş ışığına göre anahtarlama entegrasyon modunun, entegrasyon modunu sürekli sabitlemekten daha düşük bir LEC'e sahip olması ve bu iki entegrasyon modunun optimal LEC'si sırasıyla

0.0771 $ / kW saat ve 0.0794 $ / kW saattir. Ayrıca, LEC ilk önce azalmıştır ve ardından yağ-su ısı eşanjörü alanının artmasıyla artmıştır.

Prosin ve arkadaşları [18] merkezkaç katı partikül alıcısı kullanarak hava ön ısıtmalı hibrit güneş ve kömür yakıtlı buhar santrali üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada kazan yanma havasını katı partikül alıcısına dayanan yeni bir yüksek sıcaklık yoğunlaştırılmış termal güneş sistemi ile önceden ısıtan, kazan bazlı buhar santrallerinin güneş hibridizasyonunu değerlendirilmiştir. Bu yeni ön ısıtma yöntemi, genel sistemin güneş enerjisinin payını arttırma, yakıt tasarrufunu artırma ve dolayısıyla daha yüksek güneş enerjisinden elektrik dönüşüm verimliliği üretme potansiyeline sahiptir. Katı Partikül Alıcı (KPA) güneş enerjisi sistemlerinde daha yüksek çalışma sıcaklığı ve entegre termal depolamadan gibi faydalar sağlamaktadır. Analizler, kömür santrallerinin hava-solarizasyon, mevcut güneş hibridizasyon seçeneklerinden çok daha yüksek güneş-elektrik dönüşüm verimi ile sonuçlanabileceğini göstermektedir. Ara buhar alma işlemi ile solarizasyon, buhar alma olmasından dolayı güç çevrim verimliliğini düşürürken, hava ön ısıtması ile yapılan solarizasyon, temel olarak düşük egzoz kayıplarının getirdiği artmış kazan verimliliği nedeniyle, güç sistemi verimliliğini arttırır. Bu çalışmada önerilen hava solarizasyon seçeneği, Fresnel tabanlı teknolojiye sahip mevcut ara buhar almalı ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, her iki sistemin de modellenmesi ve buhar çevrimi ve kazanın termodinamik ısı ve kütle dengesinin EBSILON yazılımı kullanılarak analiz edilmesiyle yapılmıştır. KPA sistemi tarafından üretilen güneş enerjisinin maliyetinin Fresnel hibridizasyonu tarafından üretilen elektriğin yaklaşık %59'u olduğu hesaplanmıştır.

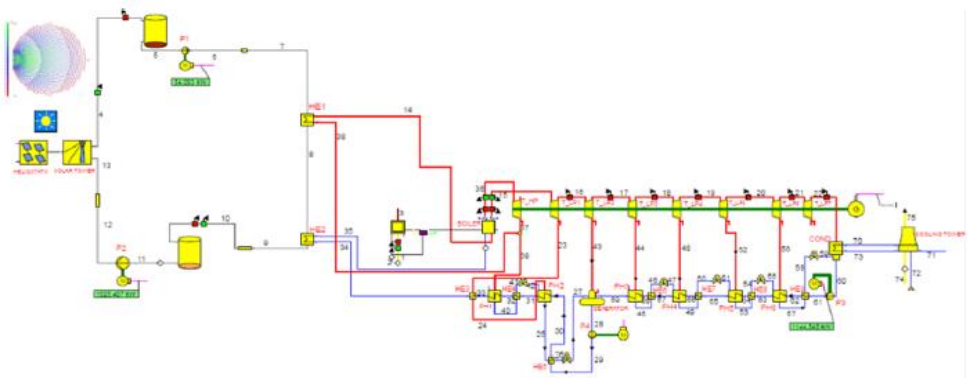
Wang ve arkadaşları [19] güneş enerji destekli kömür yakıtlı santralinin termodinamik analizi yapmışlardır. Geleneksel kömür yakıtlı elektrik santrali ve güneş enerjili sistemin kombinasyonu, bu çalışmada tipik bir 330 MW'lik kritik altı güç ünitesinin bir durum çalışmasına dayanarak analiz edilmiştir. Bu çalışma, güneş enerjisini sisteme entegre ettikten sonra, Şekil 2.4'te şeması verilen tipik 330 MW'lık kritik güç ünitelerindeki termodinamik analizine odaklanmaktadır. Güneş enerjisi destekli sistem kapasitesinin üst limitinin SCR (Selective Catalytic Reduction) gaz sıcaklığı, ara ısıtmalı sıcaklığı vb. ile sınırlı kalacağı bulundu. Termo-ekonomik performans ön ısıtma, ana buhar üretimi ve ortalama ısı transfer sıcaklığına bağlı olarak ara ısıtma esnasında artmaktadır. Farklı yükler altında, kömür tüketim oranı yaklaşık 5 ton/saat azalır. DNI ve gerçek yük değişim

eğrisinin etkisi göz önüne alındığında, güneş enerjisi destekli sistemlerde kömür oranı %2.13 oranında düşebilir.



Şekil 2.4. Güneş enerjisi destekli kömür santralinin farklı şemaları

Serrano-Sanchez ve arkadaşları [20] birleştirilmiş termik güneş ile kömür santralini ekserjetik ve ekonomik açıdan değerlendirmişlerdir. Hibrit tesis, kömür santralini güneş kulesi alanıyla birleştirir. Şekil 2.5'te gösterilen çalışma kapsamında önerilen hibrit enerji santrali EBSİLON Professional yazılımı kullanılarak simüle edildi. Tesis aynı zamanda, benzer kapasitedeki geleneksel bir kömür yakıtlı tesisle de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, önerilen hibrit tesisin güneş enerjisi ilavesi nedeniyle %4.6 daha az kirletici madde havada serbest bıraktığını göstermiştir. Yakıt tüketimi de aynı miktarda azaltılabilir. Hibrit santralinin enerji verimliliği %35.8'dir. Konvansiyonel kömür santralinin verimliliğinden daha yüksek verimli tesisi kurmak ve işletmek için gereken toplam sermaye yatırımı 8050.32 $/kW'dır. Ancak, bu maliyet kömürle çalışan bir elektrik santrali kurmak ve işletmek için gerekli olan maliyet 5979.69 $/kW'dan daha yüksektir ve esas olarak satın alınan ekipman maliyetlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Son olarak, hibrit tesisin kademelendirilmiş elektrik maliyeti 0.19 $/kWh (hem güneş hem de kömür kaynaklarını kullanarak) olarak bulunmuştur.



Şekil 2. 5. Bir kömür santralini güneş kulesi ile birleştiren önerilen hibrit santrali

Zhao ve arkadaşları [21] güneş-kömür hibrit sistemi için güneş alanı büyüklüğünün optimizasyonu yapmışlardır. Bu çalışmada farklı ölçeklere sahip (200-600 MW) tipik hibrit kömür-güneş parabolik oluk tesisleri için güneş çarpanının (Solar Multiple) ekonomik bir optimizasyonu sunulmuştur. Her bir güneş hibrit güç santralinin termal performansı, güneş çarpanına göre üretilen yıllık güneşten elektriğe hesaplama yöntemlerinin değiştiğini göstermiştir. Yıllık elektrik enerjisi üretimi tanımlandıktan sonra, her durum için kademelendirilmiş enerji maliyeti ve geri ödeme süresi hesaplanabilir. Ayrıca, yerel güneş radyasyon kaynaklarının ve türbin çalışma yükü koşullarının bir sistemin ekonomik optimizasyonuna etkileri tahmin edilmiştir. Sonuçlar, güneş alanı büyüklüğünün optimizasyonunun güneş kömür hibrit sisteminin ekonomik gelişimi için umut verici olduğunu göstermiştir.

Amoresano ve arkadaşları [22] biyokütle yakıtlı buhar santrallerinde güneş enerjisi entegrasyonunun optimizasyonu yapmışlardır. Bu makale güneş-biyokütle entegrasyonuna odaklanmıştır. Güneş biyokütle entegre konfigürasyonunda, tek başına güneş ve hibrit tesis konfigürasyonlarda kullanımını karşılaştırmak için güneş enerjisinin enerji dönüşüm verimliliği değerlendirilmiştir. Bu verimlilik en iyi hibrit tesis konfigürasyonu, değişken buhar basıncı ve rejenerasyon parametreleri için optimizasyon parametresi olarak kabul edilmiştir.

Peng ve arkadaşları [23] Çin'de 330 MW'lık tipik bir güneş enerjili kömür yakıtlı elektrik santralinin ekserjisini değerlendirmişlerdir. Bu çalışma, besleme suyunu ısıtmak için türbinden çıkan buharın yerini almak üzere 300°C'den daha düşük bir sıcaklıkta güneş

ısısı kullanan güneş enerjili kömür yakıtlı santralinin termodinamik performansını tartışmıştır. Bu işlem boyunca ara buhar almalı işleminden çıkarılacak olan buhar, elektrik üretmek için buhar türbininde verimli bir şekilde genişleyebilir. Türbine geri dönen buharın akışının debisi ana akımın sadece küçük bir kısmını tutar, bu da buhar türbininin tüm DNI için tasarım koşullarına yakın çalışmasına izin verir.

Yang ve arkadaşları [24,25] GDKGS'nin termodinamik performans analizi, yüksek basınçlı BSI güneş enerjisiyle değiştirilmesiyle GDKGS'nin genel verimli analiz ederek katkıda bulunmuştur. Sonuçlar, GDKGS'nin güneş enerjisinden elektriğe dönüşüm veriminin yalnızca güneş enerjili bir enerji santralininkinden daha yüksek olduğunu gösterdi. Baloda ve arkadaşları [26] güneş enerjisi destekli kömür yakıtlı güç santralinin yakıt tasarrufu modu ile güç azaltma modu arasında karşılaştırmalı bir analiz yapmışlardır. Yakıt tasarrufu modunda kömür tüketiminin ve CO_2 emisyonlarının azalırken güç artırma modunda ise güneş-kömür hibridinin güç çıkışının arttığı sonucu elde edilmiştir.

2.2. Tez Çalışmasının Katkısı

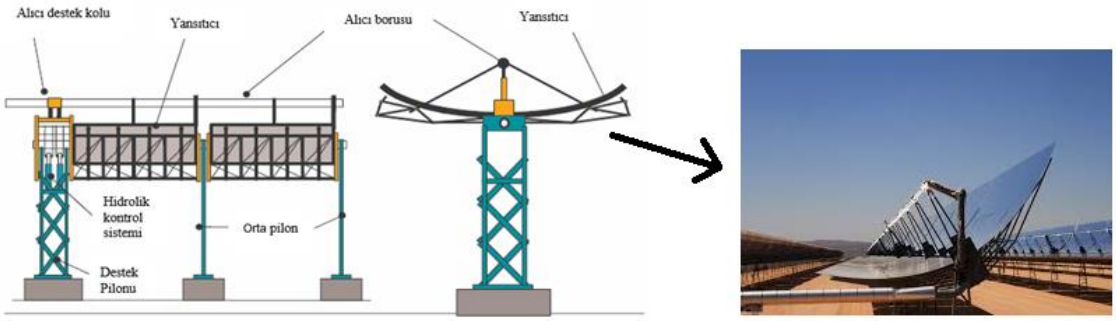
Yukarıda verilen literatürdeki makalelerin sonuçlarına göre, GDKGS teknolojilerinin potansiyeli karbon giderme (CO_2 emisyonlarının azaltılması) ve daha düşük işletme maliyetleri (yakıt maliyetlerinin azaltılması) anlamına gelmektedir. Ancak besleme suyu ısıtıcı (BSI) değiştirme tekniğine dayalı GDKGS sistem çalışması üzerinde yürütülen bu çalışmaların çoğu, yalnızca bir veya daha fazla besleme suyu ısıtıcısının kısmen veya tamamen değiştirilmesiyle ilgilidir. Bu tez çalışması kapsamında Nijer'in kuzeyindeki Agadez ve Türkiye'de Çanakkale şehirlerinde bulunan 330 MW'lık güneş destekli kömür yakıtlı elektrik santrali için enerji ve çevre analizi yapılmaktadır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak hiçbir BSI değiştirilmeyecektir. Bu nedenle Yağlı Su Isı Eşanjörü (YSIE), kazan ile son yüksek basınçlı arasında yer alacak şekilde seri konfigürasyondadır. Bu çalışmada maksimum güneş enerjisi kazan tarafından kabul edilebilir sıcaklık sınırında besleme suyuna aktarılmaktadır. Bu sınırlayıcı sıcaklığın, besleme suyunun doymuş buharının sıcaklığına eşit olduğu varsayılmıştır. Böylece güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanılmıştır. Bu yaklaşım, GDKGS'nin "yakıt tasarrufu (YT)" modunda çalışmasına olanak tanımıştır.

3. BÖLÜM
GÜNEŞ ALANI MATEMATİKSEL MODELİ

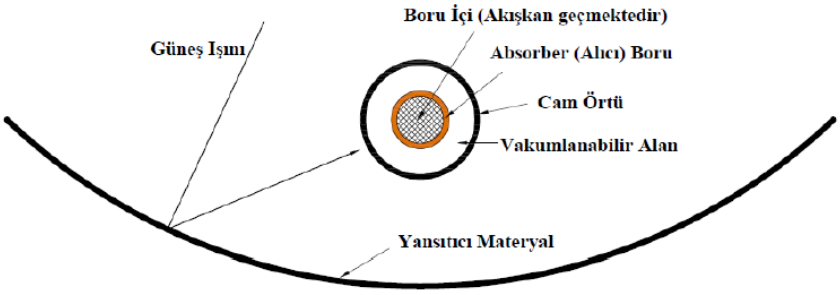
Bu tez çalışmasında kullanılan yoğunlaştırılmış güneş teknolojisi parabolik güneş kollektör (PGK) sistemidir. Bu bölümde öncelikle çalışma kapsamında ele alınan parabolik güneş kolektörününün, bileşenleri olan yansıtıcı, alıcı borusu, yansıtıcı kaplaması, alıcının cam örtüsü ve modelde çalışma akışkanı hakkında genel bilgi verilerek daha sonra analizlerde kullanılan matematiksel model açıklanacaktır.

3.1. Parabolik Güneş Kolektörünün Temel Bileşenleri

Parabolik güneş kolektörünün şematik görünümü ve kollektöre ait bir fotoğraf örnek olarak Şekil 3.1'de verilmiştir. PGK'lar Bölüm 1'de de bahsedildiği gibi yansıtma oranı yüksek oluk şeklinde yapılmış bir yansıtıcı yardımıyla gelen güneş ışınları kollektörün odak noktasında yer alan alıcıya yoğunlaştırılır ve böylece güneşten gelen termal enerji alıcı içerisindeki akışkana aktarılır. Şekil 3.2 ile gösterildiği gibi PGK destek çerçevesi ile beraber bir yansıtıcı ve ısı transfer akışkanın içinde geçtiği alıcı borudan oluşmaktadır [27].



Şekil 3.1. Parabolik güneş kolektörleri

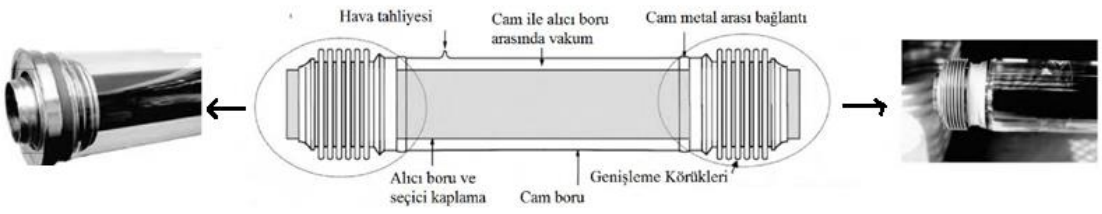


Şekil 3.2. Parabolik güneş kolektörü yansıtıcısı ve alıcıları

Bir PGK'nın ana bileşenleri aşağıda verildiği gibidir:

PGK yansıtıcı: Şekil 3.2'de gösterildiği gibi yansıtıcı oluk şekilli aynalardır. Yansıtıcılar özel alüminyum folyo veya düşük demirli gümüş ince tabakası ile kaplanmıştır ve böylece güneşten gelen direk ışınımı bir alıcıya yoğunlaştırırlar [28, 29]. En yaygın kullanılan yansıtıcı malzemeler gümüş ve alüminyumdur. Ortalama yansıma (önceden herhangi bir çevresel etki olmaksızın), 250 ila 2500 nm arasındaki dalga boyu aralığında %90'dan fazla olmaktadır. Bu, genellikle Dünya'daki güneş kolektörleri tarafından kullanılabilen spektrum olarak kabul edilir [30].

PGK alıcısı: Bir PGK yapısındaki ikinci önemli eleman, güneş ışınlarının yansıtıcı tarafından yönlendirildiği elemandır (Şekil 3.3) [31]. Bu elemana alıcı denir ve PGK odak hattı üzerinde bulunur. Genellikle siyah boya ile kaplanmış metalik bir borudan oluşur. Taşınım ve ışınım ısı kayıplarını azaltmak için yararlı olan başka bir şeffaf tüple (Cam örtü) kaplanabilir veya kaplanmayabilir. Güneşten gelen yoğunlaştırılmış termal enerji ısı transfer akışkanı tarafından absorbe eder.



Şekil 3.3. Parabolik güneş kolektörü alıcısı

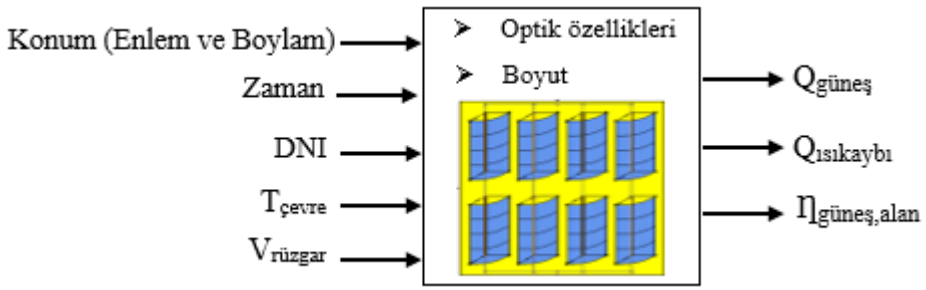
İş akışkanı: Güneşten gelen enerjinin aktarıldığı birincil akışkandır. Genellikle termal yağlar kullanılmakla birlikte su gibi akışkanlarda kullanılabilir. Bu sıvı, buharı oluşturmak için gereken ısı enerjisini sağlar. Buna karşılık buhar, türbinin çalıştırılmasına yardımcı olur ve sonuçta elektrik üretir.

Taşıyıcı kasa: Oluklu kollektörlerin desteklenmesi ve zemine sabitlenmesi için kullanılırlar.

Takip ve İletim Sistemleri: Güneşten gelen ışınımı maksimize edebilmek için güneş hareket ettikçe kollektörünün konumunu ayarlamak için kullanılan izleme cihazlarıdır.

3.2. Güneş Alanının Sayısal Modellenmesi

Tez çalışması kapsamında güneş enerjisi destekli kömür yakıtlı güç santralinin enerji performansının değerlendirilmesi için STEAG firması tarafından geliştirilen EBSILON®Professional 14 yazılımı [32] kullanılmıştır. GDKGS güneş alanı ve kömür santrali olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Güneş kolektörü alanı EBSILON uygulamasında bir bileşen olarak modellenmiş olup güneş alanından çıkan yüksek sıcaklıktaki akışkandan elde edilen enerji, meydana gelen kayıplar ve sistemin verim hesaplanmıştır. Sistemin performansı zamana bağlı analiz edilmiştir. EPSİLON yazılımı ısı kayıplarını, güneş enerjisini, güneş alanı verimini ve güneş alanıyla ilgili parametreleri saatlik olarak hesaplamaktadır. Güneş alanının modellenmesinde yazılımı girilen veri ve çıktı bilgilerini içeren bilgi akış şeması Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Güneş alanı tarafından güneşten akışkana aktarılan faydalı enerji , ısı kayıpları ve güneş alanının verimi konuma, zamana, çevre sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi meteorolojik koşullara göre hesaplanmaktadır.



