

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SOLAR-FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDEN HİDROJEN
ÜRETİMİ VE EKONOMİK ETÜDÜ**

Makina Mühendisi, Ömer KAŞHAN

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programına
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Zehra YUMURTACI

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iii
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1 GİRİŞ	1
2 GÜNEŞ ENERJİSİ	5
2.1 Dünyada Güneş Enerjisi Durumu	5
2.1.1 Dünyada Güneş Enerjisi Uygulamaları ve Politikaları	6
2.2 Türkiye'de Güneş Enerjisi Durumu	10
2.2.1 Türkiye'de Güneş Enerjisi Uygulamaları ve Politikaları	14
2.3 Güneş Enerjisi Kullanım Alanları	19
2.3.1 Termodinamik Sistemler	19
2.3.1.1 Pasif Güneş Sistemleri	19
2.3.1.1.1 Direk Toplama	20
2.3.1.1.2 Termal Depolama Duvarı (Trombe Wall)	20
2.3.1.1.3 Güneş Uzayı (Boşluğu)	20
2.3.1.2 Aktif Güneş Sistemleri	21
2.3.1.2.1 Flat-plate Kollektörler	21
2.3.1.2.2 Vakum Tüplü Kollektörler	22
2.3.1.2.3 Isı Borulu Vakum Tüplü Kollektörler	23
2.3.2 Fotovoltaik Sistemler	24
2.4 Güneş Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları	24
2.4.1 Güneş Enerjisinin Avantajları	24
2.4.2 Güneş Enerjisinin Dezavantajları	25
3 GÜNEŞ ENERJİSİYLE HİDROJEN ÜRETİMİ	26
3.1 Hidrojenin Özellikleri	26
3.1.1 Fiziksel Özellikleri	26
3.1.2 Kimyasal Özellikleri	26
3.2 Güneş Enerjisi ile İlgili Literatür Çalışmaları	27
4 FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	32
4.1 Fotovoltaik Sistemin Yapısı ve Bileşenleri	32
4.2 Büyük PV Sistemler	34
4.2.1 Büyük PV Sistemlerin Teknik Özellikleri	35
4.3 Fotovoltaik Paneller	36
4.3.1 Fotovoltaik Panel-Güneş Işını Arasındaki Açılar	40
4.3.2 Fotovoltaik Sistemlerin Çevresel Etkisi	41

	Sayfa
5 EKONOMİK ANALİZ	43
5.1 Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi	43
5.1.1 Kule Tipi Güneş Gücü Santraliyle Elektrik Üretimi	43
5.1.1.1 Kule Tipi Güneş Gücü Santraliyle Elektrik Üretimi Maliyet Hesabı.....	46
5.1.2 Kule Tipi Güneş Gücü Santraliyle Elektrik Üretimi İçin Verim Arttırıcı Yöntemler	53
5.1.2.1 Absorbsiyon Soğutmalı Güç Üretme Çevrimi.....	53
5.1.2.2 Kalina Çevrimi	55
5.1.2.3 Kule Tipi Güneş Gücü Santrali İçin Kalina Çevrimi Uyarlaması	57
5.1.2.4 Vakum Tüplü Kollektör Kullanılarak Elektrik Üretim Maliyet Hesabı.....	58
5.1.3 Fotovoltaik Sistemlerden Elektrik Üretimi.....	58
5.1.3.1 Fotovoltaik Sistemlerden Elektrik Üretimi Maliyet Hesabı.....	63
5.1.3.2 Sabit Yıllık Sermaye Masrafı.....	68
5.1.3.3 İşletme ve Bakım Maliyeti.....	70
5.2 Elektroliz Maliyeti.....	73
5.2.1 Tesis Maliyeti	74
5.2.2 İşletme ve Bakım Maliyeti	74
5.2.3 Enerji Maliyeti.....	75
5.3 Hidrojen Üretim Maliyeti	75
6 SONUÇLAR.....	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	83

SİMGE LİSTESİ

A	Yıllık amortisman
A_b	Arsa bedeli
A_c	Panel alanı
A_t	Tesis alanı
B_c	Depolama kapasitesi
C_s	Kapital maliyeti
e	Bir kg hidrojen üretmek için ihtiyacımız olan enerji
E	Üretilecek yıllık enerji, yıllık kullanılacak enerji
$E_{ex,i}$	Saatlik artan enerji
E_i	Ortalama saatlik elektrik üretimi
$E_{L,i}$	Aylık yükü karşılayacak enerji
E_p	Santral emniyet payı, bir panelin üreteceği yıllık enerji miktarı
g	Birim enerji maliyeti
g_i	Birim elektrik enerjisi başına işletme ve bakım maliyeti
g_k	Birim yatırım maliyeti
G_{sc}	Solar sabit
$G_{T,NOCT}$	Nominal işletme sıcaklığı için eğimli yüzeydeki radyasyon
H	Günlük ışınım
H_d	Günlük difüz radyasyon
H_o	Uzaydan gelen günlük radyasyon
H_y	Heliostat yüzeyi, yıllık üretilen hidrojen miktarı
I_h	Heliostatlarla toplanacak toplam yıllık enerji
I_{h1}	Bir heliostat alanı ile toplanacak yıllık enerji
I_k	Kollektör ışınım şiddeti
I_o	Uzaydan gelen saatlik radyasyon
I_t	Eğimli yüzeye gelen saatlik ışınım
i	Faiz oranı
\dot{I}_y	Yıllık işletme ve bakım maliyeti
k	Yıllık işletme ve bakım maliyet katsayısı
K_T	Günlük açıklık indeksi (hava için)
M_{el}	Elektroliz birim enerji maliyeti
M_i	İşletme ve bakım maliyeti
M_{ie}	Üretilen birim hidrojen başına işletme ve bakım maliyeti
M_p	Panel maliyeti
M_t	Hidrojenin toplam üretim maliyeti
M_{te}	Üretilen birim hidrojen başına tesis maliyeti
M_y	Yıllık sermaye masrafı
n	Amortisman süresi, yılın günü, tesis ömrü
N_e	Tesis gücü
P	Yatırım maliyeti (elektroliz)
R_b	Eğimli yüzeye gelen radyasyonun yatay yüzeye gelene oranı
r_d	Saatlik difüz radyasyonun günlük difüz radyasyona oranı
r_t	Saatlik toplam radyasyonun günlük toplam radyasyona oranı
T_a	Ortam sıcaklığı
$T_{a,i}$	Saatlik sıcaklık (12 ayın ortalaması)
$T_{C,NOCT}$	Nominal işletme sıcaklığı için pil sıcaklığı
T_{em}	Elektroliz için yıllık toplam enerji maliyeti
T_{ref}	Referans sıcaklık
TA_b	Toplam arsa bedeli

T_{tb}	Toplam tesis bedeli
U_L	Kollektörün toplam ısı kaybı katsayısı
$x_{c,i}$	Kritik radyasyon katsayısı
w	Saatlik açı
w_s	Güneşin doğuş ve batışındaki saatlik açı
YM	Yatırım maliyeti
YM_t	Toplam ilk yatırım maliyeti
β	Eğim açısı
ρ_g	Yerin yansıtma katsayısı
η_e	Maksimum güç noktası elektroniği verimi
η_i	Saatlik panel verimi
$\eta_{mp,ref}$	Maksimum güç verimi
η_s	Santral verimi
μ_{mp}	Maksimum güç noktası sıcaklık katsayısı
δ	Sapma açısı

KISALTIMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri
EİE	Elektrik İşleri Etüd Dairesi
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
ERDA	Energy Research and Development
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
MPPT	Maximum Power Point Tracker
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
NSF	National Science Foundation
PV	Photovoltaic
SCC	Social Cost of Carbon
TEP	Ton Eşdeğer Petrol

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Dünya kömür tüketimi.....	3
Şekil 1.2	Dünya petrol tüketimi.....	3
Şekil 2.1	Dünyaya gelen güneş ışınım miktarı	6
Şekil 2.2	Almanya’da 1988-2001 yılları arasında kurulan kollektör yüzey miktarı	9
Şekil 2.3	1993-2005 yılları arasında dünyada üretilen toplam fotovoltaik pil miktarı.....	10
Şekil 2.4	Türkiye’de yeryüzüne düşen toplam ışınım	12
Şekil 2.5	Türkiye’nin güneş ışınım haritası	13
Şekil 2.6	Flat-plate kollektör	22
Şekil 2.7	Isı borulu vakum tüplü kollektör	23
Şekil 2.8	Isı borulu vakum tüplü kollektör çalışma prensibi	24
Şekil 3.1	Fosil yakıt ve hidrojen fiyatlarının zamanla değişimi	29
Şekil 4.1	Fotovoltaik hiyerarşi.....	33
Şekil 4.2	Almanya’da Bürstadt ve Muggenstrum’daki fotovoltaik yapılar.....	34
Şekil 4.3	Değişik tip büyük PV sistemleri çalışma prensipleri.....	38
Şekil 4.4	Dünyada kurulu güneş panellerinin kullanım alanlarına göre dağılımı	38
Şekil 4.5	Çatısı güneş paneli kaplanmış ev	38
Şekil 4.6	Güneş panelleri ile sokak aydınlatması	39
Şekil 4.7	Şebekeye elektrik veren fotovoltaik sistem.....	39
Şekil 4.8	Panel ile güneş ışını arasındaki açılar	40
Şekil 4.9	Azimut açısı.....	41
Şekil 5.1	Termodinamik dönüşümlü, kule tipi güneş güç santrali.....	44
Şekil 5.2	Birim tesis bedelinin heliostat fiyatları ile değişimi	45
Şekil 5.3	Birim tesis bedelinin kurulu güç ile değişimi	46
Şekil 5.4	Bölgelere göre birim elektrik maliyet grafiği	51
Şekil 5.5	Bölgelere göre birim elektrik maliyet grafiği	53
Şekil 5.6	Güneş enerji kaynaklı basit bir absorpsiyon güç üretme çevrimi.....	54
Şekil 5.7	Kalina tip binary sistemden elektrik üretimi	56
Şekil 5.8	Husavik santrali ve santralin 3 boyutlu görünüşü	57
Şekil 5.9	Bölgelere göre birim elektrik maliyetleri	72
Şekil 5.10	Farklı sistemler için birim elektrik maliyet grafiği.....	73
Şekil 5.11	Bölgelere göre üretilecek yıllık hidrojen miktarı	77
Şekil 5.12	Bölgelere göre birim hidrojen üretim maliyetleri.....	78

Çizelge 2.1	AB ülkelerinde 2004-2005 yıllarında devreye alınan fotovoltaik güç miktarı....	7
Çizelge 2.2	En büyük 12 fotovoltaik pil üreticisi ve üretim rakamları.....	8
Çizelge 2.3	Türkiye'nin toplam güneş enerjisi potansiyelinin aylara göre dağılımı.....	11
Çizelge 2.4	Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı.....	12
Çizelge 2.5	Türkiye'nin 1980-2005 yılları arasındaki enerji üretimi.....	15
Çizelge 2.6	Türkiye'nin 1980-2005 yılları arasındaki enerji tüketimi.....	16
Çizelge 2.7	Türkiye'de 1993-2005 yılları arasındaki enerji fiyatları.....	17
Çizelge 2.8	Güneş kolektörlerinin ürettiği ısıl enerjinin birincil enerji tüketimimize katkısı.....	19
Çizelge 3.1	Hidrojen, benzin ve metanın karşılaştırılması.....	27
Çizelge 4.1	Dünyadaki en büyük üç fotovoltaik yapı ve başlıca özellikleri.....	34
Çizelge 4.2	Değişik marka panellerin teknik özellikleri.....	37
Çizelge 4.3	1 kWh elektrik üretimi için salınan CO ₂ miktarı.....	42
Çizelge 5.1	Kule tipi güneş santrali maliyet hesabı için kabul edilen değerler.....	46
Çizelge 5.2	Türkiye'deki yedi bölge için hesaplamalarda kullanılacak arsa fiyatları.....	47
Çizelge 5.3	Bölgeler için bulunan toplam arsa bedel değerleri.....	48
Çizelge 5.4	Her bölge için bulunan toplam yatırım maliyeti değerleri.....	49
Çizelge 5.5	Tüm bölgeler için bulunan yatırım maliyeti değerleri.....	50
Çizelge 5.6	Tüm bölgeler için bulunan birim enerji maliyetleri.....	51
Çizelge 5.7	Tüm bölgeler için birim enerji maliyetleri (maksimum güneş enerjisi için)....	52
Çizelge 5.8	Tüm bölgeler için birim enerji maliyetleri (minimum güneş enerjisi için).....	52
Çizelge 5.9	Ortalama hesaplar için önerilen günler ve bu günler için kullanılacak değerler.....	64
Çizelge 5.10	Günlük ortalama radyasyon miktarı.....	65
Çizelge 5.11	Selçuk için saat bazında hesaplama özet tablosu.....	67
Çizelge 5.12	Hesaplama yapılan günler için panel başına elektrik üretimi.....	68
Çizelge 5.13	Fotovoltaik sistem maliyeti için kabuller.....	68
Çizelge 5.14	Bölgelere göre birim enerji maliyeti.....	65
Çizelge 5.15	Elektroliz maliyet hesabında kabul edilen değerler.....	74
Çizelge 5.16	Elektroliz sistem özellikleri.....	75
Çizelge 5.17	Bölgeler için hidrojen maliyetleri.....	68

ÖNSÖZ

Günümüzde enerji ihtiyacının önemli bir bölümü fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Sanayileşmenin artışına paralel olarak fosil yakıt tüketimi de hızla artmaktadır. Ancak fosil yakıtların sınırlı olması ve talebin sürekli artması bu yakıtların maliyetlerinin de artmasına sebep olmaktadır.

Fosil yakıtların bir diğer dezavantajı da çevreye olan zararlı etkilerinin de tüketimin artışına paralel olarak artmasıdır. Bu etkilerin en önemlisi küresel ısınmadır. Fosil yakıtların tüketimi sonucu karbondioksit başta olmak üzere atmosfere yayılan sera gazları küresel ısınmanın başlıca nedenidir. Küresel ısınma beraberinde iklim değişikliği ve buzulların erimesi gibi çevre felaketlerini de getirmektedir.

Hem maliyetinin artması, hem de çevreye verdiği zarar nedeniyle fosil yakıtlara alternatif enerji kaynakları araştırmalarına hız verilmiştir. Bu alternatifler arasında yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmıştır. Bu kaynakların kullanımının artması doğanın dengesini tekrar bulması yolunda atılacak en önemli adım olacaktır. Hidrojen de yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji için iyi bir depo ve taşıyıcı adaydır. Bu çalışmada yapılan hesaplamalarda elektriğin birim fiyatı farklı sistemler için hesaplanmış olup en uygun sonuçlar fotovoltaik paneller için elde edilmiştir. Türkiye'nin yedi bölgesi için elektrik birim üretim maliyeti 126,52 ile 164,93 mills/kWh aralığında, birim hidrojen maliyeti ise 10,20 ile 13,29 \$/kg aralığında bulunmuştur. Selçuk için bu değerler sırasıyla 100,5 mills/kWh ve 8,098 \$/kg olarak hesaplanmıştır. Bu maliyetler günümüz için yüksek gibi görünmekle beraber fosil yakıt fiyatlarının artacağı ve gelişen teknoloji ile bu maliyetlerin düşeceği göz önünde bulundurulursa yakın gelecekte güneş enerjisi ile hidrojen üretiminin fiyat açısından da rekabetçi olabileceği söylenebilir.

Gelecekte yoğun olarak kullanılması muhtemel olan hidrojen enerjisi için ülkemizin konumunu ortaya koyması açısından faydalı olacağını düşündüğüm bu çalışmayı yapmamda beni yönlendiren ve her konuda yardımcı olan sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Zehra Yumurtacı'ya teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

ÖZET

Günümüzde sanayileşme ve nüfus artışıyla beraber enerji tüketimi de hızlı bir şekilde artmaktadır. Enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayan fosil yakıtların 40-50 yıl daha bu talebi karşılayabileceği tahmin edilmektedir. Bu nedenle fosil yakıt fiyatları hızla artmakta ve en küçük bir dengesizlik petrol fiyatlarında önemli artışlara ve krize neden olmaktadır. Fosil yakıtların fiyatının sürekli artmasının yanında yaşadığımız çevreye verdikleri zararlar da önemli bir handikaptır. Küresel ısınma, doğanın dengelerini bozmaya başlamıştır ve önemli bir tehdit haline gelmiştir. Fosil yakıt tüketimi küresel ısınmanın en önemli nedenidir.

Bu nedenlerden dolayı alternatif enerji kaynakları konusunda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji ve hidroelektrik enerji öne çıkan alternatiflerdir. Ancak bu şekilde üretilen enerji düzenli olarak elde edilememektedir. Enerji üretimi her lokasyonda mümkün olmamakta ve kimi zaman yoğun üretim olup kimi zaman enerji elde edilememektedir. Bu dezavantajları ortadan kaldıracı en önemli enerji deposu ve taşıyıcısı olarak hidrojen ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada solar-fotovoltaik, kule tipi, Kalina çevrimli ve vakum tüplü kollektör kullanılan sistemler için hesaplamalar yapılmıştır. Selçuk ilçesi verileri ile tüm sistemlerin elektrik enerjisi maliyetleri kıyaslanmıştır. Maliyeti daha uygun olan fotovoltaik sistemden elde edilen elektrik elektroliz sisteminde kullanılarak hidrojen üretilmiş ve birim maliyetler çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğru orantı kurularak Türkiye'nin yedi bölgesi için hesaplanmış ve sonuçlar çizelge ve grafiklerle sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, hidrojen enerjisi, solar-fotovoltaik sistemler, hidrojen maliyeti, ekonomik analiz.

ABSTRACT

Nowadays, energy consumption is growing with the population growth and industrialization. Fossil fuels are supplying the most of demand for energy. The estimations show that, fossil fuels will be exhausted in 40-50 years. Because of this fossil fuel prices are increasing rapidly. Energy imbalances cause increasing of petroleum prices and economic crisis. The another important handicap of fossil fuels is environmental damage. Global warming is an important threat for the nature. Fossil fuel consumption is the most important reason of global warming.

Because of these reasons, the researches on the alternative energy resources are increasing. Solar energy, wind energy, geothermal energy and hydroelectric energy are the most important alternatives. Energy production due to alternative energy resources isn't uniform. Some locations aren't convenient for alternative energy resources. The most important energy holder and carrier is the hydrogen, which can eliminate this disadvantages.

In this study, the electrical energy has been used in electrolysis system, which is produced by solar-photovoltaic system. Hydrogen has been produced due to electrolysis system and its costs calculated. The data of Selçuk has been used and electrical energy costs of thermodynamic power plant and photovoltaic system has been compared. Electrical energy of photovoltaic system has been used to produce hydrogen, because it has been found cheaper. Unit costs have been calculated and the calculations for seven regions of Turkey have been made using direct proportion. All results have been shown with tables and diagrams.

Keywords: Solar energy, hydrogen energy, solar-photovoltaic systems, cost of hydrogen, economic analysis.

1 GİRİŞ

Gelecekteki enerji ihtiyacını karşılamak için sınırlı ve yenilenemeyen enerji kaynakları yerine alternatif, yenilenebilen, sınırsız enerji kaynaklarına yönelmek gerekmektedir. Günümüzde birincil enerji kaynakları olan fosil yakıtlar teknik eldesi en kolay ve en ekonomik olanlardır. Fakat gelecekte ikincil enerji kaynakları olan güneş enerjisi ve nükleer enerji gibi enerji türlerine yönelinmesi enerji ihtiyacını karşılama, ekonomik enerji üretme ve çevresel zararı en aza indirmesi açısından gereklidir.

Enerji kullanımının artmasının iyi ve kötü yanları vardır. Ekonomik gelişmeyi arttırması ve hayat standardını arttırması iyi tarafları olmakla beraber yeni ekonomik gelişmeleri sınırladığı ve hayat standardını düşürdüğü zaman kötüdür. İçinde bulunduğumuz 21. yüzyılda enerji sisteminin ucuz, verimli ve temiz olması gerekmektedir.

Enerjinin ekonomik ve çevresel yönleriyle ayrılmaz ilişkisi tarihte yakıtların kullanımının değişmesine neden olmuştur. Medeniyet ilk enerjisini hayvan gübresinden ve daha sonra odundan sağlamıştır. Başlangıçta bu enerji sistemi kullanılabilir bir yöntemdi. Çünkü ormanlar çok fazla ve dünya nüfusu da oldukça azdı. Fakat teknolojik gelişmeler demirin eritilerek kullanılmasına ve buna bağlı olarak da sanayinin hızla gelişmesine vesile oldu. Buna bağlı olarak odun kullanımı sürekli arttı ve ormanlar hızla yok olmaya ve odun fiyatları hızla artmaya başladı. Böylelikle ekonomik gelişme odunun kullanımına ve yüksek fiyatına endekslendi.

Ardından insanoğlu kömürü bularak buna bağlı yeni teknolojiler geliştirmeyi başardı. Lokomotif yapılarak kömür yakıt olarak kullanıldı. Bu dönemde İngilizler kömür teknolojisi sayesinde sanayi devrimini yaparak dünyanın süper gücü haline gelmişlerdir.