Şekil 3.4. Güneş alanı modelinin bilgi akış şeması

3.3. Güneş Alanının Matematiksel Modeli

Güneş alanı, büyüklüğüne (kollektör sayısına) ve optik özelliklerine bağlı olarak, yukarıda sıralanan parametreleri girdi olarak alarak alınır ve anlık olarak absorbe ettiği ısı miktarını, ısı kayıplarını ve verimliliği hesaplanır.

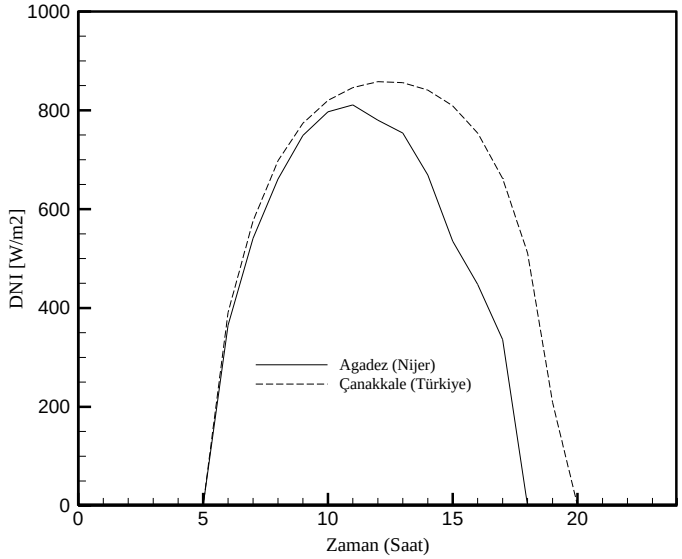
Absorbe edilen ısı miktarı (Q_{abs}) hesaplanması üç bölüme ayrılabilir. Bu absorbe edilen ışınım, ışınım geliş açısı, sıra gölgelemesi, kolektör temizliği ve yansıtıcı alanı ve alıcı yüzey optik özelliklerine göre ayarlanan doğrudan normal güneş ışığının bir kısmıdır. Daha sonra güneş alanındaki toplam ısı kayıp ($Q_{isikaybi}$) hesaplanır. Bu toplam ısı kaybı alıcı dış yüzeyi ile ortam havası arasındaki taşınım ve ışınım nedeniyle kayıpların ($Q_{isikaybi,alıcı}$) ve PGK boru hat sisteminden kaynaklanan ısı kaybının ($Q_{isikaybi,boru}$) toplamıdır. Bu ısı değerleri kullanılarak enerji korunumundan akışkana aktarılan faydalı enerji (Q_u) hesaplanır.

3.3.1. Absorbe edilen güneş ışınım miktarının hesaplanması

Absorbe edilen güneş ışınım miktarı kollektörlerin yüzey alanına ($A_{net\ col}$,m^2), yüzeye gelen doğrudan ışınım miktarına (DNI ,W/m^2) ve kollektörün optik verimine (η_{opt}) bağlı olarak Eşitlik 3.1'deki gibi hesaplanır:

$$Q_{abs} = A_{net,kol} \cdot DNI \cdot \eta_{opt} \tag{3.1}$$

Güneşten yayılan ışınlar saçılmadan direkt olarak yer yüzeyine ulaştığı (doğrudan ışınım) gibi bulutlar ve hava içindeki toz partiküller tarafından absorbe edilerek tekrar yer yüzeyine yansıtılır (difüze veya yaygın ışınım). Yüzeye gelen toplam ışınım global ışınım olarak adlandırılır ve bu iki bileşenin toplamına eşittir. Bir yüzeye gelen ışınım özellik konuma (enlem, rakım) ve zamana bağlı olarak değişir. Şekil 3.5, 21 Aralık için Agadez ve Çanakkale'deki doğrudan normal güneş ışınımı (DNI) değişimini göstermektedir. Şekil 3.5'teki grafiklerin kubbe şekli, atmosferik koşullar ve etkin hava kütlesi gün boyunca değiştikçe, atmosferin zamanla radyasyonu dağıtması ve absorbe etmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.5. 21 Aralık'ta gün boyunca DNI değişimi

Eşitlik 3.1'de yer alan optik verimlilik Eşitlik 3.2 ile hesaplanır [33]:

$$\eta_{opt} = \eta_{nom} \cdot IAM \cdot f_{uçkaybi} \cdot f_{sıra,golge} \cdot f_{temizlik} \quad (3.2)$$

Burada η_{nom} nominal veya tepe optik verimlilik (Eşitlik 3.3), IAM geliş açısı değiştiricisi (Eşitlik 3.4), $f_{uçkaybi}$ alıcı elemanın uçlarından kaynaklanan kayıpları (yansıyan radyasyonun alıcı tarafından yakalanmayan kısmı) hesaba katan faktör (Eşitlik 3.12), $f_{sıra,golge}$ (Eşitlik 3.13) paralel kolektör sıralarının karşılıklı gölgelenmesini dikkate alan faktör ve $f_{temizlik}$ ise temizlik faktörüdür. Her bir parametrenin hesaplamaları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Nominal verimlilik η_{nom} Eşitlik 3.3 ile ifade edilir:

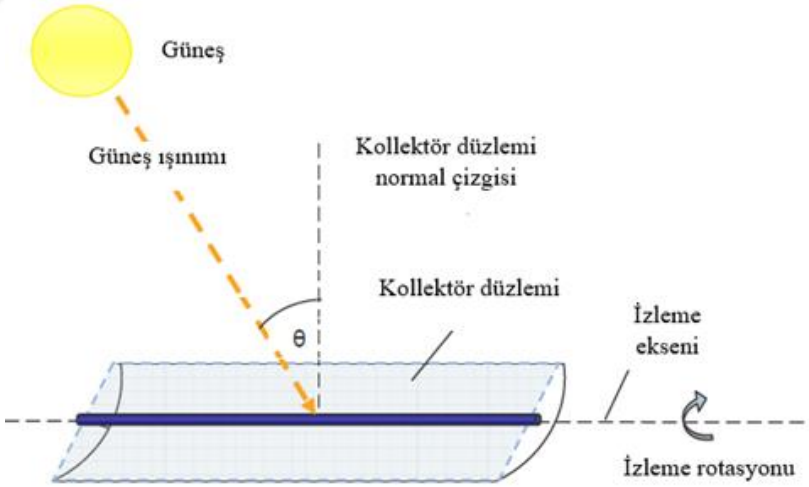
$$\eta_{nom} = \varepsilon_{cl} \cdot (\tau\alpha_c)_n \cdot \gamma \quad (3.3)$$

Burada ε_{cl} temiz ayna yansımasıdır, τ alıcı cam zarfın geçirgenliğidir, α_c alıcı yüzey kaplamasının soğuruculuğudur ve $\tau\alpha_c$ τ'nin etkin çarpımıdır, γ alıcı yüzeyine gelen yansıyan radyasyonun bir kesri olan yakalama faktörüdür. Bu çalışmada tepe optik verim değerinin 0.8'e eşit olduğu varsayılmıştır.

Geliş açısından kaynaklanan kayıplara ek olarak, alıcı cam borusunun yansıma ve emilmesinden kaynaklanan başka ek kayıplar da vardır. Bunu düzeltmek için bir **geliş açısı düzelticisi (IAM)** kullanılır. Toplayıcının tipine göre literatürde verilen farklı ampirik bağıntılarla hesaplanır. Tez çalışması kapsamında kullanılan LS-3 tipi kollektör için Eşitlik 3.4 ile hesaplanır [34, 35]:

$$IAM=1-2.2307\cdot10^{-4}\cdot\theta-1.1\cdot10^{-4}\cdot\theta^{2}+3.18596\cdot10^{-6}\cdot\theta^{3}-4.85509\cdot10^{-8}\cdot\theta^{4} \quad (3.4)$$

Burada θ güneş geliş açısıdır ve Eşitlik 3.5 ile hesaplanan bu açı belirli bir yüzeye gelen dire güneş ışınımı ile yüzeyin normali arasındaki açıyı temsil eder. PGK sistemlerinin enerji dönüşüm performanslarında önemli bir parametre olan güneş geliş açısı güne göre değişmektedir. Güneş enerjisi sistemlerinde güneşten ışınımların yüzeye gelen dik bileşenleri sayesinde faydalı enerji elde edilir. Bundan dolayı, PGK sistemlerinde kollektörde dik olan ışınım odaklanır. Şekil 3.6'da güneş geliş açısı ve PGK sistemlerindeki işlevi sembolik olarak çizilmiştir.



Şekil 3.6. PGK üzerindeki geliş açısı

Son olarak, sürekli doğu-batı takibi ile yatay bir kuzey-güney ekseni etrafında dönen bir düzlemin geliş açısı şu şekilde verilmektedir:

$$cos\,\theta = \sqrt{cos^2\theta_z + cos^2\delta \cdot sin^2\omega} \quad (3.5)$$

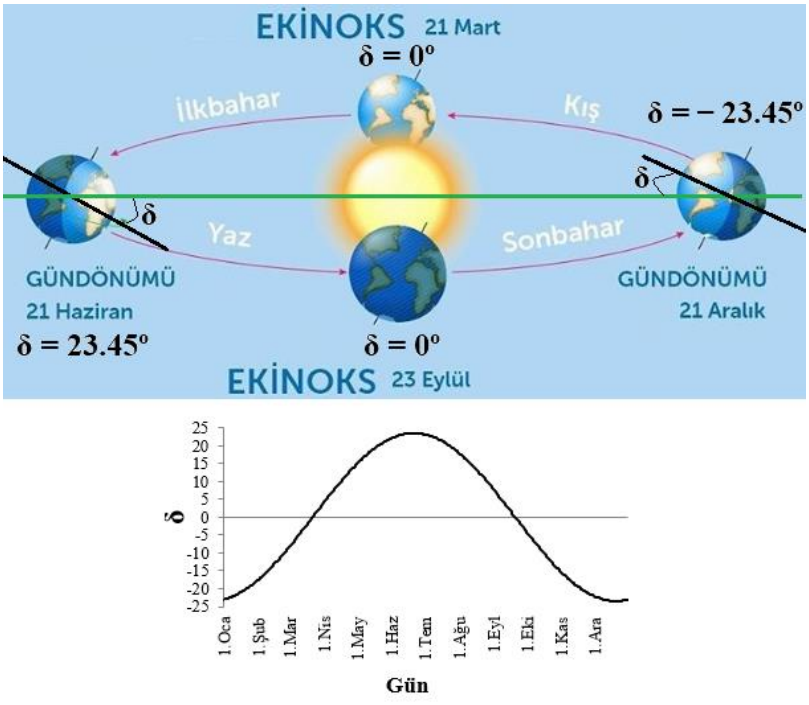
Burada θ_z zenit açısıdır ve güneşin doğrultusu ile dikey eksen arasındaki açı miktarına eşittir. Eşitlik 3.6 ile hesaplanan zenit açısının bağıntısına bakıldığında deklinasyon açısı (δ), saat açısı (w) ve enlem derecesine (ϕ) bağlı olduğu görülür.

$$\cos\theta_z = cos\delta \cdot \cos\phi \cdot cos\omega + sin\delta \cdot sin\phi \tag{3.6}$$

Hesaplama formülü Eşitlik 3.7'de verilen deklinasyon açısı (δ) güneş ışınları geliş doğrultusu ile ekvator düzlemi arasındaki açı değeridir. Dünya'nın kendi ekseni ve güneşin çevresinde dönüş ekseni arasında 23.45°'lik bir açı vardır. Eksenler arasındaki bu eğiklikten dolayı mevsimler oluşur ve Dünya üzerinde farklı konumlara düşen ışınım miktarı da yıl boyunca değişir. Dünya bir yıl boyunca Güneş etrafında dönerken δ'nın değeri -23.45° ile 23.45° arasında değişir. İlkbahar ve sonbahar ekinokslarında ise δ'nın değeri 0'a eşittir. Deklinasyon açısının mevsimlere göre değişimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \tag{3.7}$$

Burada n 1 Ocak'tan itibaren gün sayısıdır (1 Ocak için 1, 31 Aralık için 365).



Şekil 3.7. Deklinasyon açısının mevsimlere göre değişimi

Eşitlik 3.6'da verilen w saat açısı (°) ise Eşitlik 3.8 ile hesaplanır. Güneşin konumu, saat açısına veya güneşin yerel meridyenin doğusunda veya batısındaki açısal değişimine bağlıdır. Güneş yerel, meridyenin doğusunda olduğunda (sabah), saat açısı negatiftir, yerel meridyenin batısında olduğunda (öğleden sonra), saat açısı pozitiftir ve yerel meridyenle aynı hizada olduğunda (öğle vakti), saat açısı sıfırdır. Saat açısı, saatte 15° hızla ekseni etrafında dönen dünya üzerindeki dönüşün bir sonucu olarak ortaya çıkar:

$$\omega = (GS - 12) \cdot 15 \tag{3.8}$$

Burada GS güneş saatidir (saat) ve Eşitlik 3.9 ile hesaplanır. Memleket saati (MS, Yerel saat) ve güneş saati (GS) arasında önemli bir ayrım vardır. Güneş zamanında, güneş yerel meridyenle (ω = 0) tam olarak 12:00'de, yani "güneş öğleni"nde hizalanır. Ancak yerel zaman, yerel meridyene değil, yerel saat dilimi için standart bir meridyene dayanır. Güneş gününün uzunluğu da değişir. Bu değişkenlik başlıca olarak dünyanın güneş etrafında eliptik bir yol izlemesinden kaynaklanır [36]. Saat cinsinden güneş saati ile yerel saat arasındaki ilişki şöyledir:

$$GS = MS - DST + \frac{(L_{st} - L_y)}{15} + E \cdot \frac{1saat}{60\ Dak.} \tag{3.9}$$

Burada DST gün ışığından yararlanma saati (Gün ışığından yararlanma saati 1 saat olur, standart saat sırasında 0 saat olur), L_{st} yerel saat dilimi için standart boylamı (°), L_y güneş alanın kurulduğu bölgenin boylamı (°) ve E zaman düzeltme faktörüdür (dak). Zaman faktörü güneş etrafındaki dünyanın eliptik yolundan kaynaklanan gün uzunluğundaki küçük düzensizlikleridir ve aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$E=0.0043 \cdot \cos(B) - 0.1236 \cdot \sin(B) - 0.0608 \cdot \cos(2B) - 0.1538 \cdot \sin(2B) \tag{3.10}$$

Bu denklemde verilen B Eşitlik 3.11 ile hesaplanır:

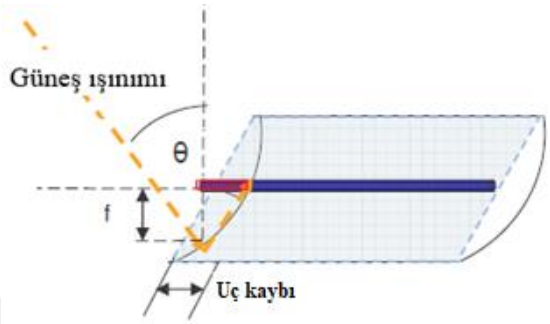
$$B = \frac{360}{365} \cdot (n - 1) \tag{3.11}$$

Alıcı uç kayıplar faktörü ($f_{uçkaybi}$) alıcı boru uçlarından kaynaklanan kayıpları hesaba katan faktördür (yansıyan radyasyonun alıcı tarafından yakalanmayan kısmı). Kollektör

üzerinde uç kayıp detayları şematik olarak Şekil 3.8'de çizilmiştir. Uç kayıpları kollektör odak uzunluğunun, kollektör uzunluğunun ve geliş açısının bir fonksiyonudur [37]:

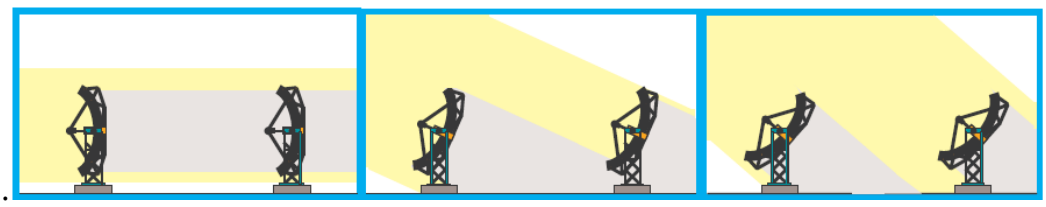
$$f_{uçkaybı} = 1 - \frac{f \cdot tan\theta}{L_{GKA}} \tag{3.12}$$

Burada f odak hattının uzunluğu ve L_{GKA} tek bir güneş kollektörü uzunluğudur.



Şekil 3.8. Kollektör üzerinde uç kayıp detayı

Kollektörler arası gölgeleme faktörü ($f_{sıra,golge}$) güneşin konumuna bağlı olarak, kollektörlerin yönelimi ve geometrisi, sabah ve akşam paralel sıraların gölgelenmesi nedeniyle ek kayıplara neden olabilir. Sabah güneşinin düşük yükselme açısı nedeniyle, en doğudaki kollektör sırası tam güneş alacaktır, ancak bu sıra batıdaki tüm sıraları gölgeleyecektir. Doğal olarak gün batımında da aynı karşılıklı gölgeleme etkisi meydana gelir. Güneş yükseldikçe ve kolektörler güneşi takip ettikçe, bu karşılıklı sıra gölgeleme etkisi, sıra gölgelemesinin oluşmadığı kritik bir zirve açısına ulaşılıncaya kadar azalır. Şekil 3.9, bu karşılıklı sıra gölgeleme etkisini göstermektedir [36].



Şekil 3.9. Kollektörler arası gölgelemenin gün içindeki değişimi

Kollektörler arası gölgeleme faktörü ($f_{sıra,gölge}$), etkin kollektör genişliğinin gerçek kollektör genişliğine oranıdır. Bu oran, zenit açısı, geliş açısından ve güneş alan geometrisinden elde edilebilir [36]:

$$f_{sıra,golge} = \frac{W_{eff}}{W} = \frac{L_{bosluk}}{W} \cdot \frac{cos\theta_z}{cos\theta} \quad (3.13)$$

Burada W_{eff} etkin kollektör eni (gölgesiz kısmı) ve W kollektör enini göstermektedir. L_{bosluk} ise kollektörler sıralarının arasındaki boşluğun genişliğini göstermektedir.

3.3.2. Günel alanındaki ısı kayıplarının hesaplanması

Güneş kollektörlerinde meydan gelen toplam ısı kaybı alıcıda ($Q_{isikaybi,alıcı}$) ve borularda ($Q_{isikaybi,boru}$) meydana gelen ısı kayıplarının toplamıdır.

$$Q_{ısıkaybi} = Q_{isikaybi,alıcı} + Q_{ısıkaybi,boru} \quad (3.14)$$

Güneşten gelen ışınım alıcı içerisindeki akışkan tarafından absorbe edildiği zaman akışkanın sıcaklığı artacaktır. Akışkanın sıcaklığı ve ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı arttıkça alıcı boru ve cam örtüsünden ortam havasına olan ısı kayıpları da artacaktır. Tez çalışması kapsamında kullanılan vakum yalıtımlı alıcı teknolojisi PTR 70 2008 için alıcı ısı kaybı ($Q_{isikaybi,alıcı}$) şu şekilde ifade edilir [34, 35]:

$$Q_{isikaybi,alıcı} = A + B \cdot \Delta T + C \cdot T_f^2 + D \cdot \Delta T_f^3 + E \cdot DNI \cdot IAM(\theta) \cdot \cos\theta \cdot T_f^2 + \sqrt{V_{rüzgar}} \cdot (F + G \cdot \Delta T) \quad (3.15)$$

burada T_f ortalama güneş alanın sıcaklığı (Eşitlik 3.16) ve ΔT ise ortalama güneş alanın sıcaklığı ile ortam hava sıcaklığı arasındaki farktır (Eşitlik 3.17).

$$T_f = \frac{T_{f,çıkış} + T_{f,giriş}}{2} \quad (3.16)$$

$$\Delta T = T_f - T_{cevre} \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.15'de yer alan A, B, C, D, E, G ve G ısı kayıp katsayıları vakum yalıtımlı alıcı teknolojisi PTR 70 2008 için Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Vakum yalıtımlı alıcı teknolojisi PTR 70 2008 için ısı kayıp katsayıları

Katsayı	A	B	C	D	E	F	G
Değer	4.5	0.247	-0.00146	5.65×10^{-6}	7.62×10^{-8}	-1.7	0.0125

Güneş alanındaki PGK'lere giden ve PGK'lerden çıkan boru hat sisteminden kaynaklanan termal kayıplar boru hat ısı kayıpları olarak tanımlanır ve aşağıdaki ampirik denklemle hesaplanır [34, 35]:

$$Q_{isikaybi,boru}=1.693\cdot10^{-2}\cdot\Delta T-1.683\cdot10^{-4}\cdot\Delta T^2+6.78\cdot10^{-7}\cdot\Delta T^3 \quad (3.18)$$

3.3.3. Güneşten ısı transfer akışkanına aktarılan faydalı enerjinin hesaplanması

Isı transfer akışkanının birim alan başına topladığı net enerji (Q_u), PGK tarafından absorbe edilen ısı (Eşitlik 3.1) ile toplam ısı kaybının arasındaki farka eşittir:

$$Q_u = Q_{abs} - Q_{isikaybi} \quad (3.19)$$

Enerji hesaplamalarında güneş alanındaki ısı transfer akışkanının potansiyel ve kinetik enerjisindeki değişimler ihmal edilmiştir. Isı transfer akışkanının (ITA) entalpi değişimi ($\Delta h_{gunesalanı}$), güneş alanının PGK'lerinin toplam yüzey alanının ve ısı transfer akışkanının kütle akış hızının bir fonksiyonudur.

$$\Delta h_{gunesalanı} = \frac{Q_u\cdot W\cdot L_{GKA}\cdot N_{GKA}}{m_{ITA}\cdot\rho_{ITA}} \quad (3.20)$$

Burada N_{GKA} PGK sayısını, m_{ITA} ısı transfer akışkanın hacimsel debisi ve ρ_{ITA} ise ITA'nın yoğunluğunu göstermektedir. Bu çalışmada ısı transfer akışkanı olarak Therminol VP-1 kullanılmıştır. Yoğunluğu sıcaklığın bir fonksiyonu aşağıdaki denklem ile ifade edilir [38]:

$$\rho_T = 1074 - 0.6367\cdot T - 0.0007762\cdot T^2 \quad (3.21)$$

Güneş alanının çıkışındaki akışkanın entalpisi, güneş alanının girişindeki entalpi ile giriş ve çıkış arasındaki akışkanın entalpisindeki değişimin toplamıdır:

$$h_{out} = h_{in}(T_{in}) + \Delta h_{field} \quad (3.22)$$

Therminol VP-1'in entalpisi Eşitlik 3.23'deki gibi sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplanır [38]:

$$h(T) = 1000 \cdot (-18.34 + 1.498 \cdot T + 0.001377 \cdot T^2) \quad (3.23)$$

Güneş alanı çıkışındaki ısı transfer akışkanının entalpisi bulunduğunda, akışkanın sıcaklığı sıcaklık-entalpi korelasyonundan elde edilebilir. Therminol VP-1 için Eşitlik 3.24'te verildiği gibi ifade edilir [38]:

$$T(h) = -1.58 \cdot 10^{-10} \cdot h^2 + 0.0006072 \cdot h + 13.37 \quad (3.24)$$

Güneş alanının termal verimi (η_{GA}) Eşitlik 3.25 ile hesaplanır:

$$\eta_{GA} = \frac{Qu}{Qabs} \quad (3.25)$$

4. BÖLÜM
GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ KÖMÜR YAKITLI GÜÇ SANTRALİ VE HESAPLAMA MODELİ

Tez çalışması kapsamında 330 MW kapasiteli güneş enerjisi destekli kömür yakıtlı bir güç santralinin enerji, ekonomik ve çevresel analizlerinin yapılması hedeflenmiştir. Referans sistem olarak %100 kömür yakıtlı güç santrali içinde aynı analizler yapılarak her iki sistem birbiri ile kıyaslanmıştır. Güneş enerjisi destekli sistem olduğu için sistem performansı tesisin konumuna bağlı olacağından dolayı konum olarak Dünya üzerinde iki farklı iklim kuşağı ve meteorolojik şartlara sahip olan Türkiye ve Niger ülkeleri seçilmiştir. Bu ülkelerde yer alan iller içerisinden de seçim yaparken de ülkede halihazırda 330 MW kapasiteli kömür santralinin olduğu ve güneş enerji potansiyelinin iyi olması dikkate alınarak Türkiye için Çanakkale ve Niger için Agadez illeri seçilmiştir.

4.1. Seçilen Bölgelerin Coğrafi Bilgileri

Çanakkale, Türkiye'nin kuzeybatısında Gelibolu Yarımadası ile Anadolu'nun uzantısı olan Biga Yarımadası üzerinde de Marmara bölgesinde yer alan bir ildir. İl, 25° 40′-27°30′ doğu boylamları ve 39°27′-40°45′ kuzey enlemleri arasında 9737 km^2'lik bir alanı kapsar. Deniz seviyesinden yüksekliği 2m'dir. Çanakkale İlinde Akdeniz ve Karadeniz iklimlerinin geçiş iklimi hüküm sürmektedir. Turizm sezonunda iklim mutedil olup deniz suyu sıcaklığı Temmuz ve Ağustos aylarında maksimum seviyeye çıkmaktadır. Günlük hava sıcaklıkları sezonda maksimum 35ºC ve minimum 25ºC olmaktadır. Yağmurlar genelde sonbaharda biraz fazla, ilkbaharda ise daha azdır. Kışın en belirgin özelliği kuzeyden gelen sert rüzgarlardır. Yaz ve Sonbaharda bölgeye Akdeniz İklimi hakim olur.

Agadez, Afrika ülkesi Nijer'in yedi bölgesinden bir tanesidir. 7° 58′ 60″ doğu boylamları ve 16° 58′ 0″ kuzey enlemleri arasında 667799 km^2'lik bir alanı kapsar. Deniz seviyesinden yüksekliği 501 m'dir. Bölgenin çok büyük bir bölümü çölden oluşmaktadır.

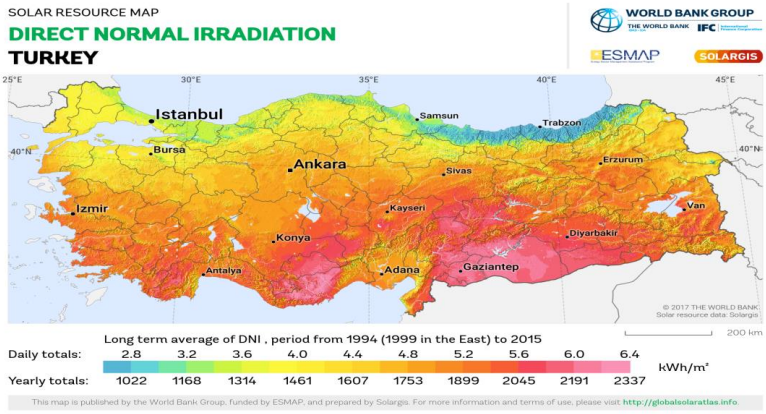
Agadez'in iklimi tropikal kuraktır ve neredeyse tüm yıl boyunca güneş boldur. Haziran ayından Eylül ayına kadar nispeten yağışlı bir mevsim yaşanır. Yaz aylarında Afrika musonunun getirdiği yağışların olduğu Sahel bölgesindedir. Yılın en sıcak zamanı yağmurlardan önceki Nisan ayından Haziran ayına kadardır.

4.2. Güneş Potansiyellerinin Değerlendirilmesi

Güneş ışınımı, Dünya yüzeyinde en yaygın ve en düzenli dağılmış enerji kaynağıdır. Her yıl güneşten dünyaya 60000 defa dünya elektrik tüketimine karşılık gelen güç değeri 1080 milyar TWh'e ulaşır. Günümüzde alternatif enerji kaynakları içinde elektrik enerjisi üretiminde en fazla kullanılan yöntem güneşten fotovoltaik paneller aracılığıyla yapılan üretimdir. Ancak Yoğunlaştırılmış Güneş Sistemleri (YGS) büyük ölçekli enerji üretiminde kullanılabilen en önemli güneş teknolojisidir. Avrupa YGS birliğine göre Güney Avrupa'da 2030 yılına kadar 62000 MW'lik YGS kurulması öngörülmektedir [39].

4.2.1. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli

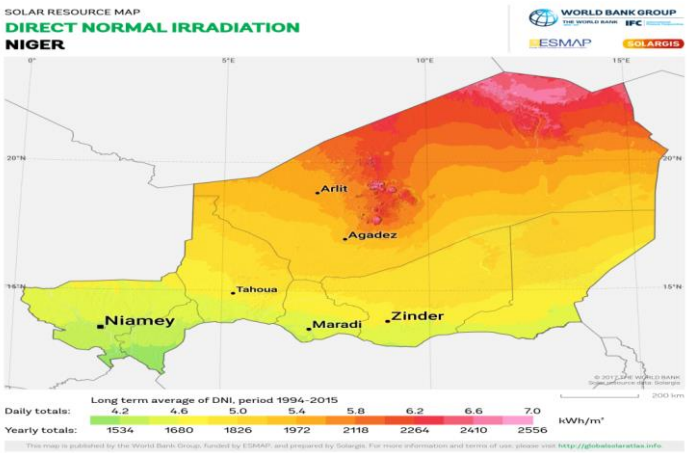
Türkiye bulunduğu konum nedeniyle güneş enerjisinden yararlanma potansiyeli oldukça yüksektir. Türkiye'nin günlük ve yıllık güneş enerji potansiyelini gösteren güneş enerji haritası Şekil 4.1'de verilmiştir. Türkiye'nin ortalama toplam ışınım şiddeti Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünde (DMİ) mevcut bulunan 1971–2000 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi verilerine göre Türkiye'nin toplam güneşlenme süresi 2573 saat iken ortalama toplam ışınım şiddeti 1474 kWh/m²-yıl'dır. Günlük alınan güneş ise ortalama 7.2 saate tekabül etmektedir. Güneş enerjisi potansiyeli açısından Güneydoğu Anadolu Bölgesi en yüksek potansiyele sahipken Karadeniz Bölgesi en düşük potansiyele sahiptir. Ancak, en düşük olan bölge Dünya güneş potansiyeli içerisinde değerlendirildiğinde bile iyi bir potansiyele sahiptir. Bundan dolayı ülke genelinde güneş enerjisi üretimi için uygun koşullar olduğu söylenebilir.



Şekil 4.1. Türkiye'de güneş ışınım yoğunluğu

4.2.2. Nijer'in güneş enerjisi potansiyeli

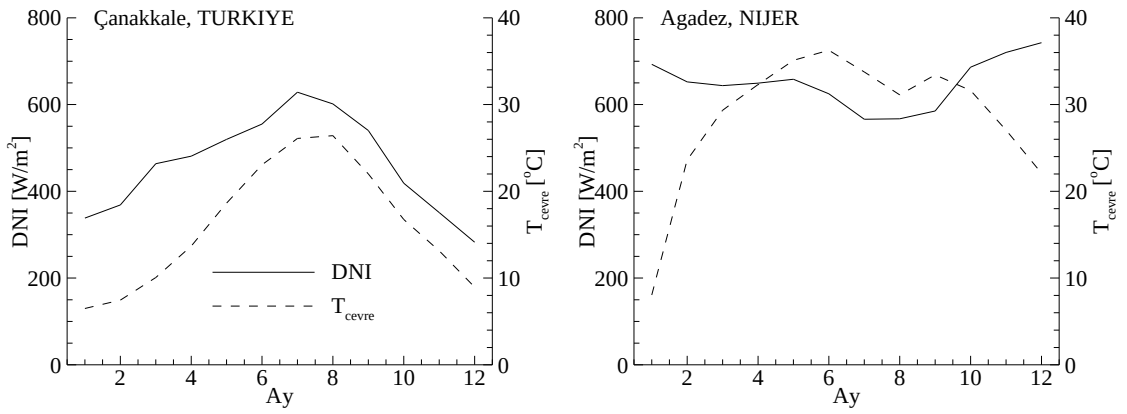
Türkiye gibi Nijer de güneş kuşağında yer almaktadır. Ancak güneş enerjisi bakımından yüksek zenginlikte bir ülke durumundadır. 1983 ve 2005 yılları arasında yapılan bir NASA çalışmasına göre, Nijer'in Agadem bölgesi, yıllık ortalama 6.78 kWh/m^{2}gün (2474.7 kWh/m^{2}yıl) ışınlama ile dünyanın en güneşli ikinci bölgesidir [40]. Ne yazık ki, bu potansiyelden ülke hiç faydalanmamaktadır. Genel olarak, yerli elektrik üretimi tüketilen elektriğin sadece %40'ını oluşturuyor. Böylece Nijer, elektriğinin %60'ını Nijerya'dan ithal ediyor [41]. Dışarıya çok fazla bağımlı olan bir ülkede, enerji bağımlılığını azaltmak için enerji santralleri geliştirmek gerekenden fazladır. Dünyanın en güneşli ülkelerinden biri olan ve 2/3'ü çöl olan Nijer gibi bir ülke için, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerjiye dönmek oldukça caziptir.



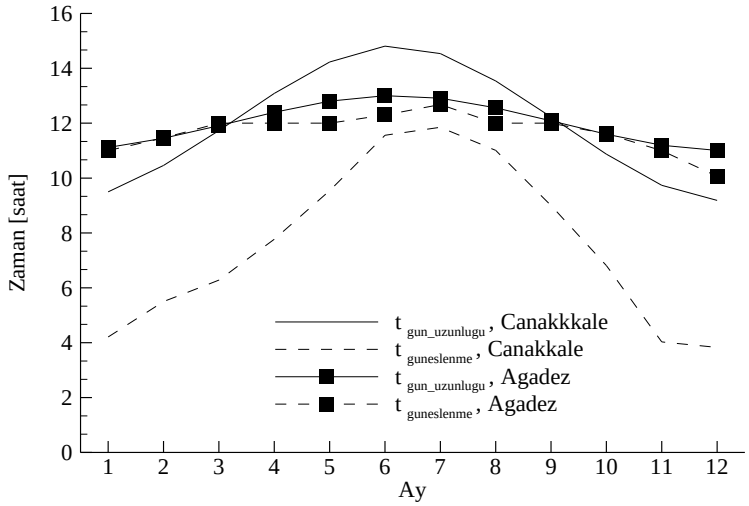
Şekil 4.2. Nijer'de güneş ışınım yoğunluğu

Tez çalışması kapsamında kullanılan meteorolojik veriler Tipik Meteorolojik Yıl (TMY) tipindedir ve Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) veri tabanından alınmıştır. Bu veriler, 2007'den 2021'e kadar 14 yıllık meteorolojik verilerin derlenmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.3a ve 4.3b sırasıyla Çanakkale ve Agadez'deki ortalama günlük güneş ışınımının aylara göre değişimini göstermektedir. Çanakkale'de Ocak ayından Temmuz ayına DNI artmakta ve bu ayda maksimum değere ulaşmaktadır. Bu aydan sonra tekrar düşmektedir. Çevre sıcaklığı ise Temmuz ve Ağustos ayalarında maksimum değere ulaşmaktadır. Agadez ide ise Kasım ve Aralık ayları en yüksek ışınıma, Temmuz ve Ağustos ayları ise en düşük ışınıma sahiptir. Agadez'de çevre sıcaklığı Haziran ayında maksimum değere ulaşmaktadır.

Çanakkale ve Agadez için güneşlenme süresi ve gün uzunluğunun aylara göre değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Çanakkale'de en az güneşleme süresi saat olan ay ortalama 3.83 saat güneşli olan Aralık ayıdır. Maksimum güneşlenme süresi ise Temmuzdadır ve 11.85 saattir. Gün uzunluğu Çanakkale için Ocak ayında 9.5 saattir ve Haziran ayına kadar artmaktadır. Haziran ayında yaklaşık gün uzunluğu 15 saattir. Agadez için yıl boyu güneşlenme süresi ve gün uzunluğu hemen hemen birbirine eşittir ve yaklaşık 11-12 saat civarındadır.