Kömürün yaklaşık %100 karbondan oluşması sebebiyle sanayi devrimi çok fazla kirlilik yaratan santrallere ve kirlilikteki bu artış da hayat standardının düşmesine neden olmuştur. Böylelikle kömür kullanımı yeni ekonomik gelişmeleri sınırlamış ve en önemlisi çevreyi kirletmiştir. Kömürün bu zararları yeni enerji kaynaklarının aranması çalışmalarını hızlandırmış ve böylelikle petrol teknolojisi gelişmiştir. 1800'lerin sonlarında başlayan petrol teknolojisi 1920'lerde hızla gelişerek sondajların, petrol rafinerilerinin ve içten yanmalı motorların üretimini beraberinde getirmiştir. Petrol teknolojisinin lideri ABD olmuş ve

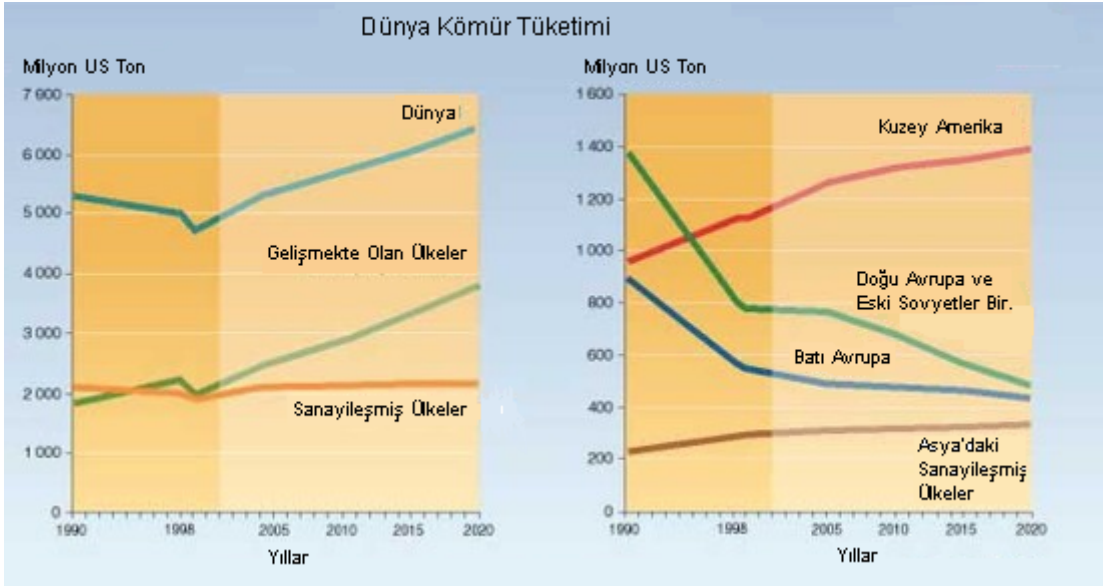
Amerikan petrol ekonomisi medeniyetin lokomotifi olmuştur. Böylece sanayileşme ve modernizasyon hızla gelişmiştir. Bunun sonucu olarak daha verimli yakıt kullanımı ekonomik üretkenliği artırarak materyal ve servis fiyatlarını düşürmüştür. Ayrıca bu enerji kaynağı ekonomik güç olmuş, hayat kalitesini ve yaşama standardını arttırmıştır (Heffner, 1995).

Enerji kaynaklarının tarihsel gelişimine bakılırsa kirli, kimyasal olarak kompleks ve tekniksel kaba enerji sistemlerinden temiz, kimyasal olarak basit, ekonomik ve teknik açıdan daha gelişmiş enerji sistemlerinin kullanımına yönelinmiştir. Enerji sisteminde her yeni enerji kullanımında insanoğlu daha iyi bir hayat standardına kavuşmuş, fakat her yeni enerji türünün uygun kullanılamaması hayat kalitesini düşürerek ekonomik büyümeyi sınırlamıştır.

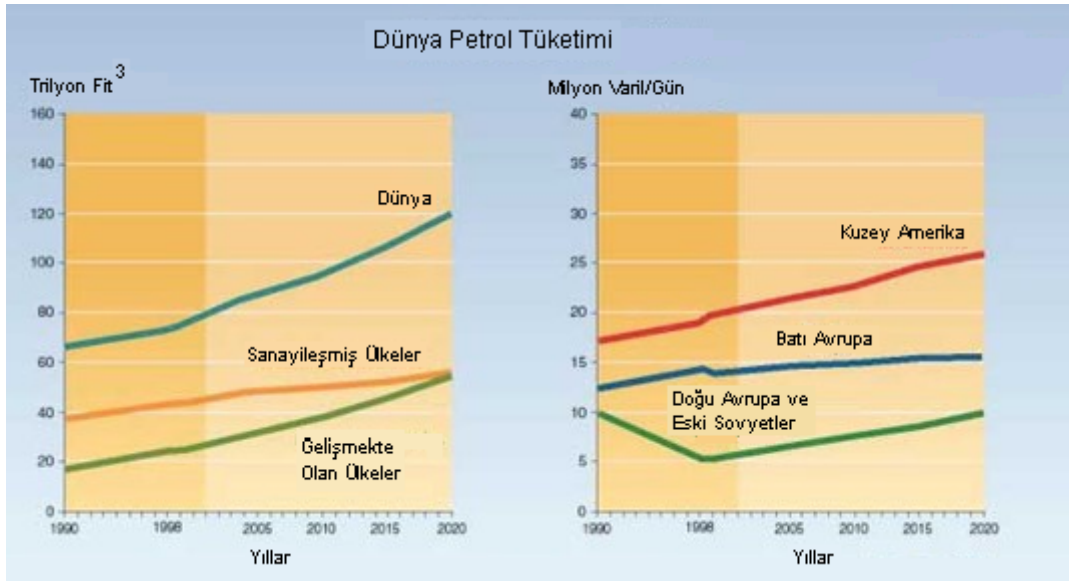
Petrolde sonra kullanılmaya başlanan doğalgaz daha temiz, daha verimli ve kimyasal olarak daha basit olması yönleriyle enerji geçişinde önemli rol oynamıştır.

Özet olarak odun ve kömürün %100 karbon içermesi, taşınmasındaki zorluk ve yüksek sermayeli teknoloji gerektirmesine karşı %75 karbon içeren, sıvı, dağıtımı kolay ve daha az sermayeli teknoloji gerektirmesi petrolü daha avantajlı kılmış ve petrole geçilmiştir. Günümüzde %50 karbon içermesi, temiz yakılması, küçük ve daha az sermayeli teknoloji gerektirmesi yönleriyle doğalgaz oldukça caziptir. Fakat doğalgaz dünya enerji ihtiyacını karşılamada yetersizdir.

Dünyanın enerji ihtiyacını karşılamada üzerinde en çok çalışılan enerji kaynağı güneş enerjisidir. Güneş enerjisi bütün enerji türlerinden daha temiz kimyasal olarak basit bir kaynaktır. Bu enerji türünün daha geniş sektörlerde kullanımının sağlanması için ekonomik ve teknolojik olarak basit yöntemlerle kullanılabilir enerjiye dönüştürülmesinin sağlanması gerekmektedir. Fakat bilinen tüm bu gerçeklere rağmen fosil yakıtların kullanımı hala sürdürülmekte ve buna bağlı olarak atmosfer kirlenmeye devam etmektedir (World Resource 1992-1993; Nicholetti 1995). Şekil 1.1 ve 1.2'de dünyadaki kömür ve petrol tüketim grafikleri görülmektedir.



Şekil 1.1 Dünya kömür tüketimi (http://maps.grida.no/go/graphic/world_coal_consumption)*



Şekil 1.2 Dünya petrol tüketimi (http://maps.grida.no/go/graphic/world_oil_consumption)**

Şekillerde de görüldüğü gibi her geçen yıl hidrokarbonların kullanımı hızla artmıştır ve tahminlere göre de artmaya devam edecektir. Bu hızlı artış beraberinde çevre kirliliğini getirmektedir. Fosil yakıtların yakılmasıyla CO₂ atmosfere yayılması global ısınmanın en önemli sebebidir. Atmosferdeki CO₂ miktarının kararlı hale gelebilmesi için CO₂ yayılma

* 1 US ton = 0,9081 ton

** 1 fit (feet) = 0,3048 m 1 fit³ = 2,832x10⁻² m

hızının %60 azaltılması gerekir. Fakat tam tersine günümüzde fosil yakıt kullanımı hızla artmakta ve CO₂ yayılma hızının 2025 yılında şimdiki değerinin yaklaşık iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir (Lako vd., 1995). Bu durum da enerji konusunda alınması gereken önlemlerin aciliyetini gösteren bir örnektir. Bu önlemler içinde en önemlisi temiz enerji kaynaklarına yönelmektir.

Bu kaynaklar arasında en çok üzerinde durulması gereken güneştir. Güneş diğer birçok yenilenebilir enerji kaynağının da temelidir. Bu çalışmada Türkiye'nin güneş enerjisi irdelenip güneş enerjisinden ne şekilde en verimli ve en ucuz hidrojeni elde edebileceğimiz ortaya konularak maliyet hesapları yapılacak ve sonuçlar değerlendirilecektir.

2 GÜNEŞ ENERJİSİ

Dünyada enerji ihtiyacının %39'u petrol, %29'u kömür, %20'si doğalgaz, %8'i alternatif enerji kaynakları (rüzgar, su, jeotermal enerji, güneş enerjisi, hidrolik enerji v.s.) ve %6'sı nükleer santrallerden elde edilmektedir. 30-40 yıl içinde fosil yakıtların tükeneceği göz önüne alındığında yeni enerji kaynaklarına olan ihtiyaç açıkça görülmektedir. Günümüz teknolojisi ve enerji santralleri ile 2100 yılında %75 kapasite ile 10700 nükleer santral enerji ihtiyacının 584 EJ'lük (584×10^{18} J) miktarını karşılayabilecektir. Aynı şekilde güneş enerjisi teknolojisi ile de 400 EJ'lük kısım karşılanabilir. Bu rakamlar gösteriyor ki gelecekteki enerji ihtiyacını karşılayabilmek için bütün alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasına ve en önemlisi de yeni teknolojilerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır (Dienart ve Siegel,1994; Frieberg, 1987). Bu yeni teknolojiler arasında en önemlisi ve üzerinde en çok çalışma yapılanlarından birisi güneş enerjisidir.

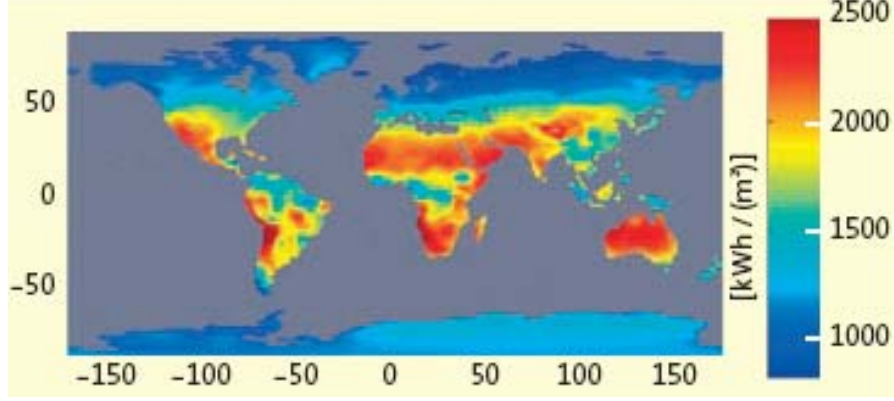
2.1 Dünyada Güneş Enerjisi Durumu

Güneş 1,4 milyon km çapıyla dünyanın 100 katı büyüklüğünde ve dünyadan $1,5 \times 10^{11}$ m uzaklıkta yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı bir yıldızdır. Yüzey sıcaklığı yaklaşık 6000 °K olup iç bölgelerindeki sıcaklığın 8×10^6 °K ile 40×10^6 °K arasında değiştiği tahmin edilmektedir.