Şekil 4.3. Çanakkale ve Agadez için DNI ve $T_{çevre}$'nin aylara göre değişimi



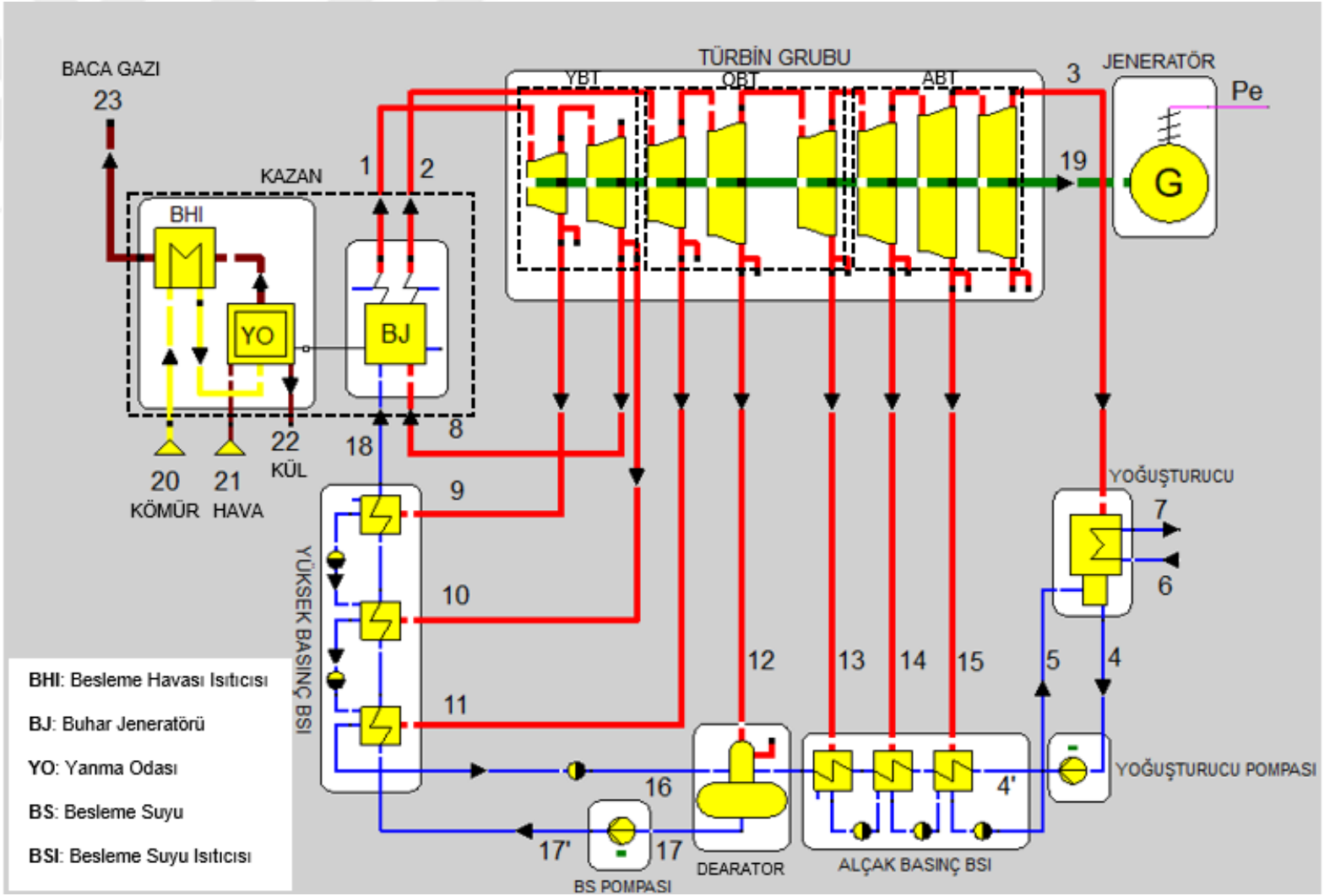
Şekil 4.4. Güneşlenme süresi ve gün uzunluğunun aylara göre değişimi

4.2.3. %100 Kömür Yakıtlı Güç Santrali

İncelenen termal enerji santralleri (Şekil 4.5), üç yüksek basınçlı besleme suyu ısıtıcısı (BSI), yüksek, orta ve alçak basınç türbinlerinden oluşan türbin grubu, bir hava giderici (deaerator), üç adet alçak basınçlı besleme suyu ısıtıcısı ve alçak ve yüksek basınç pompaları ve kazandan oluşmaktadır ve sistem rejeneratif Rankine döngüsü prensibi altında çalışmaktadır. Çevrim, yoğusturucudan çıkan su ile başlar. Yoğusturucudan doymuş sıvı haldeki su, onu düşük basınca sıkıştıran bir pompaya yönlendirilir. Bu şekilde sıkıştırılan su daha sonra alçak basınç BSI'ya gönderilir ve burada ara buhar geri kazanım yöntemine göre türbinlerden alınan buharın ısısı kullanılarak ısıtılır, böylece ana çevrimdeki su sıcaklığı artar. Bu işlemin meydana geldiği düşük basınç nedeniyle bu ısı değiştiricilere düşük basınçlı ısı değiştiriciler adı verilir. Alçak basınç BSI'lardan çıkan su, dearatör'e yönlendirilir. Dearatörün, içerdiği buharın pompaya ulaşmadan önce sudan atılmasına yardımcı olur. Böylece su doymuş sıvı olarak besleme pompasına gönderilir. Besleme suyu pompası, suyu yüksek basınçla yüksek basınç BSI'lara gönderir. Yüksek basınç BSI'lar da düşük basınç BSI'lar gibi ana çevrimdeki suyu ısıtmak için türbinlerden alınan buharı kullanır. Yüksek basınç BSI'lardan çıkan su, yüksek basınçta kazana girer. Kazan, yanma odası (YO), besleme havası ısıtıcısı (BHI) ve buhar jeneratöründen (BJ) oluşur. Kömür kazana alttan püskürtülür ve orada yakılır. Yanmış kömür diğer taraftan alt kısımda kül olarak geri kazanılıyor. Yanan kömür, üstteki boru sistemlerinden başka bir değişle BHI'dan geçen yüksek basınçlı besleme suyu ısıtır. Isıtılan su BJ'den geçerek daha da enerji kazanıp kazandan kızgın buhar olarak çıkar. Kazandan çıkan kızgın buhar,

yüksek basınç türbinine (YBT) yönlendirilir. Daha sonra yüksek basınç türbininden çıkan buhar tekrardan enerji kazanmak için kazana geri gönderilir ve tekrar ısıtıldıktan sonra orta basınç türbinine (OBT) gönderilir. Orta basınç türbininden çıkan buhar alçak basınç türbininden (ABT) geçer. Türbinden düşük basınçta, indirgenmiş basınç ve sıcaklıkta çıkan buhar, yoğuşturucuya gider, burada bir nehir veya bir deniz suyu soğutma suyu olarak kullanılarak soğutulur ve tekrar doymuş sıvı haline gelir, ardından pompaya yönlendirilir. Böylece çevrim tamamlanmış olur. Türbin grubu bir şaft vasıtasıyla jeneratöre bağlıdır. Buhar, türbinden geçerken türbin kanatlarına çarpar ve şaftı döndürür. Bu süreçte, elde edilen mekanik enerjiyi jeneratörün tarafından elektrik enerjisine çevirir. Elde edilen elektrik gücü, gerilimi yükseltip dağıtım şebekesine göndermek üzere santralinin trafo merkezine iletilir.

Tez çalışmasında ele alınan referans sistemde, buharın bir kısmı türbin grubundan alınarak kazan besleme suyunun yaklaşık 53.97°C'den yaklaşık 267.39°C'ye kadar ön ısıtılması sağlanmaktadır. Ardından, tesisin ana parametreleri ve tesisin tüm akış parametreleri sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de listelenmektedir.



Şekil 4.5. %100 kömür yakıtlı referans kömür santrali

Tablo 4.1. Kömür santralin ana parametreleri

Parametre	**Birim**	**100% Kapasite**
Çıkış Gücü	MW	330
Ana buhar basıncı	Mpa	16.7
Ana buhar sıcaklığı	°C	538
Ana buhar debisi	kg/s	305.45
Ara kızdırma sıcaklığı	°C	538
Besleme suyu sıcaklığı	°C	267.389
Yoğuştutucu basıncı	kPa	15
Yoğuştutucu entalpisi	kJ/Kg	2441.8

Tablo 4.2. Kömür santralin tüm akış parametreleri

Akış No	**Basınç [bar]**	**Sıcaklık [°C]**	**Entalpi [kJ/kg]**	**Debi [kg/s]**	**Kuruluk derecesi**	**Entropi [kJ/kg °K]**	**İş (MW)**
1	167	538	3398.62	305.45	1	6.42	.
2	34.57	538	3538.08	263.3	1	7.27	.
3	0.15	53.97	2441.8	202.74	1	7.53	.
4	0.15	53.97	225.94	244.51	0	0.75	.
4'	10.43	54.07	227.24	244.51	0	0.76	.
5	0.15	53.97	401.61	41.77	0	1.29	.
6	1	28.6	119.98	5366.27	0	0.42	.
7	1	48.97	205.06	5366.27	0	0.69	.
8	34.57	329.7	3056.05	263.3	1	6.59	.
9	57.11	380.1	3132.44	22.84	1	6.49	.
10	34.57	329.7	3056.05	19.31	1	6.59	.
11	19.56	451	3360.83	9.55	1	7.3	.
12	10.28	359.9	3178.65	9.24	1	7.32	.
13	5.97	290.8	3043	13.44	1	7.34	.
14	2.56	208	2884.37	13.48	1	7.42	.
15	0.87	106.09	2689.9	14.85	1	7.46	.
16	10.28	181.08	903.46	51.7	0	2.45	.
17	10.28	181.08	767.96	305.45	0	2.15	.
17'	167.15	184.28	790	305.45	0	2.16	.
18	167	267.39	1169.61	305.45	0	2.92	.
19	.	.	.	.	.	.	336.734
20	1	15	15.07	341.37	.	6.83	.
21	1	28.3	30.91	28.1	.	0.22	.
22	1	500	492.48	2.87	.	0.99	.
23	0.98	145.31	148.97	366.6	.	7.06	.

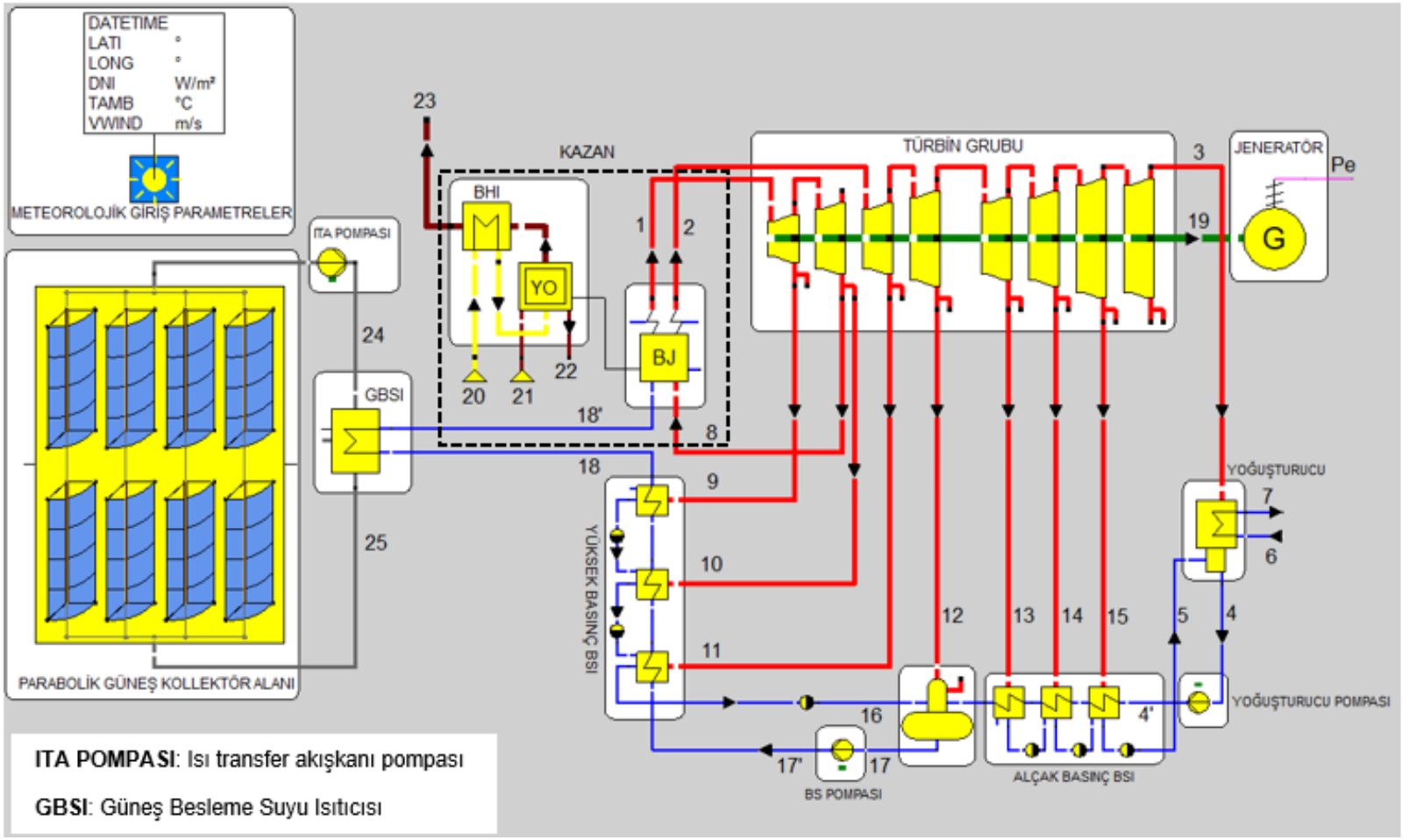
4.2.4. Güneş Enerjisi Destekli Kömür Yakıtlı Güç Santrali

Tez çalışmasının esas araştırma konusu olan Güneş Destekli Kömür Yakıtlı Güç Santrali (GDKGS)'nin şematik görünümü Şekil 4.6'da verilmiştir. Sistemde güneş alanı ile kazan (kömür santrali tarafı) arasındaki enerji alışverişi, su/ısı transfer akışkanı tipi (Güneş Besleme Suyu Isıtıcı: GBSI) bir ısı değiştirici aracılığıyla sağlanmaktadır. Böylece besleme suyu (Şekil 4.6, Akış 18) kazana girmeden hemen önce 100% kömür santrali durumuna göre daha fazla enerji absorbe eder. Artan her santigrat derece, yakıt talebinde bir azalmaya neden olmaktadır. Bu çalışmada sistemin çalışma modu yakıt tasarruf modu olarak seçilmiştir. Başka bir deyişle, herhangi bir besleme suyu ısıtıcısının GBSI ile değiştirilmesi söz konusu değildir. Bu nedenle herhangi bir güç artışı yapılmamakta olup tesisin gücü (330 MW) tüm işletme boyunca aynı kalmaktadır.

Bir parabolik güneş kollektör modülü, bir kollektör, bir izleme sistemi, bir alıcı ve bir metal çerçeve desteği içerir. Kollektör, yansıtıcı aynalardan yapılmıştır. Alıcı, kollektörün odak hattına yerleştirilmiş bir ısı emici metal tüptür ve rüzgar nedeniyle taşınımla ısı kaybını sınırlamak için bir cam tüple çevrelenmiştir. Bu çalışmada parabolik kollektörünün izleme ekseni, güneş enerjisi toplamayı maksimize etmek için kuzey-güney doğrultusunda yönlendirilip ve doğudan batıya güneşi izlemektedir. Kullanılan parabolik güneş kollektör teknolojisi Luz LS-3 (LS3)'tür ve özellikleri Tablo 4.3'te özetlenmiştir [34].

Tablo 4.3 Kollektörün optik parametreleri

Parametre	**Value**
Modül eni (m)	5.75
Modül açlık alanı (m2)	545
Modül uzunluğu (m)	100
Maksimum optik verimi (%)	0.8
Yoğunlaştırma oranı	82
Ayna yansıması	0.935
Alıcı emiciliği	0.96
Alıcı yayılımı	0.19



Şekil 4.6. Güneş-destekli kömür yakıtlı güç santralinin şematik görünümü

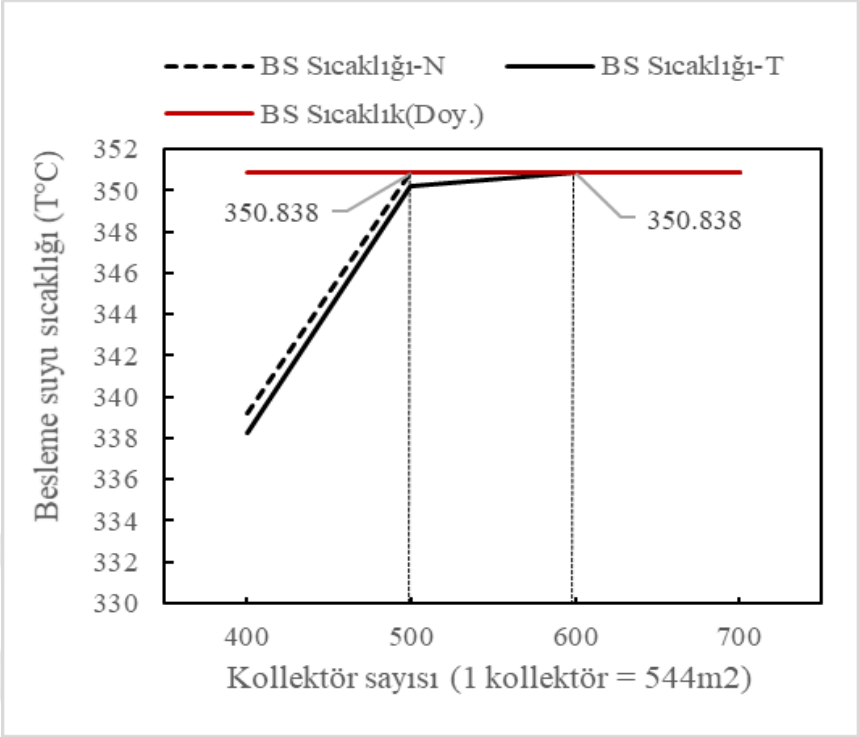
4.2.5. Güneş alanının boyutlandırılması

Güneş enerjisini kömürle çalışan elektrik santrallerine entegre etmek için bu çalışmada kullanılan metodoloji, güneş enerjisinin elektrik üretimine katkısını maksimuma çıkarmaktan oluşmaktadır. Besleme suyu, kazan için kabul edilebilir sıcaklık sınırı dahilinde güneş enerjisi yardımıyla ısıtılacaktır. Bu sınırlayıcı sıcaklığın, besleme suyunun doymuş (Ts-BS) buharının sıcaklığına eşit olduğu varsayılır. Böylece güneş enerjisinden maksimum oranda faydalanılır. Bu yaklaşım GDKGS'nin "yakıt tasarrufu" modunda çalışmasını sağlar.

Kazan besleme suyunun emebileceği maksimum güneş enerjisine karşılık gelen güneş alanı boyutunu belirlemek için, güneş alanı boyutu, kazan besleme suyunun doymuş sıcaklığına ulaşana kadar arttırılır. Besi suyu sıcaklığının kolektör sayısına göre değişimi Tablo 4.4'te verilen meteorolojik tasarım parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi kazan girişindeki suyun sıcaklığının doymuş sıcaklığı geçmemesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Sıcaklık yaklaşık 350.83°C'dir çünkü bu seviyede suyun sıvı kalması gerekir. Bu yaklaşıma dayalı olarak simülasyon sonuçları, kazan girişinde istenilen maksimum sıcaklığa ulaştığı maksimum kollektör sayısının Nijer için 500 ve Türkiye için 600 kollektör olarak belirlenmiştir. Seçilen kollektör sayısına göre güneş alanının ana tasarım parametreleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Meteorolojik dizayn parametreleri

Parametre	**Değer**
Tarih / Zaman	21 Haziran / Saat 12:00
Zaman dilimi	UCT+1
DNI [$W/m^{2]}$	800
Çevre Sıcaklığı [°C]	28.6
Rüzgar hızı [m/s]	3.6



Şekil 4.7. Kollektör sayısına göre besleme suyu sıcaklığın değişimi

Tablo 4.5. Güneş alan özellikleri

Özellikler	**Türkiye**	**Nijer**
Hizalama	Kuzey-Güney	Kuzey-Güney
Güneş takip sistemi (Tek Eksen)	Doğu-Batı	Doğu-Batı
Kollektör alanı (m2)	327000	272500
Sıra üzeri kollektör sayısı	100	100
Sıra sayısı	50	60
HTF giriş sıcaklığı (°C)	287	280
HTF çıkış sıcaklığı (°C)	390	390

4.3. Sistem Modellenmesi

Bu tez çalışmasında, STEAG Energy Services tarafından geliştirilen EBSILON®Professional 14 yazılımı kullanılarak %100 kömür yakıtlı ve güneş destekli kömür yakıtlı enerji santrallerinin analizleri yapılmıştır [32]. Tesis planlaması, tasarımı ve optimizasyonu için kullanılan bu simülasyon kodu, termodinamik döngü süreçlerinin potansiyel performans davranışını ve verimliliğini güvenilir bir şekilde hesaplar. Güneş destekli kömür yakıtlı enerji santrali, güneş alanı ve geleneksel kömür yakıtlı enerji

sistemi olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Enerji üretim sistemlerinde yıllık performansın değerlendirilmesi önemlidir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında sistemlerin günlük çalışma performansını analiz etmek amacıyla zamana bağlı simülasyon yapılmıştır. Sunulan tez çalışmasında EBSILON®Professional yazılımı, santralin her düğüm noktasındaki sıcaklıkları, kütlesel akış hızlarını ve entalpileri, buna ek olarak ısı kayıplarını, güneş enerjisini, güneş alanı verimini ve güneş alanıyla ilgili parametreleri saatlik olarak hesaplamaktadır. Programdan elde edilen veriler kullanılarak bu çalışmada ele alınan GDKGS sisteminin termodinamik, ekonomik ve çevresel performansları elde edilmiştir.