Doğal ve sürekli bir füzyon reaktörü olan güneşin enerji kaynağı 4 hidrojen atomunun 1 helyum atomuna dönüşmesinde gizlidir. 4 hidrojen atomu 4,032 birim ağırlıkta, halbuki 1 helyum atomu 4,003 birim ağırlıktadır. Bu olay sonucu 0,029 birim ağırlık Einstein'ın madde-enerji bağıntısı sonucu enerjiye dönüşmektedir. Yani güneşte her saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve kaybolan 4 milyon ton kütle karşılığı $3,86 \times 10^{26}$ J enerji açığa çıkmakta ve bu enerji ışıınım şeklinde uzaya yayılmaktadır. Toplam enerji rezervi $1,785 \times 10^{47}$ J olan bu yıldız daha milyonlarca yıl ışımasını sürdüreceğinden dünya için sonsuz bir enerji kaynağıdır.

Dünyanın çapına eşit bir dairesel alan üzerine çarpan güneş gücü, 178 milyar kW düzeyindedir. Güneş enerjisi uzaya ve gezegenlere elektromanyetik ışıınım (radyasyon) biçiminde yayılır. Dünyaya güneşten gelen enerji, dünyada bir yılda kullanılan enerjinin 20.000 katıdır (Gönüllü ve Varınca, 2006).

Dünyaya gelen güneş ışınları Ekvator çevresinde yoğunlaşmaktadır. Güney yarımküre kuzeye göre daha fazla ışınım almaktadır. Aşağıdaki şekilde dünyaya gelen güneş ışınımının dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.1 Dünyaya gelen güneş ışınım miktarı (Grenpeace and EPIA, Solar Generation, 2006)

2.1.1 Dünyada Güneş Enerjisi Uygulamaları ve Politikaları

Güneş enerjisinin gelecekte oldukça önemli bir yere geleceği günümüzde kavranmaya başlanmıştır. Bu da güneş enerjisinden daha fazla faydalanmak için yapılan AR-GE çalışmalarının ve yatırımların artmasına vesile olmuştur.

Avrupa'daki durumu göz önüne alırsak bu durumu daha net olarak anlayabiliriz. Avrupa'da 2005 yılında 645 MW gücünde fotovoltaik güneş pili devreye alınmıştır. Bu rakam 546 MW olan 2004 rakamlarına göre %18.2'lik bir artışı ifade etmektedir. Almanya 600 MW'lık yatırımla bu alanda 2005 yılının lideri olmuştur.

Bunun yanında İspanya'da da 2005 yılında bir önceki yıla göre devreye alınan güneş pili oranı %90.8 oranında artmıştır. Bazı Avrupa Birliği ülkelerinde güneş enerjisinden üretilen enerjinin satın alınmasında teşvik edici uygulamalar yapılmaktadır (Solar Systems, Photovoltaic Barometer, Nisan 2006). Avrupa Birliği ülkelerindeki fotovoltaik yatırımı çizelge 2.1'de görülebilir.

Çizelge 2.1 AB ülkelerinde 2004-2005 yıllarında devreye alınan fotovoltaik güç miktarı (MW)
(Solar Systems, Photovoltaic Barometer, Nisan 2006)

Ülke	2004 Güç (MW)	2005 Güç (MW)
Almanya	503,000	603,000
İspanya	10,589	20,200
Fransa	5,230	6,367
İtalya	5,000	5,000
İngiltere	2,261	2,500
Avusturya	2,347	2,250
Hollanda	5,660	2,100
Yunanistan	1,300	0,900
Portekiz	0,631	0,600
Belçika	0,336	0,502
Danimarka	0,445	0,350
İsveç	0,285	0,310
Finlandiya	0,300	0,300
Kıbrıs	0,155	0,280
İrlanda	0,020	0,200
Slovenya	0,033	0,116
Çek Cumhuriyeti	0,086	0,114
Polonya	0,127	0,083
Lüksemburg	8,030	0,066
Macaristan	0,038	0,038
Malta	0,000	0,009
Estonya	0,000	0,001
Letonya	0,000	0,001
Slovakya	0,000	0,000
Litvanya	0,000	0,000

Güneş enerjisi ile ilgili ihtiyaç ve yatırımların artması büyük firmaların bu konuya yönelmesine vesile olmuştur. Sharp, Sanyo, BP ve Shell gibi büyük firmalar bu konuda yatırımlarını ve kapasitelerini arttırmaktadırlar. Çizelge 2.2’de dünyanın en büyük fotovoltaik pil üreticilerinin 2004 ve 2005 yıllarındaki üretimleri ve pazar payları görülmektedir.

Çizelge 2.2 En büyük 12 fotovoltaik pil üreticisi ve üretim rakamları (MW)
(Solar Systems, Photovoltaic Barometer, Nisan 2006)

Şirketler	2004	2005	% Büyüme	Pazar Payı
Sharp	324,0	428,0	%32,1	%24,8
Q-Cells	75,0	160,0	%113,3	%9,3
Kyocera	105,0	142,0	%35,2	%8,2
Sanyo	65,0	125,0	%92,3	%7,2
Mitsubishi	75,0	100,0	%33,3	%5,8
Schott Solar	63,0	95,0	%50,8	%5,5
BP Solar	85,0	90,0	%5,9	%5,2
Suntech	28,0	80,0	%185,7	%4,6
Motech	35,0	60,0	%71,4	%3,5
Shell Solar	72,0	59,0	-%18,1	%3,4
Isofoton	53,0	53,0	%0,0	%3,1
Deutsche Cell	28,0	38,0	%35,7	%2,2
Diğer Şirketler	187,0	297,0	%58,8	%17,2
Toplam	1195,0	1727,0	%44,5	%100,0

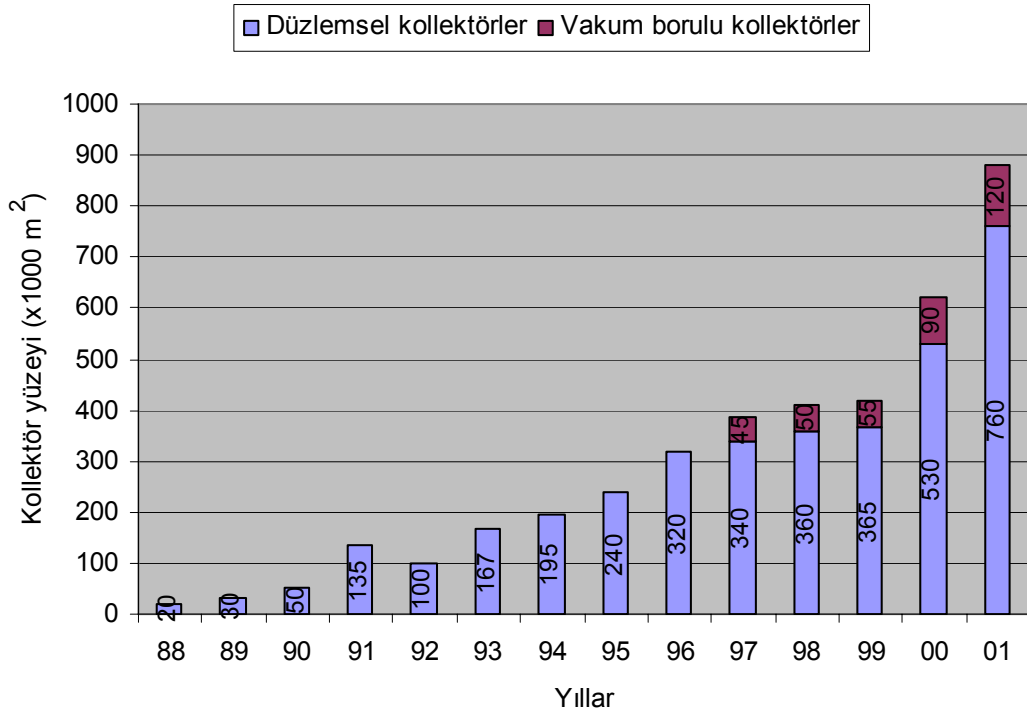
Büyük firmaların kapasite artırımları da bu konuya olan eğilimin arttığına diğer bir işarettir. Toplamdaki rakamlara bakıldığında %44,5 oranındaki artış sektörün ne denli bir hızla büyüdüğünü açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Güneş enerjisine olan yönelmeye devletlerin de katkıda bulunması önemli bir noktadır. Bu konuda Almanya güzel bir örnek teşkil etmektedir. Güneş enerjisi gibi çeşitli alternatif enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak için çeşitli teşvik programları bulunmaktadır. 01.02.2003 tarihinde yürürlüğe giren ve halen geçerli olan teşvik programına göre düzlemsel ve vakum borulu kollektörler için devlet tarafından kurulan her m² kollektör yüzeyi için tüketicilere 125€ teşvik bedeli ödenmektedir. 2002 yılında bu rakam 92 €/m²'dir. Bu programın amacı şunlardır:

- 1990-2005 yılları arasında CO₂ emisyonlarını %25 oranında azaltmak
- Yeni yapılarda %30'a varan enerji tasarrufu sağlamak
- Enerji tasarrufunu yapılarda sistem tekniği ve yalıtım ile birlikte gerçekleştirmek.