4.4. Sistemin Performans Değerlendirmesi

Tez çalışması kapsamında Türkiye (Çanakkale) ve Nijer (Agadez) bölgelerinde yer alan 330 MW kapasiteli %100 kömür yakıtlı güç santrali ve güneş enerjisi destekli kömür yakıtlı güç santrali (GDKGS) incelenmiştir. Ele alınan her iki sistem enerji, ekonomik ve çevresel açıdan kıyaslanmıştır.

Sistem, Parabolik Güneş Kolektörlerinin (PGK) yansıtıcı ve alıcı, Güneş Besleme Suyu Isıtıcı (GBSI) ve konvansiyonel kömür santrali olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde her ana bölümü, bir kontrol hacmi olarak kabul edilip ve termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlara dayanarak analizleri yapılmıştır. Söz konusu analiz için sisteme ilişkin aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

1. Sistem kararlı durum koşullarında çalışmaktadır.
2. Potansiyel ve kinetik enerjilerdeki değişimler sistem genelinde göz ardı edilmiştir.
3. Boru tesisatlarındaki basınç düşüşleri ihmal edilmiştir.
4. Performans hesaplamalarında yardımcı araçların (pompalar, kontrol sistemleri vb.) elektrik tüketimi dikkate alınmamıştır.
5. Isı akışı tek boyutlu olmaktadır.
6. Kollektör üzerindeki radyasyonların düzgün dağıldığı kabul edilmiştir.

4.4.1. Enerji performansının değerlendirilmesi

Sistemin güneş alanı bölümünden elde edilen yıllık güneş enerjisi üretimi Eşitlik 4.1 ile hesaplanır.

$$E_{güneş} = \sum_{n=1}^{8760} \left(E_{\text{GDKGS},n} - \frac{Q_{kazan,n}\eta_{ısıl,n}}{3600} \right) \quad (4.1)$$

burada n, yılın n'inci saatini temsil eder; $E_{GDKGS,n}$ GDKGS sisteminin saatteki toplam enerji çıkışıdır (kWh); $Q_{kazan,n}$ kazanın n'inci saatteki ısı yüküdür (kW), $\eta_{ısıl,n}$ genel sistemin n'inci saatteki verimliliğidir. Kömürün yanmasından kazan besleme suyuna aktarılan termal enerji $Q_{kazan,n}$ Eşitlik 4.2 ile belirlenebilir:

$$Q_{kazan,n} = \frac{m_{sh}(h_{sh,cikis} - h_{sh,giris}) + m_{rh}(h_{rh,cikis} - h_{rh,giris})}{\eta_{kazan}} \quad (4.2)$$

m_{sh} ana buharın kütlesel debisi (kg/s); $h_{sh,cikis}$ ve $h_{sh,giris}$, kazana ana buharın çıkış ve giriş entalpisi (kJ/kg); m_{rh}, ara kızdırma buharın kütlesel debisi (kg/s); $h_{rh,cikis}$ ve $h_{rh,giris}$ ara kızdırma buharının çıkış ve giriş entalpisi; η_{kazan} kazanın verimliliğini ifade eder.

Besleme suyuna aktarılan faydalı enerji ($Q_{güneş}$) Eşitlik 4.3 kullanılarak ile elde edilir.

$$Q_{günes} = m_{BS}(h_{BS,cikis} - h_{BS,giris}) \quad (4.3)$$

Burada, m_{BS}, ısı değiştiriciden akış gösteren besleme suyu kütlesel akış hızıdır; $h_{BS,çıkan}$ ve $h_{BS,giren}$ sırasıyla ısı değiştiricinin çıkış ve girişindeki besleme suyu entalpisidir.

Tez çalışmasında ele alınan güç santrallerinin çıkış gücü (P_{GDKGS}) 330 MW sabit değerine eşittir. Yakıt tasarrufu modunda, güneş anlık güç üretimi, $P_{güneş}$ (kW), aşağıdaki denklem'e göre hesaplanabilir [42].

$$P_{güneş} = P_{\text{GDKGS}} \cdot \frac{Q_{günes}}{Q_{günes} + Q_{kazan}} \quad (4.4)$$

GDKGS sisteminin güç çıkışındaki güneş payı Eşitlik 4.5'e göre ifade edilebilir:

$$\eta_{güneş-payı} = \frac{P_{güneş}}{P_{\mathrm{GDKGS}}} \tag{4.5}$$

Genel sistem termal verimliliği aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\eta_{\mathrm{GDKGS}} = \frac{P_{\mathrm{GDKGS}}}{(m_{kömür} \cdot NCV_{kömür})} \tag{4.6}$$

Hibrit sistemdeki kömür ve güneş ünitesinin ısıl verimleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\eta_{GDKGS-komurbolumu} = \frac{P_{GDKGS}}{(m_{kömür} \cdot NCV_{kömür})} \tag{4.7}$$

$$\eta_{SGDKGS-günesbolumu} = \frac{P_{günes}}{Q_{abs}} \tag{4.8}$$

Güneşten elektriğe dönüşüm verimliliği (η_{gunes}) besleme suyu tarafından absorbe edilen güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme performansını değerlendirmek için kullanılır ve Eşitlik 4.9 kullanılarak hesaplanır:

$$\eta_{güneş} = \frac{P_{güneş}}{Q_{güneş}} \tag{4.9}$$

Ekserji verimliliği, termodinamik sistemlerin tersinmezliğini değerlendirmek için sıklıkla kullanılır. GDKGS için ekserji verimi Eşitlik 4.10 ile hesaplanmıştır:

$$\eta_{ex,\mathrm{GDKGS}} = \frac{P_{\mathrm{GDKGS}}}{(m_{kömür} \cdot EX_{kömür}) + EX_{güneş}} \tag{4.10}$$

Burada $EX_{kömür}$ (kW) kömür ekserji miktarıdır ve Eşitlik 4.11 ile hesaplanır [43, 44]:

$$\mathrm{EX_{kömür}} = \left[1.0064 + 0.1519 \cdot \frac{\mathrm{X_H}}{\mathrm{X_C}} + 0.0616 \cdot \frac{\mathrm{X_O}}{\mathrm{X_C}} + 0.0429 \cdot \frac{\mathrm{X_N}}{\mathrm{X_C}}\right] \cdot \mathrm{m_{kömür}} \cdot \mathrm{NCV_{kömür}} \tag{4.11}$$

Burada, X_C, X_H, X_O ve X_N sırasıyla kömürdeki karbon, hidrojen, oksijen ve azotun ağırlık yüzdeleridir (%). Bu çalışmada kullanılan kömürün özellikleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

$EX_{güneş}$ güneş alanının ekserjisidir ve Eşitlik 4.12 ile hesaplanır [43, 45].

$$EX_{gunes} = DNI \cdot A_{net} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{T_{cevre}}{T_{güneş}} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_{cevre}}{T_{güneş}}\right)^4\right] \quad (4.12)$$

burada T_{cevre} çevre sıcaklığı, ve $T_{güneş}$ güneşin yüzey sıcaklığıdır ve değeri 6000 K'e eşittir.

Sadece güneş alanının ekserjisi ise Eşitlik 4.13 ile hesaplanır:

$$\eta_{ex,güneşalani} = \frac{Q_{abs}}{EX_{güneş}} \quad (4.13)$$

Tablo 4.6. Bu çalışmada kullanılan kömür özellikleri

Tanımlama	Sembol	Değer
Karbon (%)	C	76.7
Hidrojen (%)	H	4.3
Oksijen (%)	O	3
Kükürt (%)	S	0.86
Azot (%)	N	1.73
Nem (%)	W	3.1
Alt kalorifik değer (kJ/kg)	NCV	30839.18

4.4.2. Ekonomik performansının değerlendirilmesi

Güneş enerjisi maliyet analizi, güneş enerjisi sistemlerinin kurulumundan işletilmesine kadar olan tüm maliyetleri dikkate alır. Bu maliyetler arasında güneş panelleri ve diğer bileşenlerin maliyeti, montaj ve kurulum ücretleri, bakım ve işletme giderleri bulunur. Güneş enerjisi sistemlerinin maliyeti genellikle birkaç faktöre bağlıdır. Bunlar arasında güneş paneli teknolojisi, sistem boyutu, yerel güneş ışığı koşulları, elektrik fiyatları ve devlet teşvikleri gibi faktörler yer alır. Güneş enerjisi maliyet analizinde, sistem ömrü boyunca beklenen gelirler ve tasarruflar da dikkate alınır. Bu, yatırım getirisini ve geri ödeme süresini belirlemede önemli bir rol oynar.

Güneş enerjisi maliyetleri azalma gösterse de sistem kurulum maliyeti hala yüksek olabilir. Ancak uzun vadede elektrik faturalarında önemli tasarruflar sağlayabilir ve çevresel etkileri azaltabilir. Güneş sistemlerinin enerji kaynağı maliyeti olmasa bile bu enerji kaynağı olan güneş ışığından yararlanmak için gerekli ekipmanın bir maliyeti vardır. Güneş enerjisi sistemleri genellikle yüksek başlangıç yatırım maliyetleri ve düşük işletme maliyetleri ile karakterize edilirler. Bu nedenle, güneş enerjisini içeren bir projeye başlamadan önce, başlangıç yatırımını tahmin etmek ve bu yatırımın maliyetini karşılamak için ne kadar süre gerektiğini bilmek gereklidir. Bu tez çalışmasında, yatırımların geri ödeme süresi hesaplanmıştır ve güneş enerjisinden kaynaklanan emisyon tasarrufları ile elektrik üretim gelirleri hesaplamalara dahil edilmiştir. Son olarak, güneşten elektrik üretiminin birim fiyatını belirlemek için Eşitlik 4.14'te verilen eşitliği kullanılarak elektriğin kademelendirilmiş birim maliyeti (LCOE) bulunmuştur:

$$LCOE = \frac{(I_{yatırım} \times CRF) + O\&M}{E_{güneş}} \tag{4.14}$$

Burada $E_{güneş}$ yıllık güneş enerjisi üretimi, $I_{yatırım}$ toplam güneş alanı yatırım maliyeti ve O&M ise yıllık işletme ve bakım harcamasıdır. CRF satırım geri kazanım faktörünü temsil eder ve Eşitlik 4.15 ile hesaplanır:

$$CRF = \frac{r \cdot (r+1)^D}{(r+1)^D - 1} \tag{4.15}$$

burada r iskonto oranı ve D güneş santralinin ömrüdür. Santralin kurulmasından sonra, ilk yılın sonunda beklenen gelirlerin Eşitlik 4.16 ile belirlenir [46].

$$I_{gelir} = \left(LCOE \times E_{güneş}\right) + \left(T_y \times f_y\right) + (K_{co2} \times F_{co2}) - C_{O\&M} \tag{4.16}$$

T_y yıllık tasarruf edilen yakıt miktarı, f_y yakıtın birim fiyatı, K_{co2} yıllık tasarruf edilen CO_2 emisyon miktarı ve f_{co2} CO_2 emisyonunun birim fiyatıdır.

Yatırımın geri ödeme süresi, aşağıdaki denklem ile bulunur [46]:

$$I_{yg} = \frac{I_{yatırım}}{I_{gelir}} \tag{4.17}$$

Tez çalışmasında maliyet analizlerinde kullanılan başlangıç yatırımı ve güneş alanı ile ilgili parametreleri değerleri Tablo 4.7'de listelenmiştir.

Tablo 4.7. Güneş alanının yatırım maliyet verileri

Tanımlama	Birim	Değeri
İlk yatırım maliyeti (yatırım)		
Güneş alanı maliyeti	$\$/m^2$	240
Yağ-Su ısı eşanjörünün maliyeti	\$/kW	120
İndirekt maliyet		
Mühendislik ve inşaat	% of DC	15
Proje, arazi, yönetim	% of DC	3.5
İşletme ve bakım	% of DC	1.5
İskonto oranı	%	5
Santralin sistem ömrü	Yıl	30

4.4.3. Çevresel performansının değerlendirilmesi

Güneş termal enerjisi ve kömür yakıtlı enerji santralleri elektrik üretiminde önemli rol oynayan farklı enerji kaynaklarıdır. Bu iki kaynağın entegrasyonu, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir enerji üretimi için potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle güneş termal sistemlerinin kömürle çalışan elektrik santrallerine entegre edilmesinin çevresel etkilerinin detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Ve bu avantajlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir:

i. Sera gazı emisyonlarının azaltılması: Kömürle çalışan enerji santralleri, CO_2 ve diğer kirleticilerin ana kaynaklarından biridir. Güneş termal sistemlerinin entegrasyonu temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağı sağlayarak bu emisyonları azaltabilir.
ii. Enerjinin çeşitlendirilmesi: Güneş termal enerjisinin entegre edilmesi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve bir ülke veya bölgenin enerji kaynağını çeşitlendirerek enerji güvenliğini artırır.
iii. Fosil yakıt tüketiminin azaltılması: Güneş termal enerjisinin kömürle çalışan termik santrallerle birlikte kullanılması, kömür ve diğer fosil yakıtların tüketimini azaltarak doğal kaynakların korunmasına ve iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlayabilir.
iv. Enerji verimliliğinin artırılması: Enerji santrallerinin genel verimliliğini artırmak için güneş enerjisi termal sistemleri entegre edilebilir. Örneğin, güneş enerjisi

santrallerinden kaynaklanan atık ısı, kömür yakıtlı enerji santrallerinin kazanlarındaki suyun ön ısıtılmasında kullanılabilir, böylece buhar üretmek için gereken yakıt miktarı azaltılabilir.

v. İstihdamın ve ekonomik kalkınmanın teşvik edilmesi: Güneş enerjisi termal projelerinin uygulanması, tesislerin inşası, işletilmesi ve bakımında yerel istihdam yaratabilir. Ayrıca bu projelerin bulunduğu bölgelerde ekonomik kalkınmayı da teşvik edebilir.

vi. İklim değişikliği risklerinin azaltılması: Güneş enerjisi termal sistemlerinin entegrasyonu, sera gazı emisyonlarını azaltarak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik ederek iklim değişikliğinin sıcak hava dalgaları, kuraklık ve fırtına gibi olumsuz etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunabilir.

Bu noktalar, güneş enerjisi termal sistemlerinin kömür yakıtlı enerji santralleri gibi geleneksel enerji santrallerine entegre edilmesinin bazı potansiyel faydalarını vurgulamaktadır. Günümüzde, tüm enerji üretim teknolojileri arasında, kömürle çalışan enerji santralleri hala en fazla karbondioksit salınımına neden olan teknolojidir. GDKGS sistemleri kömür tüketim oranını ve CO_2 emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir. Kömür tüketimi ve CO_2 emisyonu sırasıyla Eşitlik 4.18 ve 4.20 ile hesaplanabilir.

$$m_{kömür,GDKGS} = \frac{3.6Q_{kazan}}{1000NCV_{kömür} \times \eta_{kazan}} \tag{4.18}$$

Bir GDKGS sistemi için yakıt tasarrufu modunda, yıllık kömür tasarrufu Eşitlik 4.19 ile hesaplanabilir:

$$\Delta m_{tasarruf} = m_{kömür,ref} - m_{kömür,\mathrm{GDKGS}} = \sum_{n=1}^{8760} \frac{Q_{kazan,\mathrm{ref},n} - Q_{kazan.n}}{\eta_{kazan} NCV_{kömür}} \tag{4.19}$$

Burada $m_{kömür,ref}$ %100 kömür santralinin yıllık kömür tüketimi, $m_{kömür,\mathrm{GDKGS}}$ GDKGS sisteminin yıllık kömür tüketimi, $Q_{kazan,\mathrm{ref},n}$ %100 kömür santralinin n. saatinde kazan ısı yüküdür.

$$m_{CO2} = 3.664 \cdot m_{kömür} \cdot X_C \tag{4.20}$$

Burada, X_C yakıttaki karbonun ağırlık yüzdesidir.

5. BÖLÜM
SAYISAL SONUÇLAR

5.1. Duyarlık Analizi

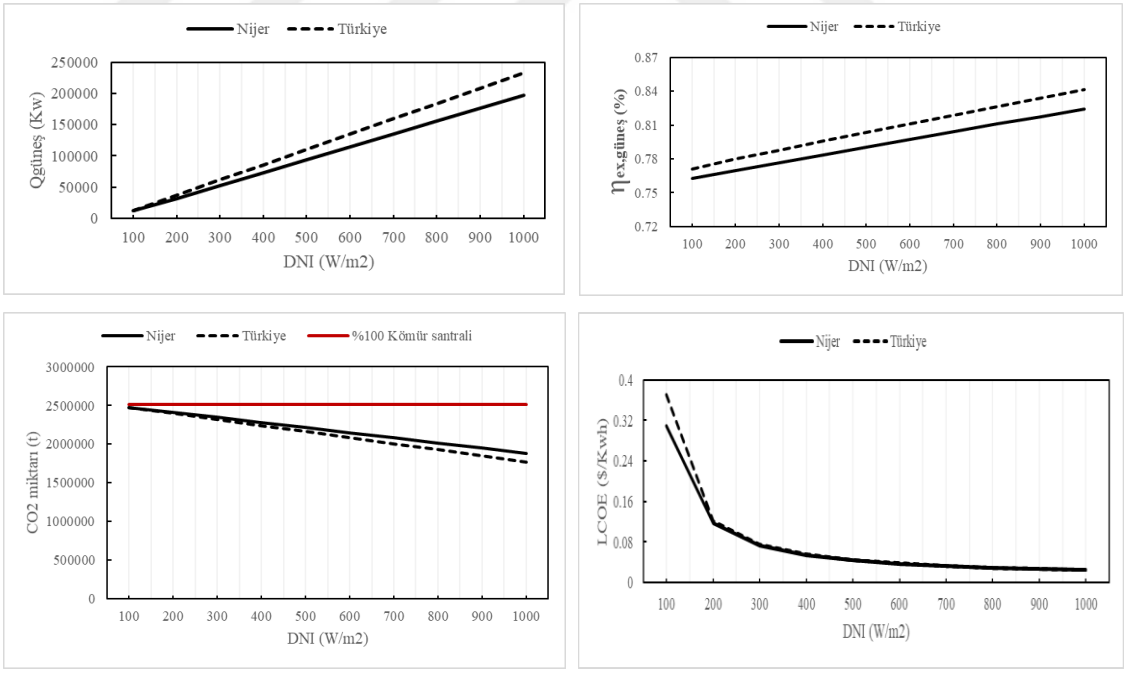
Mühendislik alanında duyarlılık analizi, bir sistem veya sürecin çeşitli girdi parametrelerinin veya değişkenlerinin değişikliklerine nasıl tepki vereceğini inceleyen bir yöntemdir. Bu analiz, belirli bir çıktı veya sonuç üzerindeki etkileri değerlendirerek, sistemin veya sürecin hassasiyetini belirlemeye yardımcı olur. Duyarlılık analizi, tasarım kararları veya sistem optimizasyonu gibi mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynar, çünkü belirsizliklerin veya değişkenlerin etkilerini anlamak ve bu etkileri azaltmak için stratejiler geliştirmeye yardımcı olabilir. Bahsedilen analiz en önemli parametrelerden DNI'ye dayanmaktadır.