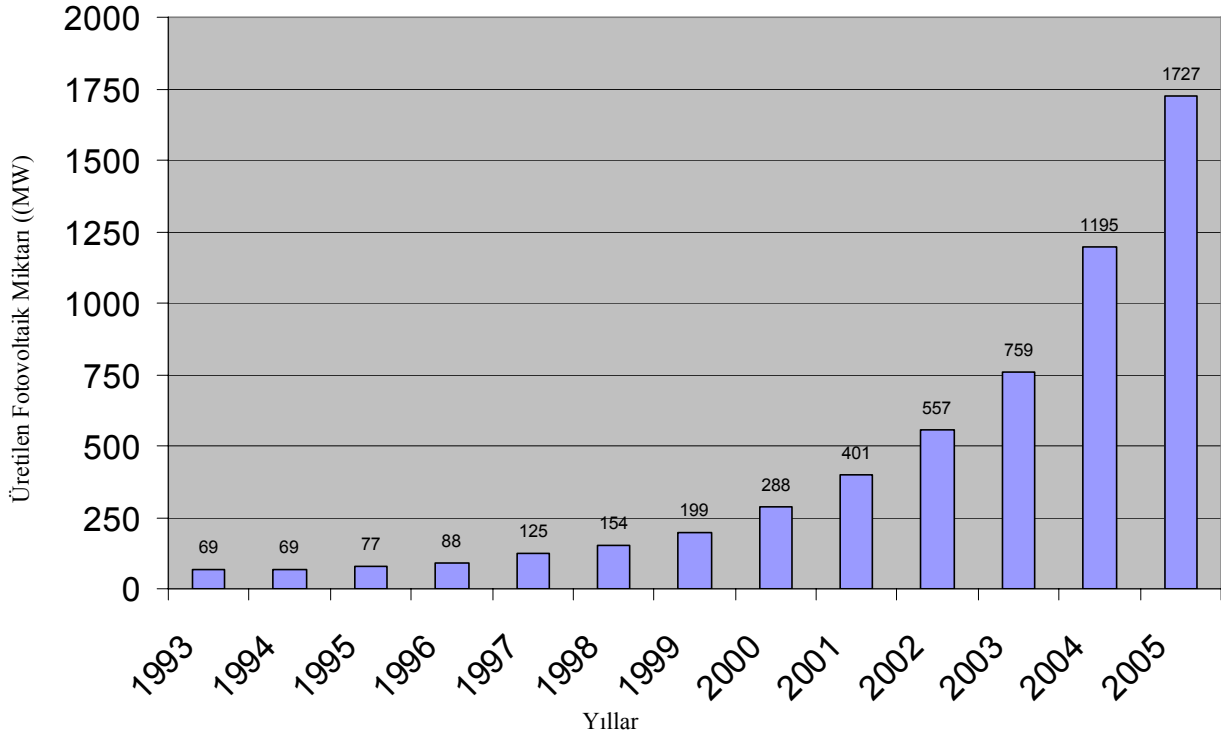
(Viesmann Isı Teknikleri A.Ş., 2006)

Aşağıdaki şekil Almanya’da devletin uyguladığı teşvik politikasının ne denli başarılı bir sonuç verdiğini göstermektedir. Şekilde Almanya’da 1988-2001 yılları arasında kurulan kolektörlerin toplam yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 2.2 Almanya’da 1988-2001 yılları arasında kurulan kolektör yüzey miktarı (Viesmann Isı Teknikleri A.Ş., 2006)

Aşağıdaki şekilde ise dünyadaki fotovoltaik pil üretiminin gelişimi görülmektedir. 12 yıllık bir süreçte fotovoltaik pil üretiminin yaklaşık 25 kat arttığı görülmektedir.



Şekil 2.3 1993-2005 Yılları arasında dünyada üretilen toplam fotovoltaik pil miktarı (MW) (Solar Systems, Photovoltaic Barometer, Nisan 2006)

2.2 Türkiye’de Güneş Enerjisi Durumu

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı konumdadır. Güneşten dünyaya saniyede yaklaşık olarak 170 milyon MW enerji gelmektedir. Türkiye’nin yıllık enerji üretiminin 100 milyon MW olduğu düşünülürse bir saniyede dünyaya gelen güneş enerjisi, Türkiye’nin yıllık enerji üretiminin 1,7 katıdır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nde (DMI) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden yararlanarak EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye’nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saattir. Bu da günlük 7,2 saate karşılık gelmektedir. Ortalama toplam ışınım şiddetinin 1.311 kWh/m²/yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Türkiye, 110 gün gibi yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir ve gerekli yatırımların yapılması halinde Türkiye yılda birim

metrekaresinden ortalama olarak 1.100 kWh'lik güneş enerjisi üretebilir (Gönüllü ve Varınca, 2006). Çizelge 2.3'te Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin aylara göre dağılımı verilmiştir.

Çizelge 2.3 Türkiye'nin toplam güneş enerjisi potansiyelinin aylara göre dağılımı (www.eie.gov.tr)

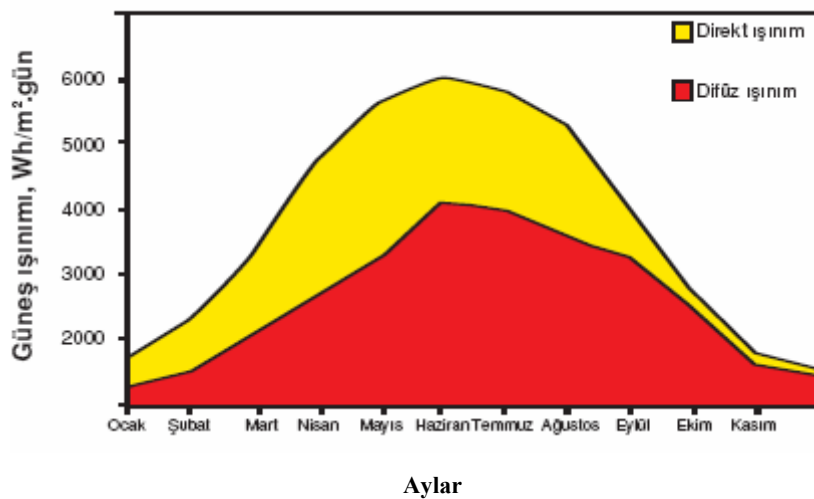
Aylar	Aylık Toplam Güneş Enerjisi (kcal/cm ² -ay)	(kWh/m ² -ay)	Güneşlenme Süresi (saat/ay)
Ocak	4,45	51,75	103,0
Şubat	5,44	63,27	115,0
Mart	8,31	96,65	165,0
Nisan	10,51	122,23	197,0
Mayıs	13,23	153,86	273,0
Haziran	14,51	168,75	325,0
Temmuz	15,08	175,38	365,0
Ağustos	13,62	158,40	343,0
Eylül	10,60	123,28	280,0
Ekim	7,73	89,90	214,0
Kasım	5,23	60,82	157,0
Aralık	4,03	46,87	103,0
Toplam	112,74	1311,00	2640
Ortalama	308,0 cal/cm²-gün	3,6 kWh/m²-gün	7,2 saat/gün

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güneydoğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Çizelge 2.4'te Türkiye güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı verilmiştir.

Çizelge 2.4 Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı
(www.eie.gov.tr)

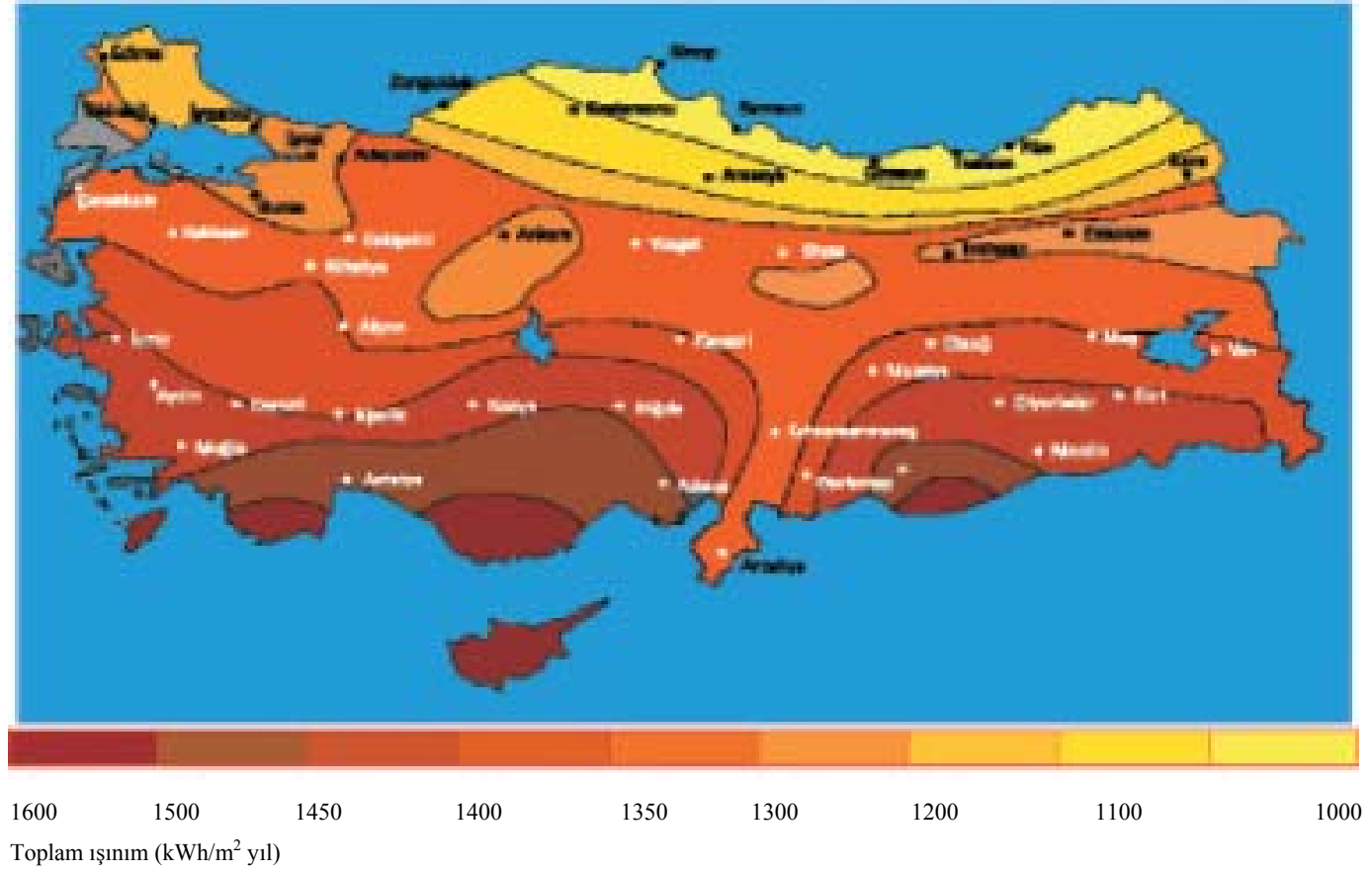
Bölge	Toplam ortalama güneş Enerjisi kWh/m ² - yıl	En çok güneş enerjisi (Haziran) kWh/m ²	En az güneş enerjisi (Aralık) kWh/m ²	Ortalama güneşlenme süresi saat/yıl	En çok güneşlenme süresi (Haziran) saat	En az güneşlenme süresi (Aralık) saat
Güneydoğu Anadolu	1.460	1.980	729	2.993	407	126
Akdeniz	1.390	1.980	476	2.956	360	101
Doğu Anadolu	1.365	1.863	431	2.664	371	96
İç Anadolu	1.314	1.855	412	2.628	381	98
Ege	1.304	1.723	420	2.738	373	165
Marmara	1.168	1.529	345	2.409	351	87
Karadeniz	1.120	1.315	409	1.971	273	82

Şekil 2.4 ve 2.5'te ise sırasıyla Türkiye'de yeryüzüne düşen toplam ışınım ve Türkiye'nin güneş ışınımı haritası verilmiştir.



Şekil 2.4 Türkiye'de yeryüzüne düşen toplam ışınım*

* Direkt ışınım : Güneşten direkt olarak gelen ışınım
Difüz ışınım : Yansıtılarak yayılan ışınım



Şekil 2.5 Türkiye'nin güneş ışı nım haritası (Viesmann Isı Teknikleri A.Ş., 2006)

2.2.1 Türkiye’de Güneş Enerjisi Uygulamaları ve Politikaları

Önceki bölümde bahsedildiği gibi Türkiye güneş enerjisi açısından potansiyeli yüksek bir ülkedir. Hatta yeni yapılacak ölçümlerde bu verilerin daha da yüksek geleceği beklentisi hakimdir. Türkiye’de güneş enerjisinin ne derece önemli rol oynayabileceğinin anlaşılması için Türkiye’deki enerji üretim, tüketim ve fiyatlar hakkında bilgi sahibi olmak daha sağlıklı olacaktır. Çizelge 2.5’te Türkiye’de 1980-2005 yılları arasındaki enerji üretimi, çizelge 2.6’da Türkiye’de 1980-2005 yılları arasındaki enerji tüketimi, çizelge 2.7’de ise Türkiye’de 1993 ile 2005 yılları arasındaki enerji fiyatları görülmektedir.

Çizelge 2.5 Türkiye'nin 1980-2005 yılları arasındaki enerji üretimi (ETKB)

YILLAR	TAŞKÖMÜRÜ (BinTon)	LİNYİT (BinTon)	ASFALTİT (BinTon)	PETROL (BinTon)	DOĞAL GAZ (10 ⁶ m ³)	HİDROLİK (GWh)	JEOTERMAL		RÜZGAR (GWh)	GÜNEŞ (BinTep)	ODUN (BinTon)	HAYVAN VE BITKİ ART. (BinTon)	TOPLAM (BinTep)
							ELEKTRİK (GWh)	ISI (BinTep)**					
1980	3598	14469	558	2330	23	11348		60			15765	12839	17358
1981	3970	16476	560	2363	16	12616		60			16023	12689	18299
1982	4008	17804	860	2333	45	14167		82			16760	12607	19186
1983	3539	20956	750	2203	8	11343		100			17086	12748	19313
1984	3632	26115	225	2087	40	13426	22	178			17256	11978	20322
1985	3605	35869	523	2110	68	12045	6	232			17368	11039	21935
1986	3526	42284	607	2394	457	11873	44	304		5	17570	11343	23538
1987	3461	42896	631	2630	297	18618	58	324		10	17693	11059	25077
1988	3256	35338	624	2564	99	28950	68	340		13	17711	10987	24607
1989	3038	48762	416	2876	174	17940	63	342		19	17815	10885	25754
1990	2745	44407	276	3717	212	23148	80	364		28	17870	8030	25478
1991	2762	43207	139	4451	203	22683	81	365		41	17970	7918	25501
1992	2830	48388	213	4281	198	26568	70	388		60	18070	7772	26794
1993	2789	45685	86	3892	200	33951	78	400		88	18171	7377	26441
1994	2839	51533		3687	200	30586	79	415		129	18272	7074	26511
1995	2248	52758	67	3516	182	35541	86	437		143	18374	6765	26719
1996	2441	53888	34	3500	206	40475	84	471		159	18374	6666	27386
1997	2513	57387	29	3457	253	39816	83	531		179	18374	6575	28209
1998	2156	65204	23	3224	565	42229	85	582	6	210	18374	6396	29324
1999	1990	65019	29	2940	731	34678	81	618	21	236	17642	6184	27659
2000	2392	60854	22	2749	639	30879	76	648	33	262	16938	5981	26047
2001	2494	59572	31	2551	312	24010	90	687	62	287	16263	5790	24576
2002	2319	51660	5	2420	378	33684	105	730	48	318	15614	5609	24259
2003	2059	46168	336	2375	561	35330	89	784	61	350	14991	5439	23783
2004	1946	43709	722	2276	708	46084	93	811	58	375	14393	5278	24332
2005*	2170	55282	888	2281	980	39561	94	926	59	385	13819	5127	25185

*2005 verileri tahmini verilerdir. ** 1000 kWh = 0,086 TEP

Çizelge 2.6 Türkiye'nin 1980-2005 yılları arasındaki enerji tüketimi (ETKB)

YILLAR	TAŞKÖMÜRÜ (BinTon)	LİNYİT (BinTon)	ASFALTİT (BinTon)	PETROL (BinTon)	DOĞAL GAZ (10 ⁶ m ³)	HİDROLİK (GWh)	JEOTERMAL		RÜZGAR (GWh)	GÜNEŞ (BinTep)	ODUN (BinTon)	HAYVAN VE BİTKİ ART.	ELEKTRİK	ELEKTRİK	TOPLAM (BinTep)
							(BinTon)	İTHALATI (GWh)				İHRACATI (GWh)			
1980	4630	15243	558	15309	23	11348		60		15765	12839	1341		31973	
1981	4522	16179	560	15090	16	12616		60		16023	12689	1616		32049	
1982	5044	17716	861	16127	45	14167		82		16760	12607	1773		34388	
1983	5336	20663	750	16705	8	11343		100		17086	12748	2221		35697	
1984	5678	25632	225	16990	40	13426	22	178		17256	11978	2653		37425	
1985	6189	34767	523	17270	68	12045	6	232		17368	11039	2142		39399	
1986	6545	42354	607	18688	457	11873	44	304	5	17570	11343	777		42472	
1987	7220	40653	631	21239	735	18618	58	324	10	17693	11059	572		46883	
1988	7525	33080	624	21302	1225	28950	68	340	13	17711	10987	381		47910	
1989	6825	47557	409	21732	3162	17940	63	342	19	17815	10885	559		50705	
1990	8191	45891	287	22700	3418	23148	80	364	28	17870	8030	176	-907	52987	
1991	8824	48851	139	22113	4205	22683	81	365	41	17970	7918	759	-506	54278	
1992	8841	50659	197	23660	4612	26568	70	388	60	18070	7772	189	-314	56684	
1993	8544	46086	102	27037	5088	33951	78	400	88	18171	7377	213	-589	60265	
1994	8192	51178	0	25859	5408	30586	79	415	129	18272	7074	31	-570	59127	
1995	8548	52405	66	27918	6937	35541	86	437	143	18374	6765	0	-696	63679	
1996	10892	54961	34	29604	8114	40475	84	471	159	18374	6666	270	-343	69862	
1997	12537	59474	29	29176	10072	39816	83	531	179	18374	6575	2492	-271	73779	
1998	13146	64504	23	29022	10648	42229	85	582	6	210	18374	6396	3299	-298	74709
1999	11362	64049	29	28862	12902	34678	81	618	21	236	17642	6184	2330	-285	74275
2000	15525	64384	22	31072	15086	30879	76	648	33	262	16938	5981	3791	-437	80500
2001	11176	61010	31	29661	16339	24010	90	687	62	287	16263	5790	4579	-433	75402
2002	18830	52039	5	29776	17694	33684	105	730	48	318	15614	5609	3588	-435	78331
2003	17535	46051	336	30669	21374	35330	89	784	61	350	14991	5439	1158	-588	83826
2004	18904	44823	722	31729	22446	46084	93	811	58	375	14393	5278	464	-1144	87818
2005*	19421	56577	738	30016	27314	39561	94	926	59	385	13819	5127	636	-1798	91576

*2005 verileri tahmini verilerdir.

Çizelge 2.7 Türkiye’de 1993-2005 yılları arasındaki enerji fiyatları (ETKB)

Yıllar	Fuel Oil	Gaz Yağı	Motorin	Kurşunsuz Benzin	Normal Benzin	Doğal Gaz (Sanayi)	Doğal Gaz (Mesken)	Linyit (Sanayi)	Linyit (Mesken)	Taşkömürü (Sanayi)	Elektrik (Sanayi)	Elektrik (Mesken)
	YTL/Ton	YTL/Litre	YTL/Litre	YTL/Litre	YTL/Litre	YTL/10 ⁷ kcal	YTL/10 ⁷ kcal	YTL/Ton	YTL/Ton	YTL/Ton	YTL/Kwh	YTL/Kwh
1993	1,68	0,005	0,005	0,007	0,007	1,7	2,9	0,47	0,73	0,52	0,001	0,0011
1994	3,6	0,012	0,01	0,016	0,016	4,2	6,2	0,94	1,5	1,32	0,0023	0,0023
1995	8	0,022	0,019	0,029	0,029	7,2	9,6	1,64	2,65	3,44	0,0035	0,0035
1996	15	0,044	0,04	0,056	0,056	15,3	17	2,99	5,28	7,15	0,007	0,0072
1997	27,6	0,085	0,079	0,116	0,117	30,2	36,2	5,82	9,57	14,64	0,0117	0,0121
1998	40	0,128	0,119	0,192	0,195	44,9	56,8	9,78	14,94	21,38	0,0196	0,0206
1999	72,8	0,25	0,237	0,363	0,365	68	94,6	14,74	22,89	25,87	0,0333	0,035
2000	128,9	0,435	0,435	0,583	0,582	109,4	162,1	20,22	32,37	43,69	0,05	0,0528
2001	222,6	0,776	0,733	0,992	0,993	246,2	297,9	39,08	52,89	76,8	0,0974	0,1027
2002	400,5	1,084	1,096	1,477	1,481	325,8	385,1	63,78	79,9	113,69	0,1424	0,1499
2003	457,4	1,308	1,394	1,804	1,81	344	398,8	66,95	89,47	120,93	0,1494	0,1587
2004	493,6	1,4	1,539	1,959	1,966	328,4	371,1	58,15	106,89	147,6	0,1428	0,1583
2005	731,1	1,84	1,956	2,535	2,52	408,4	485,5	64,1	118,2	173,07	0,1428	0,1583

Çizelgelerden de rahatça görüldüğü gibi enerji tüketimi hızla artmakta, enerji üretimi tüketimi karşılamada gittikçe yetersiz kalmaktadır. Fosil yakıt fiyatları da hızla artmaktadır. Ülkemizde her türlü enerji kaynağı mevcut olmasına rağmen üretilen enerji tüketilen enerjiyi karşılamamakta ve tüketilen enerjinin yaklaşık %66'sı ithal edilmektedir. Ayrıca Türkiye kişi başı milli gelire oranla hem konutta hem de sanayide dünyanın en pahalı enerjisini kullanan ülkelerden biridir.