Bölüm 4.2.5'de bahsedildiği gibi analiz sırasında kolektör sayısı tasarım koşullarına göre sabit olarak Çanakkale için 600 ve Agadez için 500 olarak ele alınmıştır. Analizdeki çıktı değerleri yıllık değerlerdir. Analizin amacı, sistemin performansını duyarlığını görmek için DNI'yı 100 ila 1000W/m^2 arasında değiştirilmektir. Gözlemlenecek performans parametreleri güneş termal gücü, güneş ekserji verimi, GDKGS sisteminin kömür tüketimi ve LCOE'dir.

Şekil 5.1'de LCOE hariç tüm parametrelerin güneş ışınımı yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak mükemmel bir şekilde doğrusal bir şekilde geliştiğini görüyoruz. 100 ila 1000W/m^2 için güneş ısıl gücü Çanakkale için 11625 ile 232888 kW arasında değişirken Agadez için 11561 ile 197132 kW arasında değişmektedir. DNI'daki artış, güneş sistemindeki ısı miktarında genel bir artış ve dolayısıyla ekserji veriminde bir artış anlamına gelir. 1000W/m^2 DNI değerinde güneş sisteminin ekserji verimi Çanakkale ve Agadez için sırasıyla %84 ve %82'ye ulaşmaktadır.

DNI'nın artmasıyla birlikte güneş enerjisi sisteminin GDKGS'ye katkısı kazanda yakılan kömürün azalmasına neden olur. Bu da doğal olarak CO_2 emisyonlarında önemli bir düşüşe neden oluyor. DNI'nın 100'den 1000W/m^2'ye değişmesi durumunda GDKGS'den kaynaklanan CO_2 emisyonları Çanakkale için 2477519 tondan 1768339 tona düşmekte, Agadez için 2476898 tondan 1883198 tona değişmektedir.

LCOE, diğer parametrelerden farklı olarak DNI değeri 100 W/m^2'den 200W/m^2'ye artarken LCOE değeri lineer olarak azalırken DNI 200 'den 1000 W/m^2'ye artarken exponansiyel olarak azalmaktadır. LCOE 100'den 200W/m^2'ye keskin bir düşüş göstererek Çanakkale için 0.36'dan 0.12$/kWh'ye, Agadez için ise 0.31'den 0.11$/kWh'ye çıktı. 200 W/$m^2$'den 1000 W/$m^2$'ye kadar olan bu keskin düşüşün ardından LCOE biraz değişiyor. DNI değeri 200W/m^2'de Çanakkale ve Agadez için LCOE'nin neredeyse yaklaşmaktadır. Sonuç olarak şunu söyleyebiliriz ki 200W/m^2'den itibaren LCOE değeri DNI değerinden hemen hemen bağımsız hale gelmektedir.



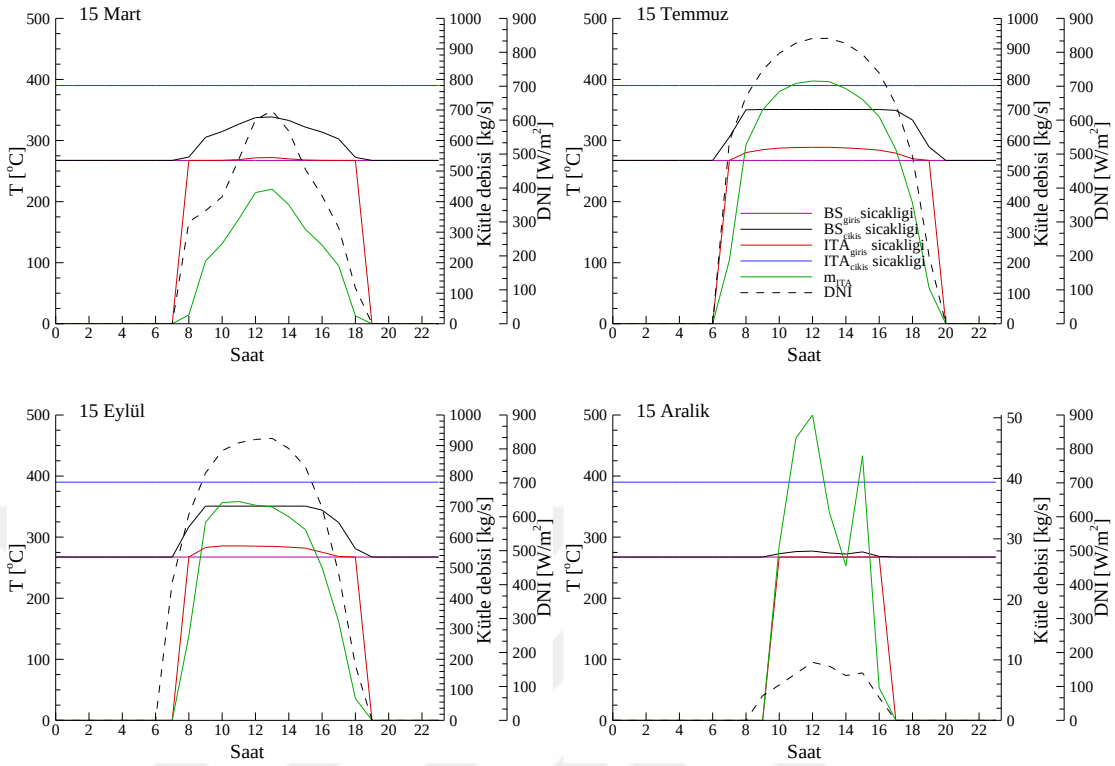
Şekil 5.1. DNI'ya göre sistemin tepkisi

5.2. Sistemin Performansının Aylara Göre Değişimi

Güneş alanının işletme performansı zaman içinde DNI'nın değişimine bağlı olarak her zaman değiştiğinden, termodinamik, ekonomik ve çevresel performans parametrelerinin

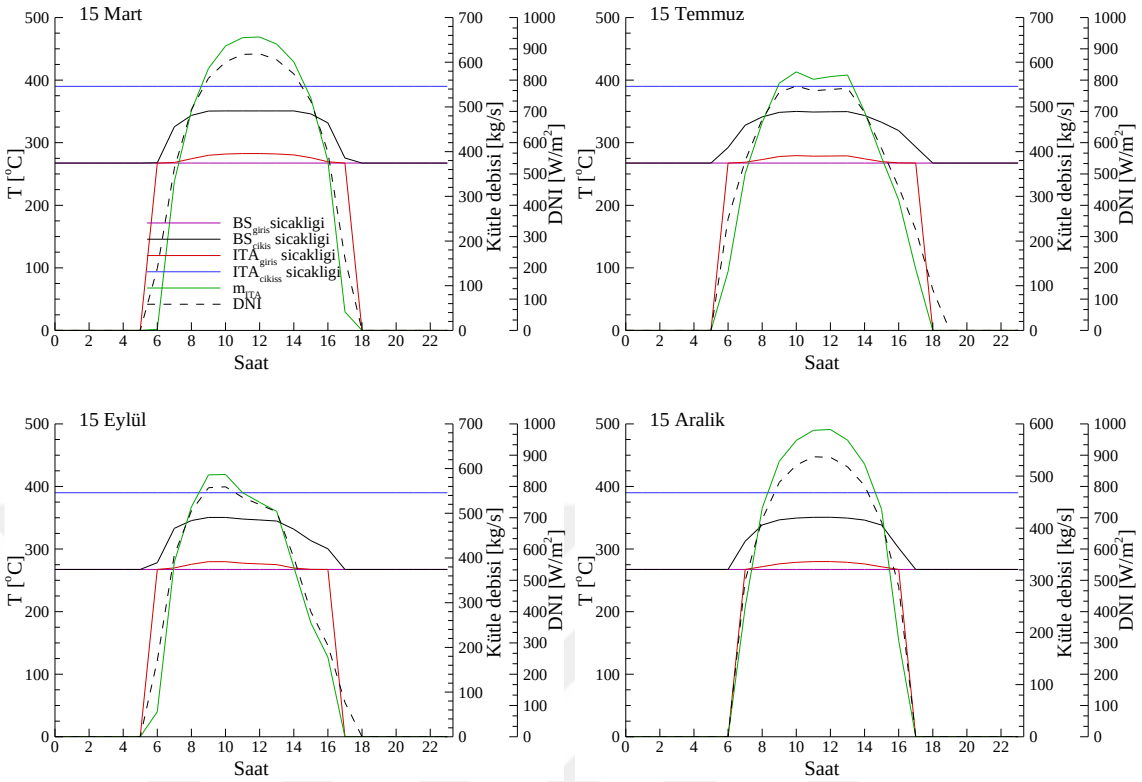
dinamik varyasyonlarının analizi, bir GDKGS sisteminin gerçek işletme koşullarını anlamak için çok önemlidir. Bu nedenle, incelenen GDKGS sisteminin davranışı önce PGK alanına (Sayısına) göre sonra DNI'ya göre analiz edilmiştir. Ardından, günlük ve aylık olarak yıl boyunca dinamik bir analiz yapılmıştır.

Güneş enerjisi santraline güç sağlayanın, güneş kolektörleri tarafından yakalanan güneş ışınımından elde edilen enerjinin termal enerjiye dönüştürüldüğünü hatırlamak önemlidir. Şekil 5.2 kazan besleme suyunun giriş ve çıkış sıcaklıklarını, ısı transfer akışkanının giriş ve çıkış sıcaklıklarını, ısı transfer akışkanının kütlesel debisini ve güneş ışınımını birbirine bağlayan ilişkiyi göstermektedir. DNI değiştikçe tüm parametrelerin değişim profilleri de değişir. İster Çanakkale ister Agadez için, GBSI girişinde besleme suyunun sıcaklığı (267.39°C) ve güneş alanın çıkışında ITA'ın sıcaklığı (390°C) sabit tutularak yılın periyotundan bağımsız olarak yukarıda bahsedilen tüm parametrelerin DNI'ya bağlı olarak değişimini göstermektedir. Ancak, bu değişim mevsimlere bağlıdır. Burada mevsim değişimlerinin etkisini göstermek için Çanakkale (bkz. Şekil 5.2) ve Agadez (bkz. Şekil 5.3) için yukarıda bahsedilen parametrelerin değişimi 15 Mart, 15 Temmuz, 15 Eylül ve 15 Aralık için çizilmiştir. Şekil 5.2'den görüldüğü gibi, Çanakkale için, 15 Temmuz ve 15 Eylül'de, DNI pik değeri 800 ile 900 W/m^2 arasında değişirken, 15 Mart'ta yaklaşık 600W/m^2 ve 15 Aralık'ta çok düşük olan 100 ile 200W/m^2 arasında değişir. Bu şekilde, en güneşli günlerde güneş alanında taşınan ITA miktarı maksimum olarak yaklaşık 800 kg/s'ye (15 Temmuz) ve yaklaşık 720 kg/s'ye (15 Eylül) ulaşır. Aynı günler için ITA giriş sıcaklığı ve BS çıkış sıcaklığı, sırasıyla yaklaşık 300°C ve 350°C olan yüksek pik değerlere ulaşır. 15 Mart gibi ortalama bir DNI'nın olduğu günlerde, ITA giriş ve BS çıkış sıcaklıklarında orta değişimler görülmektedir. Güneş ışınlarının çok düşük olduğu 15 Aralık gibi günlerde, ITA giriş sıcaklığı BS çıkış sıcaklığına doğru eğilim gösterir. Güneş ışınlarının çok düşük olduğu 15 Aralık gibi günlerde, gün boyunca ITA giriş sıcaklığı BS çıkış sıcaklığına doğru eğilim gösterir ve ITA akışı 26 ile 50 kg/s arasında dalgalanır.



Şekil 5.2. Çanakkale için seçilen tarihlerde sistem parametrelerin anlık değişimi

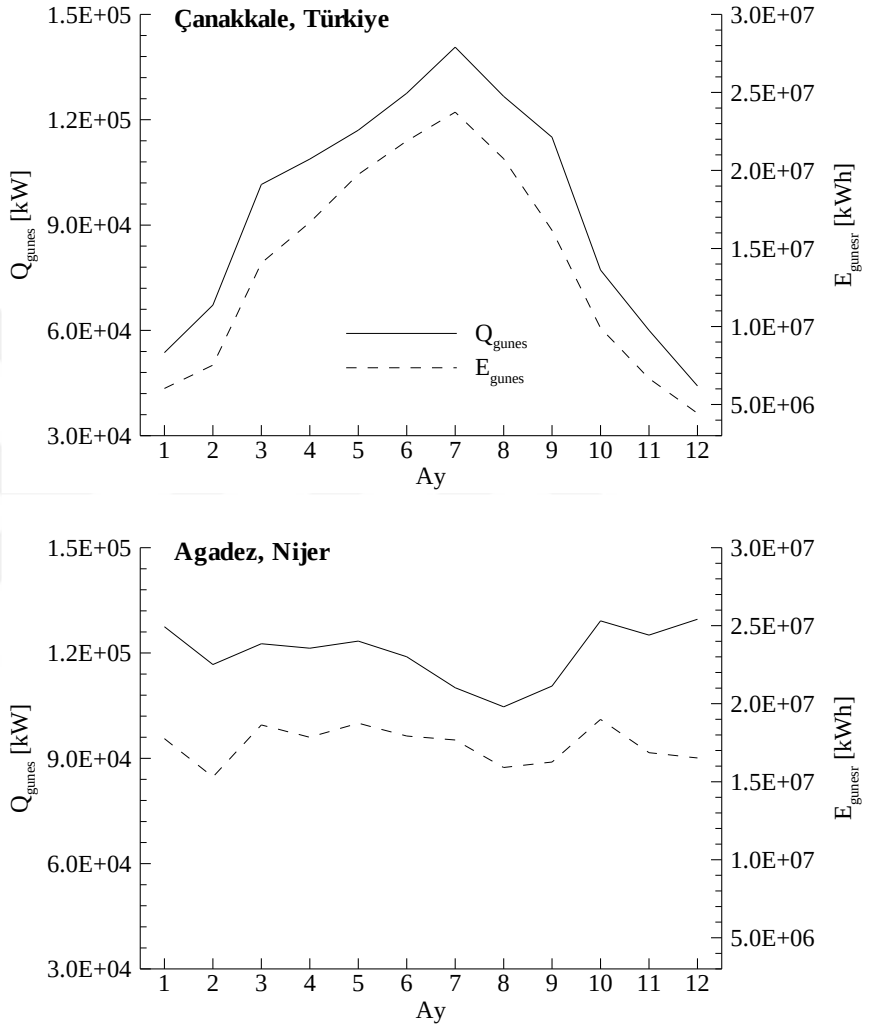
Çanakkale'nin aksine, Agadez'de güneş ışınımı zaman içinde oldukça dengeli bir şekilde dağılmıştır. Şekil 5.3 dört tipik gün (15 Mart, 15 Temmuz, 15 Eylül ve 15 Aralık) üzerindeki yapılan simülasyon öğlen saatlerinde yaklaşık 900W/m^2'ye ulaşan bir pik ışınım şiddeti en güneşli güne (15 Mart) aitken, en düşük güneşli güne (15 Temmuz) ait bir pik ışınım şiddeti yaklaşık 800W/m^2'ye ulaştığını gösterilmektedir. Bu dört gün boyunca, Çanakkale için olduğu gibi Agadez için de, DNI profil varyasyonuna göre tüm diğer parametrelerin varyasyon profillerinin değiştiği görülmektedir. DNI ne kadar yüksekse, BS çıkış ve ITA giriş sıcaklıkların ve ITA akışının da o kadar yüksek olduğu gözlemlenmektedir. DNI'nın en yüksek olduğu gün (15 Mart) için öğlen saatlerinde ITA akışı 650 kg/s'ye ulaşır. Aynı saatte BS çıkış ve ITA giriş sıcaklıkları maksimum değerlerine 355°C ve 380°C olarak ulaşır. En az güneşli günün öğle saatlerinde (15 Temmuz), ITA akışı 575 kg/s'ye ulaşır. Aynı saatte BS çıkış ve ITA giriş sıcaklıkları maksimum değerlerine sırasıyla 350°C ve 280°C olarak ulaşır.



Şekil 5.3. Agadez için seçilen tarihlerde sistem parametrelerin anlık değişimi

Anlık güneş enerjisi, üretilen güneş enerjisiyle orantılı olduğundan, iki büyüklüğün her zaman aynı profili benimsediği oldukça açıktır. Güneş kolektörleri tarafından toplanan anlık güneş gücü, üretilen güneş enerjisiyle orantılı olduğundan, tüm yıl boyunca gelişim profillerinin neredeyse benzer değişim göstermesi oldukça normaldir. Şekil 5.4, Çanakkale ve Agadez için güneş enerjisi ve anlık gücü aylara göre dağılımını göstermektedir. Agadez için Ekim ve Aralık aylarında yaklaşık 102MW daha yüksek bir anlık güneş gücü üretimini gösterir, ancak Ekim ayında yaklaşık 19GWh olan maksimum güneş enerjisi üretimine Aralık ayında (yaklaşık 16GWh) kıyasla çok uzaktır. Bu, Ekim ayının, Aralık ayına göre 48 saat daha fazla güneşlenme saati içermesi nedeniyle güç ve enerji arasındaki mantıklı olmayan görünen ilişkiyi açıklar. Çanakkale için bu üretim pikleri, yaklaşık 141 MW güç ve 24GWh enerji üretimiyle Temmuz ayında gözlemlenir. Agadez için güneş enerjisi üretimi için en az elverişli ay 15.3GWh üretim ile Şubat ayıdır ve Çanakkale için en az elverişli ay 4.4GWh üretim ile Aralık ayıdır. Çanakkale'de daha yüksek pik değerler kaydedilse de, aylık ortalama güç üretimi ve enerji üretimi miktarları

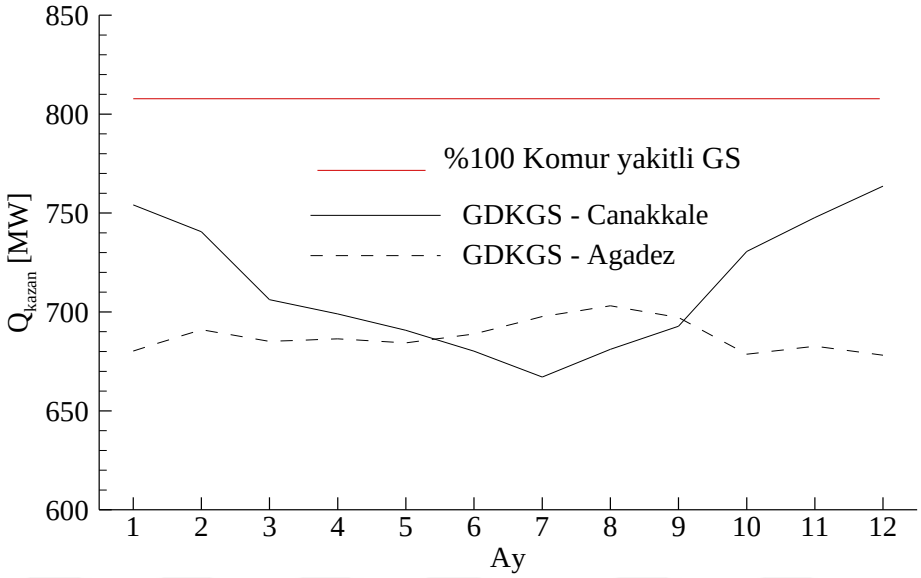
Agadez için daha yüksektir. Agadez için yıllık enerji üretimi 208GWh'ye ulaşırken, Çanakkale için 168GWh'dir.