Birçok enerji kaynağı açısından zengin olan ülkemiz ne yazık ki bu kaynakları yeterince verimli olarak kullanamamaktadır. Enerji politikası olarak Türkiye'nin izlemesi gereken önemli noktalar şunlardır:

- Her çeşit mevcut enerji kaynağının geliştirilmesinin yanı sıra milli anlamda yeni kaynak aramalarına hız verilmelidir
- Yerli kaynakların kullanımı ve geliştirilmesine öncelik verilmelidir
- Farklı teknolojiler kullanılmalı ve geliştirilmelidir
- Bu bağlamda, henüz gerektiği gibi değerlendirilemeyen ve tamamen milli kaynaklara dönük jeotermal ısı, güneş, rüzgar gibi yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının en kısa zamanda enerji arzına katkısı hedeflenmelidir.

Çeşitli işletmeler arasında yapılan ankette devletin teşvik politikası geliştirmesi durumunda %94,7'lik bir dilimin fotovoltaik sistem uygulamaya sıcak baktığı sonucu ortaya çıkmıştır (Benli vd., 2004)

Son maddede bahsedilen güneş enerjisinden ülkemizde belli ölçüler çerçevesinde yararlanılmaktadır. Türkiye'de güneş enerjisinin en yaygın kullanımı sıcak su ısıtma sistemleridir. Halen ülkemizde kurulu olan güneş kollektörü miktarı 2001 yılı için 7,5 milyon m² civarındadır. Çoğu Akdeniz ve Ege Bölgelerinde kullanılmakta olan bu sistemlerden yılda yaklaşık 290 bin TEP ısı enerjisi üretilmektedir. Sektörde 100'den fazla üretici firmanın bulunduğu ve 2000 kişinin istihdam edildiği tahmin edilmektedir. Yıllık üretim hacmi 750 bin m² olup bu üretimin bir miktarı da ihraç edilmektedir. Bu haliyle ülkemiz dünyada kayda değer bir güneş kollektörü üreticisi ve kullanıcısı durumundadır (EİE).

Güneş kollektörlerinin ürettiği ısı enerjisinin birincil enerji tüketimimize katkısı yıllara göre Çizelge 2.8'de görülmektedir.

Çizelge 2.8 Güneş kollektörlerinin ürettiği ısı enerjisinin birincil enerji tüketimimize katkısı

Yıl	Güneş Enerjisi Üretimi (bin TEP)
1998	210
1999	236
2000	262
2001	290
2002	318
2003	350
2004	375
2005	385

Güneş pilleri, halen ancak elektrik şebekesinin olmadığı, yerleşim yerlerinden uzak yerlerde ekonomik yönden uygun olarak kullanılabilir. Bu nedenle ve istenen güçte kurulabilmeleri nedeniyle genellikle sinyalizasyon, kırsal elektrik ihtiyacının karşılanması vb. gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ülkemizde halen telekom istasyonları, Orman Genel Müdürlüğü yangın gözetleme istasyonları, deniz fenerleri ve otoyol aydınlatmasında kullanılan güneş pili kurulu gücü 300kW civarındadır (EİE).

2.3 Güneş Enerjisi Kullanım Alanları

Farklı gelişme aşamalarında, çeşitli güneş enerjisi elde etme teknikleri mevcuttur. Bunlardan bazıları, araştırmalarının ilk aşamalarında, bazıları ise daha ilerlemiş seviyelere ulaşmıştır. Güneş enerjisi sistemlerinin başlıca tipleri şunlardır :

- Termodinamik Sistemler

- Fotovoltaik Sistemler

2.3.1 Termodinamik Sistemler

Termodinamik sistemler aktif ve pasif güneş sistemleri olarak ikiye ayrılırlar.

2.3.1.1 Pasif Güneş Sistemleri

Pasif güneş sistemleri, güneş enerjisi kullanımı için geliştirilen en eski sistemlerden biridir. En yoğun kullanımı binaların ısıtma ve soğutması için dizayn ve mimarisindedir. Güneş mimarisinde, güneş enerjisi yoğunluk ve süresinin ısı, ışık ve sağlığa yararlı, istenilen etkilerini elde edebilmek, buna karşın yüksek sıcaklık, aşırı aydınlık ve kişilere ve malzemelere zarar

verecek, istenmeyen etkilerinden ise korunulacak şekilde kontrol edilmesi ve kullanılması çok önemlidir.

Pasif güneş sistemleri üç grupta toplanabilir:

2.3.1.1.1 Direk Toplama

Bu sistemlerde, güneş enerjisi kuzey yarım küre için, güneye bakan yönde düşey bir pencere yardımıyla toplanır. Gün boyunca gelen güneş enerjisi gece kullanılmak üzere, taban, tavan ve duvarlar gibi bina elemanları tarafından emilir.

2.3.1.1.2 Termal Depolama Duvarı (Trombe Wall)

Bu sistemlerde güneye bakan bir pencerenin arkasında, ısı kollektörü vazifesi gören bir duvar vardır. Bu sistemlerin avantajı, içerisini ekstrem şartlardan izole etmesi, duvar arkasındaki odanın sıcaklık değişimlerinden etkilenmemesi, istenmeyen veya malzemelere zarar verebilecek direk ışıktan da korumasıdır. Termal depolama duvarı, özellikle güneşli fakat soğuk kışların görüldüğü iklim kuşakları için çok uygundur.

2.3.1.1.3 Güneş Uzayı (Boşluğu)

Bu sistem direk toplama ve termal depolama duvarı sistemlerinin bir kombinasyonu gibidir. Pencere ile güney yönündeki duvar arasında bir sera oluşturulmuş şeklindedir.

Pasif güneş sistemlerinin başlıca uygulama alanları şunlardır :

- Binaların kışın ısıtılmasında, yazın ise ısınmayı önleyecek koşulların sağlanmasında
- Seraların ısıtılmasında
- Ziraî ürünlerin kurutulmasında

Güneş enerjisi binalarda, herhangi bir elektromekanik gereç kullanılmadan ısıya dönüştürülür. Isı transferi ve akışkanın çevrimi doğal yollarla olur. Pasif güneş ısı sistemleri, pencereler gibi enerji kollektör elemanları veya bina duvarları gibi depolama elemanlarını da içermektedir.

2.3.1.2 Aktif Güneş Sistemleri

Isı, pek çok uygulama alanında, farklı sıcaklıklarda gereklidir ve faydalı enerji tiplerinin büyük bir bölümünü temsil eder. Güneş radyasyonunu ısıya dönüştüren sistemler çok çeşitlidir. En basit güneş kolektörleri ile bir kaç yüz watt, güneş güç istasyonlarıyla birkaç yüz megawatt'a kadar enerji elde edilebilir. Aktif sistemler, ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi gibi amaçlarla kullanılabilir. Aktif güneş sistemleri stasyoner (sabit) veya sun-tracking (güneş tarayıcı sistemler) olabilirler.

Termal stasyoner sistemlerde güneş enerjisi sabit bir toplayıcı (kolektör) ile toplanır, daha sonra ısıya dönüştürülerek bir akışkana transfer edilir. Bunlar kolektör tiplerine göre sınıflandırılır. Kolektör çeşitleri aşağıdaki gibidir :

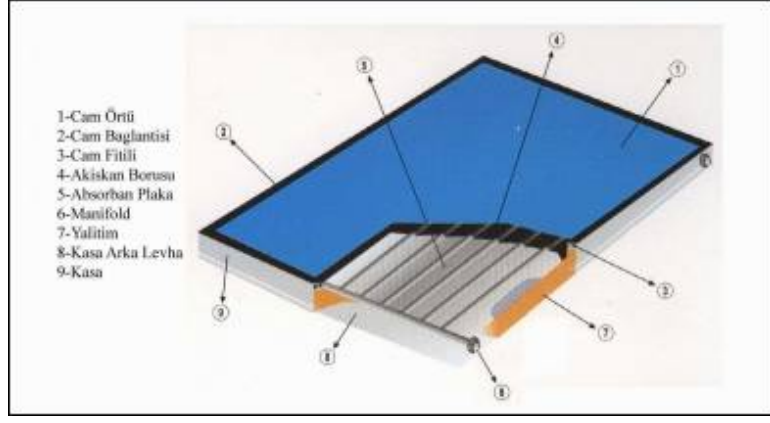
- Flat-plate kolektör (Düz plakalı kolektörler)
- Vakum borulu (tüplü) kolektörler
- Hareketli kolektör
- Solar ponds (güneş havuzları)

2.3.1.2.1 Flat-plate Kolektörler

Bu tip kolektörler çok yaygın olarak kullanılan ve teknik olarak da en gelişmiş olanlardır, aynı zamanda güneş enerjisi kullanımının en eski teknolojilerinden birisidir. Kullanım amaçları şunlardır :

- Düşük sıcaklıklarda su ısıtılması
- Binaların ısıtılması ve soğutulması
- Dondurulma
- Organik maddelerin kurutulması

Şekil 2.6'da düzlemsel kolektör ve bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Flat-plate kollektör (EİE)

2.3.1.2.2 Vakum Tüplü Kollektörler

Vakum tüplü sistemlerde her bir vakum tüp iç içe geçmiş iki adet cam tüpten oluşmaktadır. İki tüp arasındaki hava emilerek vakum ortamı yaratılmakta ve her türlü ısı kaybı en düşük seviyeye indirilmektedir. Dış tüp, darbelere son derece dayanıklı malzeme olan borosilikat ile imal edilmektedir. İç tüp de aynı malzemeden üretilmiş ancak özel bir yüzey (Al - N/Al) ile kaplanmıştır. Bu özel kaplama ve paslanmaz çelik reflektör sayesinde güneş ışınlarının %93'ü maksimum verimle emilerek ısıya çevrilmekte ve güneş ışınlarının geri yansımaya oranı da minimuma (%7) indirilmektedir.

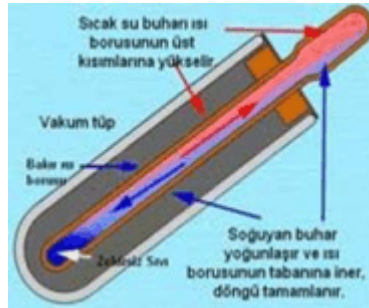
İki tüp arasındaki vakum ortamını oluşturmak için baryum toplayıcı kullanılmaktadır (televizyon tüplerinde olduğu gibi). Üretim esnasında bu toplayıcı çok yüksek sıcaklıklara maruz bırakılır ve bu şekilde vakum tüpün dip kısmı saf bir baryum tabakası ile kaplanır. Bu baryum tabakası aktif olarak işlem esnasında tüpten açığa çıkan CO, CO₂, N₂, O₂, H₂O ve H₂ gibi gazları absorbe eder ve bu sayede vakumun oluşmasını sağlar. Baryum tabakası aynı zamanda vakumun doğru bir şekilde yapılıp yapılmadığını da gösterir. Eğer tüpteki vakum kaybolacak olursa gümüş renkli baryum tabaka beyaza döner. Bu da bir vakum tüpün doğru şekilde çalışıp çalışmadığının kolayca anlaşılmasını sağlar. Vakum tüplü güneş enerjisi sistemleri bulutlu havalarda alternatif sistemlere göre çok daha iyi netice verirler. Bunun sebebi vakum tüplerin bulutlar arasından geçen infrared ışınlarından enerji absorbe edebilme özelliğine sahip olmasındandır. Vakumun en iyi izolasyon olması sebebiyle vakum tüpler düzlemsel kollektörlere nispeten rüzgarlı havalardan ve düşük sıcaklıklardan daha az etkilenirler.