Şekil 5.4. Güneşten elde edilen enerji ve gücün aylara göre değişimi

Güneş enerjisi sistemi ve kömür yakıtlı santralinin hibridleştirilmesinin avantajları, Şekil 5.5'e bakılarak net bir şekil anlaşılabilir. Bu şekil kazanın termal yükünün aylara göre değişimi göstermektedir. Bu parametrenin değişimi boyunca, kazanda yakılan kömür miktarındaki değişim vurgulanmaktadır. Agadez için, hibridleştirmenin ardından kazanın termal yük profili, Ağustos ayı (düşük DNI) dışında neredeyse sabit olduğu görülmektedir. Hibridleşme öncesi ve sonrası arasında yaklaşık 100MWth bir düşüş farkı olduğu net bir şekilde görülmektedir. Çanakkale için, en güneşli ay olan Temmuz ayında,

kazanın termal yükünde yaklaşık 140MWth net bir azalma olduğu görülmektedir. Termal yükteki bu önemli azalma, kömür yanmasından kaynaklanan ısının bir kısmının güneş enerjisinden gelen ısı ile değiştirilmesinden kaynaklıdır.

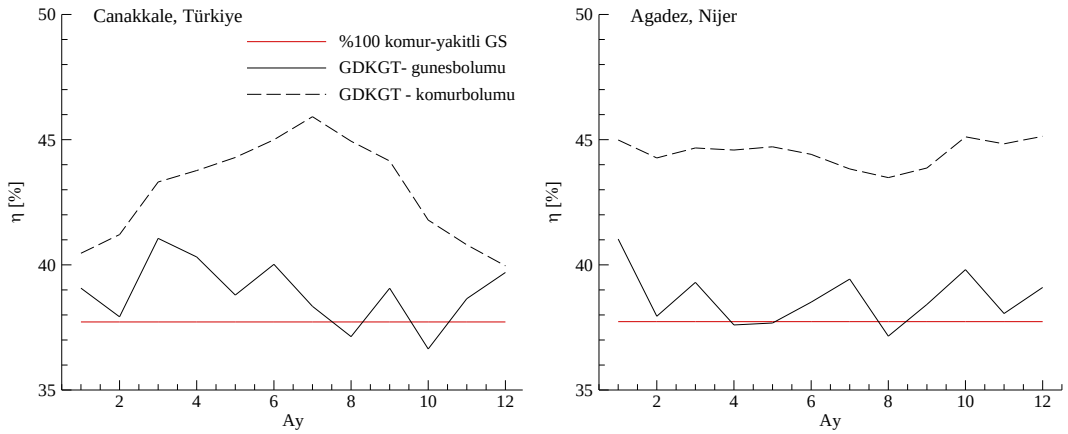


Şekil 5.5. Kazan termik yükünün aylara göre değişimi

GDKGS sistemlerinin önemli avantajlarından biri, %100 kömürlü santralin termal veriminde önemli ölçüde artış sağlamasıdır. Şekil 5.6'da %100 kömür yakıtlı ve GDKGS'nin aylara göre verimlerinin değişimi gösterilmiştir. GDKGS verimleri gösterilirken güneş alanının verimi ve GDKGS'de kömür bölümünün verimleri ayrı ayrı incelenerek çizilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi %100 kömürlü santralin verimi yaklaşık %37.7'dir. GDKGS için kömür bölümünün termal verimi, Çanakkale için Temmuz ayında %46'ya ve Agadez için Ekim ve Aralık aylarında %45 civarına çıkmaktadır. Tüm yıl boyunca, Çanakkale için %39.7 ile %46 arasında büyük dalgalanmalar gösterirken, Agadez için %43.5 ile %45 arasında çok az dalgalanmaktadır.

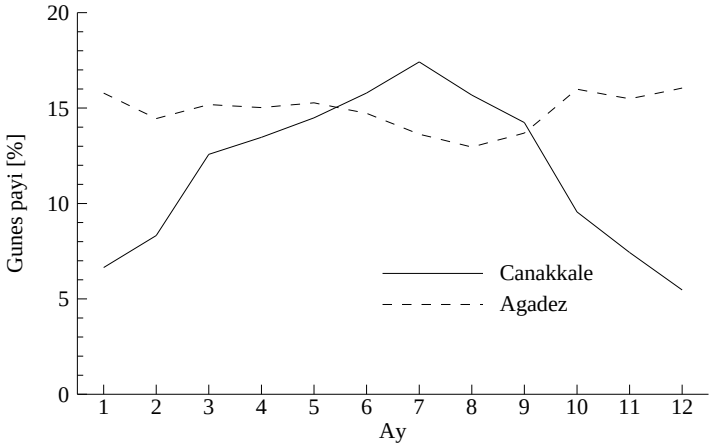
Güneş bölümü verimine gelince, Çanakkale için %36.5 ile %41.1 arasında dalgalanırken, Agadez için %37 ile %41 arasında dalgalanmaktadır. Şekil incelendiğinde Özellikle Çanakkale için kömür bölümünün veriminin değişimi ile güneş bölümünün veriminin değişimleri şekilsel olarak benzer değişim göstermemektedir. Bundan dolayı artış oranları arasında matematiksel bir oran söylemek mümkün değildir. Ancak, yıl boyu ortalama

değerlerine baktığımızda hem güneş bölümünün hem kömür bölümünün veriminin %100 kömür yakıtlı GS'ye göre arttığı söylenebilir.



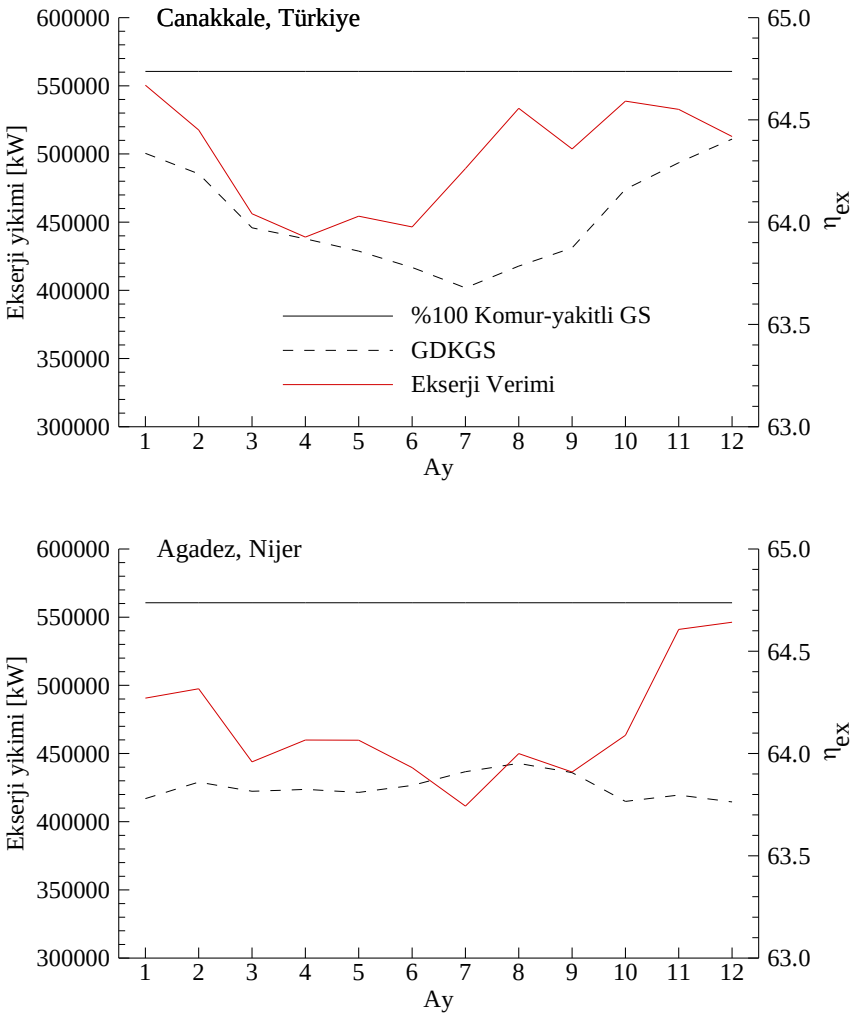
Şekil 5.6. Aylara göre güneş sistem ve GDKGS'nin ısıl verimlerinin değişimi

GDKGS'in çıkış gücüne (330MW) katkıda bulunan güneş enerjisinin oranı, güneş payı diye adlandırılmıştır. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi, Çanakkale için bu pay yıl içerisinde en düşük Aralıkta %5.4 ve en yüksek Temmuzda %17.5 arasında kalacak şekilde değişir. Agadez için ise güneş payı yıl içerisinde %13 ile %16.2 arasında değişmektedir. Bu ekstremumlar, DNI yüksek olduğunda güneş payının de yüksek olduğu ve tersinin de geçerli olduğu gerçeğiyle açıklanır, bu durum hem Çanakkale hem de Agadez için geçerlidir.



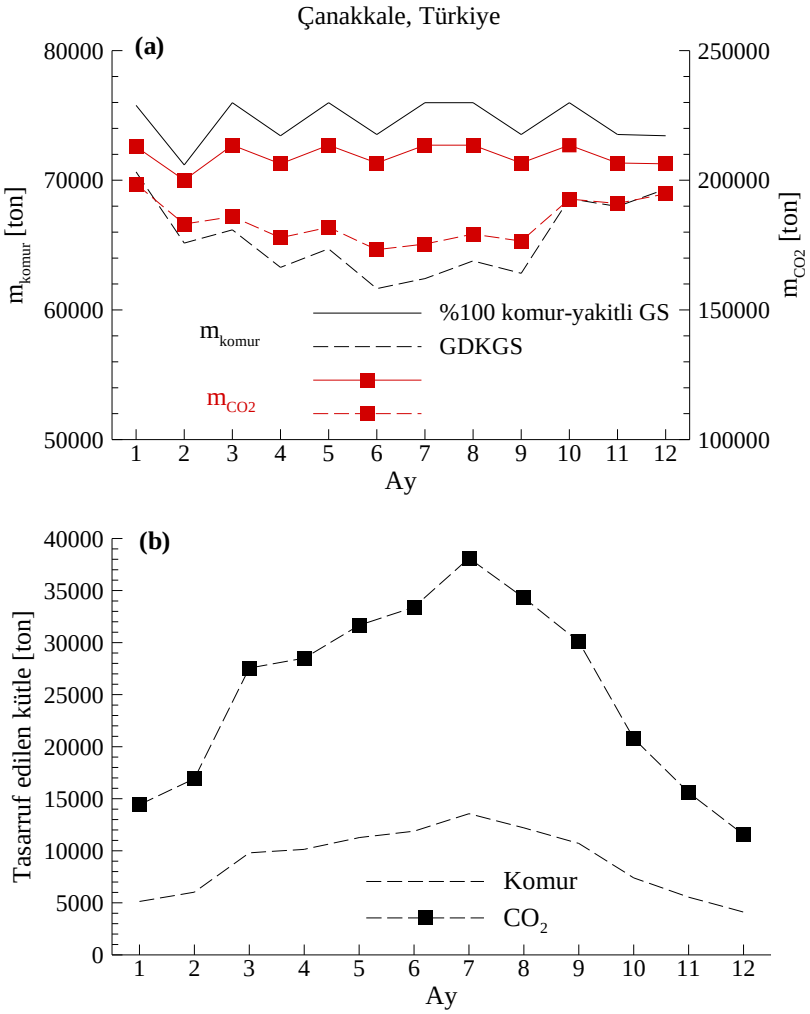
Şekil 5.7. Aylara göre güneş payının değişimi

Şekil 5.8'de gösterildiği gibi, güneş enerjisinin kömür santraline entegrasyonundan sonra ekserji yıkımı hem Çanakkale hem Agadez için önemli ölçüde iyileşmiştir. Bunu Çanakkale için Temmuz ayında, Agadez için ise Aralık ayında güneş enerjisi üretiminin uygun olduğu görmek mümkündür. Bu çok güneşli aylarda kömür tüketimi önemli ölçüde düşmektedir. Bu azalma aslında santraldeki ekserji yıkımının büyük ölçüde kömürün yanmasından kaynaklı olduğunu göstermektedir. GDKGS ekserji verimine gelince, ekserji yıkımıyla ilişkisini daha iyi anlamak için Agadez durumunun incelenmesi gerekmektedir. Ekseri yıkımı arttığında ekserji verimin azaldığını ve bunun tersinin de geçerli olduğu görülmektedir. Son olarak sisteme ne kadar çok güneş enerjisi dahil olursa sistemin veriminin o kadar arttığını söylenebilir.

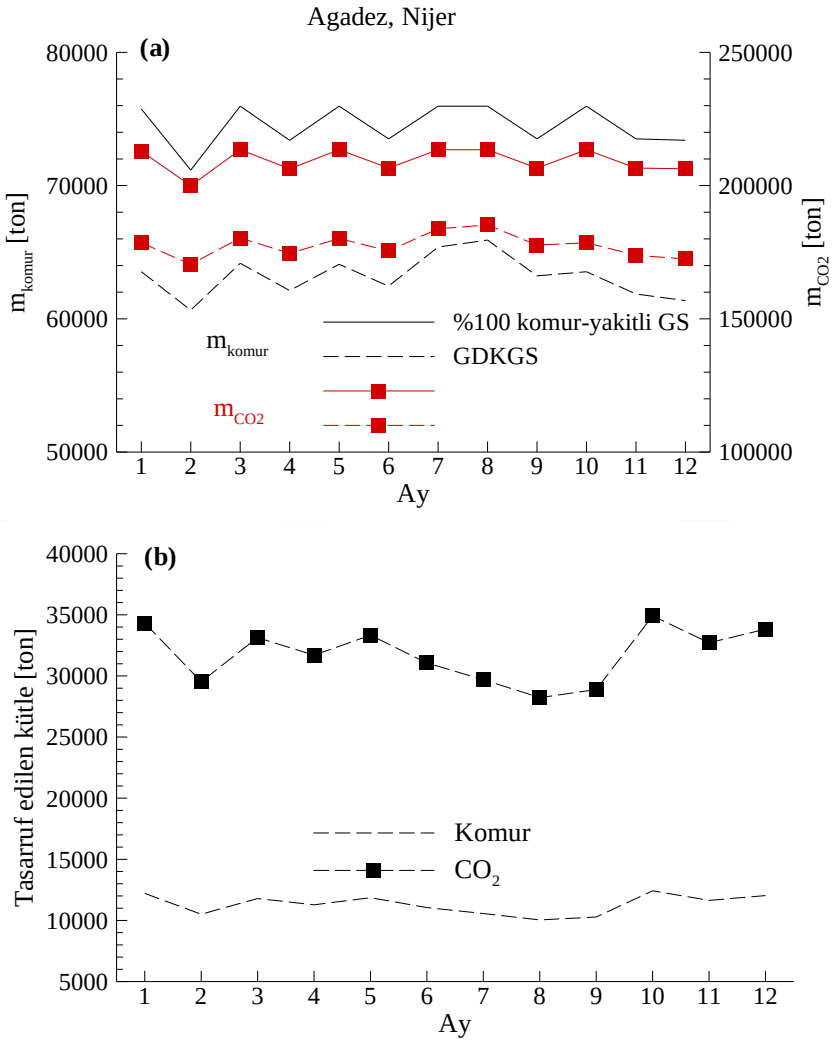


Şekil 5.8. Aylara göre ekserji yıkımının dağlımı

Şekil 5.9 ve 5.10 sırasıyla Çanakkale ve Agadez için %100 kömür yakıtlı GS ve güneş sisteminin dahil edildiği GDKGS için kömür tüketimi, CO_2 emisyonlarını ve GDKGS'nin kullanılması durumunda %100 kömür yakıtlı GS'ye göre tasarruf edilen kömür ve CO_2 kütlesel miktarlarının aylara göre değişimini göstermektedir. Kömür santralinin güneş enerjisi tarafından etkilenmeden önce, kömür tüketiminde ortalama olarak sabit bir değişim görülmektedir. Bu, kömür santralin zaman içinde sabit bir güç üretmesi nedeniyle kömür tüketiminin de sabit kalmasıyla açıklanabilir. Ancak, Çanakkale veya Agadez için, güneş enerjisi devreye girdiğinde hem kömür tüketiminin hem de CO_2 emisyonlarının azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.9b ve Şekil 5.10b'den güneş sisteminin kömür santraline hibridasyonundan sonra kömür tüketimi ve CO_2 emisyonlarının azalma değişimini göstermektedir. Çanakkale için, kömür tasarrufu aylık ortalama 8982 ton ve kurtarılan CO_2 emisyonu ise aylık ortalama 252424 ton olarak ortaya çıkmaktadır. Agadez için, kömür tasarrufu aylık ortalama 11308 ton ve kurtarılan CO_2 emisyonu aylık ortalama 31779 ton bulunmaktadır.

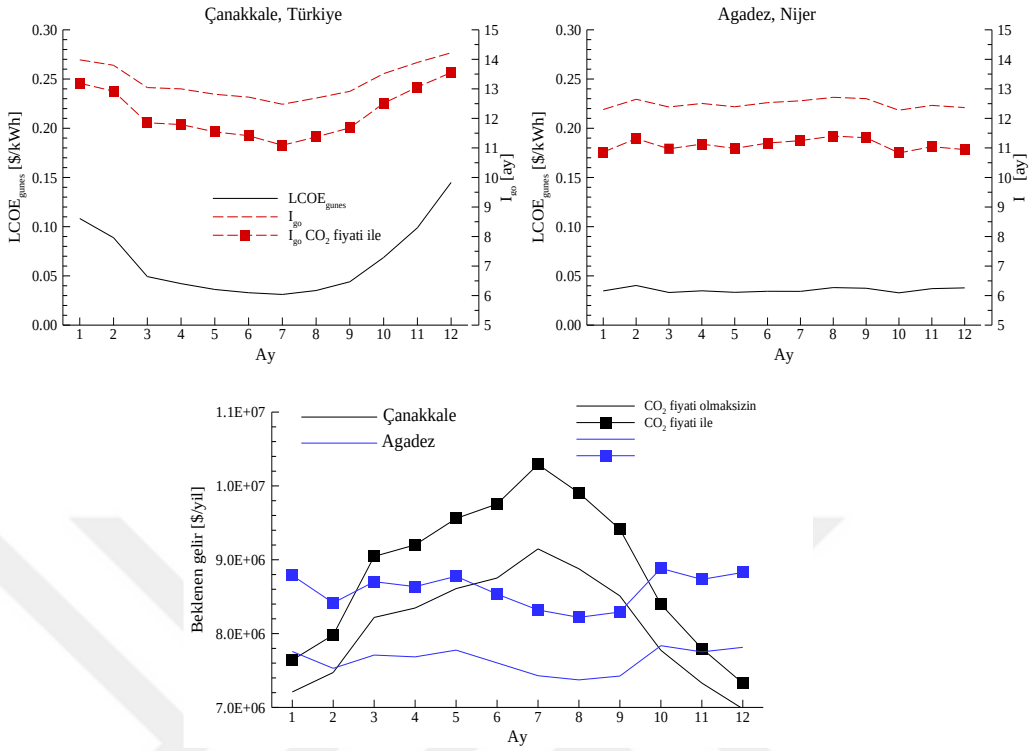


Şekil 5. 9 a. Yakıt tüketimi, *b*. CO2 salınım miktarı (Çanakkale için)



Şekil 5. 10 a. Yakıt tüketimi, *b*. CO2 salınım miktarı (Agadez için)

Şekil 5.11, Çanakkale ve Agadez için yılın 12 ayına dağılan LCOE ve yatırım geri ödeme (CO_2 fiyatı ile: I_{go},CO_2; CO2 fiyatı olmaksızın: I_{go}) değişimleri göstermektedir. Bunun yanı sıra, GDKGS'nin yıl boyunca beklenen gelirinin değişimi göstermektedir. Yukarıdaki analiz edilen sonuçlar gibi, ekonomik performansla ilgili sonuçlar da genel olarak Çanakkale için aylara göre belirgin değişimler gösterirken ve Agadez için yıl boyunca nispeten sabit bir değişim göstermektedir. Çanakkale'de yıl boyunca LCOE, I_{goCO2}, I_{go} ve beklenen gelir (CO_2 fiyatı olmaksızın ve CO_2 fiyatı ile), Temmuz ve Aralık aylarında sırasıyla minimum ve maksimum değerleri göstermektedir. Bu minimum ve maksimum değerler Çanakkale ve Agadez için sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de özetlenmiştir.



Şekil 5.11. Aylara göre ekonomik performans değerlerinin değişimi

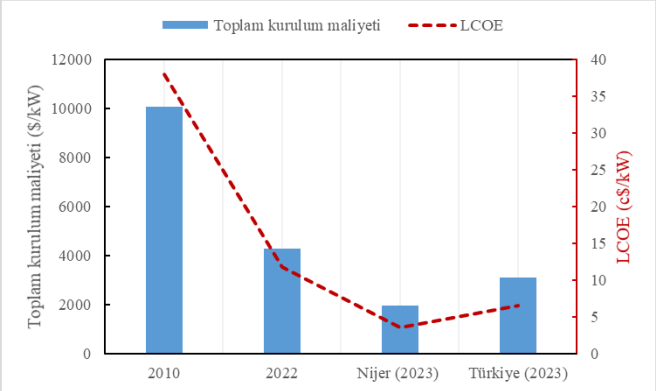
Tablo 5.1. Çanakkale için birkaç ekonomik performans değerleri

	LCOE	Igo (CO2 fiyatı olmaksızın)	Igo (CO2 fiyatı ile)	Beklenen gelir (CO2 fiyatı olmaksızın)	Beklenen gelir (CO2 fiyatı ile)
	$/kWh (Ay)	Ay	Ay	$/Ay	$/Ay
Temmuz	0.37	12.47	11.09	9147687	10291111
Aralık	1.73	14.22	13.54	6981333	7328011

Tablo 5.2. Agadez için yıl ortalama ekonomik performans değerleri

	LCOE	Igo (CO2 fiyatı olmaksızın)	Igo (CO2 fiyatı ile)	Beklenen gelir (CO2 fiyatı olmaksızın)	Beklenen gelir (CO2 fiyatı ile)
	$/kWh (Yıl)	Yıl	Yıl	$/Yıl	$/Yıl
Yıllık ortalama	0.035	12.48	11.10	91689424	103130158

2010'dan 2022'ye kadar yoğunlaştırılmış güneş sistemlerinin kurulum maliyeti %58'lik bir oranla 10082 $/kW'tan 4274 $/kW'a düşmüştür. Aynı dönemde LCOE'de 0.38'den 0.118'e yani %69'a düşen düşüşte de bu durum mantıksal olarak gözlemlenmektedir [48]. Günümüzde, bu çalışmada incelenen GDKGS sistemine göre, yoğunlaştırılmış güneş sistemlerinin kurulum maliyetleri Çanakkale için 3109 $/kW ve Agadez için 1953 $/kW değerlerine gelmiştir ve LCOE'leri sırasıyla 0.065 $/kWh ve 0.035 $/kWh'dir. Şekil 5.12 bu maliyet gelişimini göstermektedir.



Şekil 5.12. Güneş sistem maliyetinin yıllara göre gelişimi

6. BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, entegre bir güneş/kömür santralinin performans analizi yapılmıştır. Sonuçlar güneş alanında toplanan enerji ne kadar fazlaysa, kömür santralinin performansının da o kadar arttığını göstermektedir. Yakıt tüketiminin ve atmosfere CO_2 salınımın azaltılması üzerinde doğrudan etkisi görülmektedir.

Çalışma sonuçlarının analizine göre, Agadez için yıl boyunca modelin çıkış parametreleri nispeten sabit kalırken, Çanakkale için mevsimlere bağlı olarak önemli farklılıklar görülmektedir. Bu durum, Agadez için santralin işletme planlaması açısından avantajlı olarak kabul edilebilir ve böylece iş yükü gereksinimlerinin belirlenmesini kolaylaştırır. Ancak Çanakkale için Temmuz ayındaki piklerin aylık da olsa olağanüstü bir avantaj olduğu düşünülebilir. Örneğin en yüksek kömür tasarrufu 13562 tonla Temmuz ayında gerçekleşirken, Agadez'de bu rakam 12423 tonla Aralık ayında (güneş enerjisi üretimi için en uygun ay) kaydedilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları elektrik fiyatlarında sağlanan önemli avantajları sergilemektedir. İncelenen sistemin ekonomik avantajını anlamak amacıyla Çanakkale (Türkiye) ve Agadez (Nijer) elektrik fiyatlarının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır ve sırasıyla Tablo 6.1 ve 6.2'de özetlenmiştir. Her iki tablo da Türkiye ve Nijer için çalışma sonucunda elde edilen elektrik fiyatları ile Dünya ve Türkiye'deki uygulanan elektrik fiyatlarının karşılaştırılması bulunmaktadır. Türkiye için elektrik üretim birim fiyatı ortalama 2.660 TL/kWh iken Nijer için 4.690 TL/kWh'dır. Tez çalışmasında tasarlanan hibrit sistemde ise b maliyetler Türkiye için 2.010 TL/kWh ve Agadez için 1.101 TL/kWh'dır.

Tablo 6.1. Elektrik fiyatları karşılaştırması (Çanakkale Örneği)

Sektör	**Aktif Enerji [TL/kWh]**
Konut (240 kWh/ay altı)	1.341
Konut (240 kWh/ay üstü)	1.991
Ticarethane (900 kWh/ay altı)	2.790
Ticarethane (900 kWh/ay üstü)	3.707
Sanayi	3.702
Şehit Aileleri ve Muharip Malul Gaziler	0.641
Tarımsal Sulama	2.375
Genel Aydınlatma	4.732
Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK),1 Ocak 2024.	
Ortalama	**2.660**
Konut (Dünya)	4.752
Sanayi (Dünya)	4.629
***www.GlobalPetrolPrices.com**, 1 Haziran 2023.*	
Ortalama	**4.690**
TEZDEN ELE ALINAN HİBRİT SİSTEM -Çanakkale	**2.010**

Tablo 6.2. Elektrik fiyatları karşılaştırması (Agadez Örneği)

Sektör	**Aktif Enerji [TL/kWh]**
Konut (150 kWh/ay altı)	3.486
Konut (150-300 kWh/ay)	4.580
Sanayi,Ticarethane vs. (300 kWh/ay üstü)	6.490
La Société Nigérienne d'Électricité (NIGELEC),13 Şubat 2018.	
Ortalama	**4.852**
Konut (Dünya)	4.752
Sanayi (Dünya)	4.629
***www.GlobalPetrolPrices.com**, 1 Haziran 2023.*	
Ortalama	**4.690**
TEZDEN ELE ALINAN HİBRİT SİSTEM -Agadez	**1.101**

Çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çalışmada ele alınan en önemli parametrelerin değerleri Tablo 6.3'te özetlenmiştir. Tablodan görüldüğü gibi Çanakkale

ve Agadez'de GDKGS'nin güneş bölümünden elde edilen yıllık enerji üretimleri sırasıyla 168 ve 208 GWh'dir. Güneş enerjisinin sisteme dahil edilmesiyle %100 kömür yakıtlı GS'ye göre kömürden yıllık tasarruf edilen miktarlar ise Çanakkale ve Agadez için sırasıyla 107788 ve 135701 ton olmuştur. Kömürden sağlanan tasarruf sayesinde ise engellenen CO_2 miktarları 302915 ve 381358 ton'dur. Güneşten elektrik üretiminin maliyet analizi için kademelendirilmiş birim elektrik maliyetleri incelendiğinde Çanakkale ve Agadez için 0.065 ve 0.0357 $/kWh olarak bulunmuştur.

Tablo 6.3. Çalışmada elde edilen önemli parametrelerin değerleri

	Yıllık enerji üretimi	**Yıllık yakıt tasarrufu**	**Yıllık engellenen CO2 miktarı**	**LCOE**
	GWh	t	t	$/kWh
Çanakkale (Türkiye)	168	107788	302915	0.065
Agadez (Nijer)	208	135701	381358	0.0357

6.2. Öneriler

Sonuç olarak bu çalışma, enerji sektöründeki yenilikçi çözümlerin gelecekteki potansiyelini daha iyi anlamak ve sürdürülebilir enerji üretimine yönelik stratejiler geliştirmek adına bir temel oluşturmaktadır. Çalışmadan el edilen sonuçlar güneş destekli kömür yakıtlı güç santrallerinin kömür tüketiminin ve CO_2 emisyonlarının azaltılmasında büyük avantajlar sağladığını ve daha sürdürülebilir bir gelecek için temiz enerjinin sağlanmasındaki cazip bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur.

Sistem 800W/m^2 ışınım değerinden tasarladığından, yıl boyunca ışınım o değeri aştığında fazla olan enerji bir depolama sistemi vasıtasıyla depolayıp sistemin performansını daha da artırılabilir. Ayrıca bu fazla enerji, hidrojen üretiminde de kullanabilir. Örneğin, ışınım değeri 800W/m^2'yi aştığı yılın saat sayısı Türkiye ve Nijer için sırasıyla 375 ve 1370 saattir. Böylece sistem daha optimize edilmiş haline getirilir.

KAYNAKÇA

1. Yang, Y.P., Cui, Y.H., Hou, H.J., Guo, X.Y., Yang Z.P., Wang, N.L., 2019. Research on solar aided coal-fired power generation system and performance analysis. **Science In China Press, 51:** 1211-1221.

2. Cha, L., Rongrong, Z., Yongping, Y., Kumar, P., John, E,. Oakey, Peter,T., 2019. Annual performance analysis and optimization of a solar tower aided coalfired power plant. **Applied Energy 237:** 440–456.

3. Zoschak, R.J., Wu, S.,. 1975. Studies of the direct input of solar energy to a fossil-fueled central station steam power plant. **Solar Energy, 17:** 297–305.

4. Connaissance des energies, L'évolution du mix électrique mondial en 2022 en 2 infographies, **https://www.connaissancedesenergies.org/levolution-du-mix-electrique-mondial-en-2022-en-2-infographies-230413**

5. Planet enrgie, **https://www.planete-energies.com/fr/media/article/production-delectricite-ses-emissions-co2#:~:text=La%20production%20d'%C3%A9lectricit%C3%A9%20est,22%20%25%20des%20centrales%20%C3%A0%20gaz**

6. Global Carbon Budget (2023), **https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel**

7. El Hadj Malick, K., 2002. Intégration et optimisation thermoéconomique & environomiquedecentrales thermiques solaires hybrides, thèse N° 2565, Ecole polytechnique fédérale delausanne, p18.

8. Poullikkas, G., Kourtis, Adjipaschalis, I., 2010. Parametricanalysis for the installation of solar dish technologies in Mediterraneanregions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14:** 2772–2783.

9. Garcia, P., 2007. Outils D'évaluation Technico-Économique Et D'aide À La Conception Des Centrales Solaires Thermodynamiques Du Futur. Université De Perpignan, Thèse De Doctorat, Perpignan, s.238.

10. Hekim, M., 2017. Merkezi Alıcı Sistemli (MAS) güneş güç santrali Birecik uygulaması. Hacettepe Üniversitesi, Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, s.160.

11. Hong. H., Peng, S., Zhao, Y., Liu, Q., Jin, H., 2014. A typical solar-coal hybrid power plant in China. **Energy Procedia, 49:** 1777 – 1783.

12. Cameretti, M.C., Langella, G., Sabino, S., Tuccillo, R., 2015. Modeling of a hybrid solar micro gas-turbine power plant. **Energy Procedia, 82:** 833 – 840.

13. Li, C., Rongrong, Z., Yang, Y., Yang, Patchigolla, K., Oakey, J.E., Turner, P., 2019. Annual performance analysis and optimization of a solar tower aided coalfired power plant. **Applied Energy, 237:** 440–456.

14. Zhu, Y., Pei, J., Cao, C., Zhai, R., Yang, Y., Reyes-Belmonte, M.A., González-Aguilar, J., Romero, M., 2018. Optimization of solar aided coal-fired power plant layouts using multicriteria assessment. **Applied Thermal Engineering, 137:** 406–418.

15. Hong, H., Peng, S., Zhang, H., Sun, J., Jin, H., 2017. Performance assessment of hybrid solar energy and coal-fired power plant based on feed-water preheating. **Energy, 128:** 830-838.

16. Wang, Y., Xu, J., Chen, Z., Cao, H., Zhang, B., 2017. Technical and economical optimization for a typical solar hybrid coal-fired power plant in China. **Applied Thermal Engineering, 115:** 549–557.

17. Zhong, W., Chen, X., Zhou, Y., Wu, Y., López, C., 2017. Optimization of a solar aided coal-fired combined heat and power plant based on changeable integrate mode under different solar irradiance. **Solar Energy, 150:** 437–446.

18. Prosin, T., Pryor, T., Creagh, C., Amsbeck, L., Buck, R., 2015. Hybrid solar and coal-fired steam power plant with air preheating using a centrifugal solid particle receiver. **Energy Procedia, 69:** 1371 – 1381.

19. Wang, W., Fu, Y.W., Fan, Q.W., Huang, J.S., Chang, D.F., 2018. Thermodynamic analysis of a solar aided coal-fired power plant. IOP Conf. Ser.: **Earth Environ. Sci. 153** 042020.

20. Serrano-Sanchez, C., Olmeda-Delgado, M., Petrakopoulou, F., 2019. Exergy and Economic Evaluation of a Hybrid Power Plant Coupling Coal with Solar Energy. **Applied sciences, 9(5):** 850.

21. Zhao, Y., Hong, H., Jin, H., 2017. Optimization of the solar field size for the solar–coal hybrid system. **Applied Energy, 185:** 1162–1172.

22. Amoresano, A., Langella, G., Sabino, S., 2015. Optimization of solar integration in biomass fuelled steam plants. **Energy Procedia, 81:** 390 – 398.

23. Peng, S., Wang, Z., Hong, H., Xu, D., Jin, H., 2014. Exergy evaluation of a typical 330 MW solar-hybrid coal-fired power plant in China. **Energy Conversion and Management, 85:** 848–855.

24. Yan, Q., Yang, Y.P., Nishimura, A., Kouzani, A., Hu, E., 2010. Multi-point and Multi-level Solar Integration into a Conventional Coal-Fired Power Plant. **Energy Fuels, 24 (7):** 3733-3738.

25. Yang, Y.P., Yan, Q., Zhai R., Kouzani, A., 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:** 157-162.

26. Baloda, S., Manoj, S.S., 2019. Comparative Performance Assessment of a Hybrid Solar-Coal Power Plant. **Process Integration and Optimization for Sustainability, 3:** 227–235.

27. Patnode, A.M., 2006. Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants. Universıty of Wisconsın, Master Thesis, Madison.

28. Arslan, M., 2019. Parabolik Güneş Kolektörlerinde Enerji ve Ekserji Analizi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, İzmir.

29. Guo, J., Huai, X., Liu, Z., 2016. Performance investigation of parabolic trough solar receiver. **Applied Thermal Engineering, 95:** 357-364.

30. Coccia, G., D.Nicola, Giovanni., Hidalgo, A., 2016. Parabolic Trough Collector Prototypes for Low-Temperature Process Heat, **Springer Briefs in Applied Sciences and Technology**. DOI 10.1007/978-3-319-27084-5

31. Goswami, D.Y., & Kreith, F. (Eds.). (2007). Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy (1st ed.). CRC Press. **https://doi.org/10.1201/9781420003482**

32. EBSILON Professional 14. STEAG Energy Services. **https://www.ebsilon.com/en/**

33. Mokheimer, Esmail, M.A., , Dabwan, Y.N., Habib, M.A., Said, S.M., Said, F.A., Al-Sulaiman, F.A., 2014. Techno-economic performance analysis of parabolic trough collector in Dhahran, Saudi Arabia. **Energy Conversion and Management, 86:** 622-633.

34. Achour, L., Bouharkat, M., Behar, O., 2018. Performance assessment of an integrated solar combined cycle in the southern of Algeria. **Energy Reports, 4:** 207-217.

35. Mokheimer, E.M.A., Dabwan, Y.N., Habib, M.A., Said, S.A.M., Al-Sulaiman, F.A., 2014. Techno-economic performance analysis of parabolic trough collector in Dhahran, Saudi Arabia. **Energy Conversion and Management, 86:** 622–633.

36. Stuetzle, T.A., 2002. Automatic Control of the 30MWe SEGS VI Parabolic Trough Plant. Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin, Master Thesis, Madison.

37. Lippke, F., 1995. Simulation of the Part Load Behavior of a 30MWe SEGS Plant. Prepared for **Sandia National Laboratories**, Albuquerque, NM, SAND95-1293.

38. Price, H., Kearney, D., 2003. Reducing the Cost of Energy from Parabolic Trough Solar Power Plants. **National Renewable Energy Laboratory**, NREL/CP-550-33208.

39. European Solar Thermal Electricity Association. **https://estelasolar.org/**

40. Enerzine l'énergie du future: **http://www.enerzine.com/la-nasa-trace-la-carte-du-soleil/2889-2007-12.**

41. **http://www.cridecigogne.org/sites/default/files/Bilan_et_perspectives_energetiques_au_Niger_-_Par_CrideCigogne.pdf**

42. Jiang, Y., Liqiang, D., Ming, Y., Yongjing, T., Liping, P., 2022. Performance analysis of tower solar aided coal-fired power plant with thermal energy storage. **Applied Thermal Engineering, 206:** 118101.

43. Li, C., Zhai, R., 2021. Exergy and thermo-economic analyses and performance comparison of different solar aided coal-fired power systems. **Energy Conversion and Management, 229:** 113758.

44. Wu, J., Han, Y., Hou, H., 2020. A new solar share evaluation method of solar aided power generation (SAPG) system by tracing exergy flows and allocating exergy destruction. **Sol Energy, 198:** 542–54.

45. Petela, R., 2003. Exergy of undiluted thermal radiation. **Sol Energy, 74(6):** 469–88. **https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00226-3.**

46. Kalogirou, S.A., 2014. Solar Energy Engineering Processes and Systems. Academic Press, Waltham, USA.

47. Cost of Concentrated solar power (CSP) projects. **Cost of Concentrated solar power (CSP) projects fell from USD 0.38/kWh to USD 0.118/kWh – a decline of 69% – HeliosCSP – Portal de noticias de energía termosolar**

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİLER BİLGİLER

Adı Soyadı **:** Seyni YOUNOUSSİ SAİDOU

Uyruğu **:** Nijer

Doğum tarihi ve yeri

Medeni Durum

EĞİTİM

Derece	**Kurum**	**Mezuniyet tarihi**
Yüksek Lisans	Elektromekanik, Djillali Liabès-Cezayir	2014
Lisans	Elektroteknik, Djillali Liabès-Cezayir	2012
Lise	Fen Lisesi, Nijer	2009

İŞ DENEYİMİ

Yıl	**Kurum**	**Görev**
2014-2015	Airtel-Nijer	Elektromekanik müh.
2014	EGETI-Nijer	Elektromekanik müh.

YABANCI DİL

Türkçe

İngilizce

Fransızca