Düzlemsel kollektörlerde ise güneş ışınımının emilimi vakum tüplere göre % 20 daha az olur. Vakum tüpler yuvarlak olduğu için güneş ışınları yüzeye her zaman dik gelmekte ve böylece yansımaya minimize edilmektedir. Eğer kollektör yüzeyi düz ise, güneş kollektörlerine gelen ışığın enerjiye çevrilmesi ancak gün ortasında maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Buna karşılık vakum tüpler yuvarlak yapıda olduğu için gün doğumundan gün batımına kadar gelen güneş ışıklarından enerji üretimi çok daha fazla olmaktadır.

2.3.1.2.3 Isı Borulu Vakum Tüplü Kollektörler

Isı çubuklu vakum tüp de iç içe geçmiş ve aralarındaki hava vakum edilmiş iki adet cam tüpten oluşmaktadır. Buna ek olarak tüpün içerisine bakır bir ısı çubuğu yerleştirilmiştir. Vakum tüp içerisindeki bakır ısı çubuğu, ısıyı uç kısmındaki yoğunlaşma çubuğu bölümüne iletir ve ısı bu kısımdan suya aktarılır.

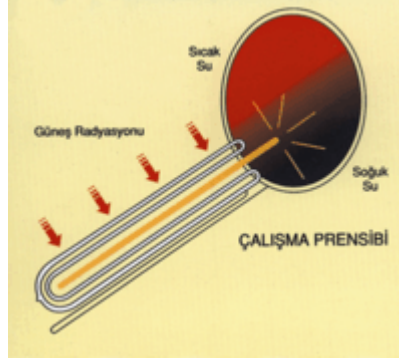
Şekil 2.7’de ısı çubuklu vakum tüpü oluşturan, cam vakum tüp, bakır ısı çubuğu ve alüminyum ısı transfer kanatları görülmektedir. Bakır ısı çubuğu iki adet alüminyum ısı transfer kanadının arasına yerleştirilerek cam vakum tüpün merkezine yerleştirilmiştir. Alüminyum kanatlar, hem bakır ısı çubuğu hem de vakum tüpün iç yüzeyi ile temas alanının maksimize edilmesi için kalıpta özel forma sokulmuştur. Bu özel form bakır ısı çubuğuna ve dolayısıyla da suya yapılan ısı transferini büyük oranda artırmaktadır.



Şekil 2.7 Isı borulu vakum tüplü kollektör

Bakır ısı çubuğu ısıyı uç kısmındaki yoğunlaşma çubuğuna basit bir metodla iletmektedir. Bakır ısı çubuğunun iç kısmında ısı transfer sıvısı dolaşmaktadır. Bu sıvı bakır ısı çubuğunun merkezindeki boşluğa enjekte edilirken aynı zamanda içerideki hava vakumlu olduğundan düşük sıcaklıklarda dahi içerideki sıvı buharlaşabilir. Bu sıvı alkol veya saf su ile özel katkı maddeleri olabilir.

Bakır ısı çubuğu ısındığında buharlaşan sıvı, yoğunlaşma çubuğu bölümüne doğru yükselmeye başlar ve bu bölümde ısı suya transfer edilir. Kaybedilen ısı sebebiyle buhar yoğunlaşarak sıvı hale döner ve aynı döngüyü tekrar gerçekleştirmek üzere bakır çubuğunun tabanına doğru geri döner. Şekil 2.8'deki diyagram bu sistemin tasarımını ve çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 2.8 Isı borulu vakum tüplü kollektör çalışma prensibi

2.3.2 Fotovoltaik Sistemler

Bu sistemlerdeki voltaik toplayıcılarda, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için CdS ya da silikon maddelerinden güneş pili imal edilir. Bu maddeler üzerine gelen güneş ışınları anında elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır. Bu sistemlerde güneş izleme düzeni ile her an mümkün olan en yüksek güneş enerjisinden yararlanılır. Yapay uyduların elektrik enerjisi fotovoltaik toplayıcılardan sağlanmaktadır.

2.4 Güneş Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Güneş enerjisi her geçen gün önemi daha da artan ve üzerinde yapılan çalışmaların yoğunlaştırıldığı bir enerji kaynağıdır. Her türlü enerji kaynağında olduğu gibi güneş enerjisinin de avantajlı ve dezavantajlı yönleri bulunmaktadır.

2.4.1 Güneş Enerjisinin Avantajları

- 1-) Temiz bir enerji kaynağıdır, çevre kirliliğine yol açmaz.
- 2-) Sınırsız bir enerji kaynağıdır.
- 3-) Ulaştırma masrafı yoktur
- 4-) Bakım maliyetleri düşüktür

- 5-) Güneş enerjisi ile çalışan sistemler, kolayca taşınıp kurulabilen gerektiğinde enerji ihtiyacına bağlı olarak basitçe değiştirilebilen sistemlerdir.
- 6-) Güneş enerji sistemlerinin fiyatlarının zamanla azalması zaman ilerledikçe maliyetlerin aşağı inmesini sağlamaktadır.
- 7-) Güneş enerjisi ile ilgili gelişmeler aynı zamanda yeni iş kolları ve istihdam açılması anlamına gelmektedir.
- 8-) Enerji maliyetlerinde fosil yakıtlar gibi dalgalanmalar olmayacağı için enerji fiyatlarında da kimi zaman yaşanan krizlerin görülme ihtimali minimuma düşecektir.

2.4.2 Güneş Enerjisinin Dezavantajları

- 1-) İlk yatırım maliyeti yüksektir. Ancak zamanla kurulum maliyetlerinde azalma görülmektedir.
- 2-) Verim şu aşamada düşüktür. Ancak yeni AR-GE çalışmalarıyla verimin arttırılması söz konusudur.
- 3-) Güneş ışınlarının gündüz yeryüzüne gelmesi enerji üretiminin belli zaman dilimlerinde olmasına yol açmaktadır. Ayrıca yazın daha kuvvetli, kışın ise zayıf güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşması enerji üretim miktarında dengesizliğe yol açmaktadır. Bu da enerjinin depolanması ihtiyacını doğurmaktadır. Hidrojen de bu depolama işlemi için görünen en uygun enerji taşıyıcısıdır.
- 4-) Güneş enerjisiyle üretim ancak güneş ışınlarının kuvvetli olduğu bölgelerde enerji üretimini makul kılmaktadır. Bu da enerjinin iletilmesi gibi bir sonucu doğuracaktır.
- 5-) Güneşlenme süresi ve birim yüzeye düşen radyasyon açısından zengin bölgeler genelde turistik açıdan değerlendirilmekte ve bu bölgelerde arsa fiyatları yüksek olmaktadır.
(<http://www.koeri.boun.edu.tr/meteoroloji/enerji1.htm>)

3 GÜNEŞ ENERJİSİYLE HİDROJEN ÜRETİMİ

Gelecekteki enerji ihtiyacını karşılamada kullanılabilecek en iyi alternatif enerji kaynaklarından biri güneş enerjisidir. Bu yüzden güneş enerjisinin daha ekonomik olarak elektriğe, sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülebilmesi için uygulanabilir yöntemlerin geliştirilebilmesi yolunda yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır ve bazı yöntemler geliştirilmiştir. Fakat bunların diğer enerji kaynaklarıyla rekabet edebilmesi için elde edilmesinin daha ekonomik olması ve teknik kullanımlarının geliştirilmesi gerekir. Güneş enerjisi kullanarak hidrojen elde etmek ve enerji olarak kullanmak bu çalışmalar arasında üzerinde en çok durulanı ve tercih edilenidir.

3.1 Hidrojenin Özellikleri

Yakıt olarak kullanımı için son zamanlarda çalışmaların yoğunlaştırıldığı hidrojenin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

3.1.1 Fiziksel Özellikleri

- Renksizdir
- Kokusuzdur
- Doğadaki en basit atom yapısına sahiptir
- -252.77°C 'da sıvı hale getirilebilir
- Havadan 14,4 kez daha hafiftir
- Yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğal gazın 1/9'u, sıvı halde benzinin 1/10'u kadardır
- Sıvı hidrojenin hacmi gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ü kadardır
- Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir
- Üst ısı değeri 140,9 MJ/kg, alt ısı değeri 120,7 MJ/kg'dır
- 1 kg hidrojen 2,1 kg doğal gaz veya 2,8 kg petrolun sahip olduğu enerjiye sahiptir
- Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1,33 kat daha verimli bir yakıttır
- Evrende %90'dan fazla hidrojen bulunmaktadır.

3.1.2 Kimyasal Özellikleri

- Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur
- Yakıt olarak kullanıldığında atmosfere atılan ürün sadece su ve/veya su buharı olmaktadır

- Hidrojenin çekirdeğinde bir proton ve çevresinde yalnız bir elektron bulunur
- 5000 hidrojen atomunun birinin çekirdeğinde birde nötron bulunur (döteryum)
- Döteryum ile oksijenin birleştirilmesiyle ağır su elde edilir
- Çekirdeğinde iki nötron bulunan izotopu (tridyum) hidrojen bombası yapımında kullanılır.

Hidrojen, benzin ve metanın karşılaştırılması çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1 Hidrojen, benzin ve metanın karşılaştırılması
(<http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/hidrojen/hidgazi.html>)

	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk , (kg/m ³)	4.40	0.65	0.084
Hava içindeki difüzyonu (cm ² /s)	0.05	0.16	0.61
Sabit basınçta özgül ısısı, (J.g/K)	1.20	2.22	14.89
Havada ateşlenme sınırı (%hacim)	1.0-7.6	5.3-15.0	4.0-75.0
Havada ateşlenme enerjisi (MJ)	0.24	0.29	0.02
Ateşlenme sıcaklığı (°C)	228-471	540	585
Hava da alev sıcaklığı (°C)	2197	1875	2045
Patlama enerjisi (g.TNT . k/j)	0.25	0.19	0.17
Alev yayılması (emisivitesi), (%)	34-42	25-33	17-25

Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir (Üst ısıl değeri 140,9 MJ/kg, alt ısıl değeri 120,7 MJ/kg). 1 kg hidrojen 2,1 kg doğalgaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı sistemlerde, atmosfere atılan ürün sadece su ve su buharıdır. Hidrojen petrol yakıtlarına göre 1,33 kat daha verimli bir yakıttır. 1 kg sıvı hidrojenle bir araç ortalama 43-46 km, gaz hidrojenle ise 35 km yol katedebilir.

3.2 Güneş Enerjisi İle İlgili Literatür Çalışmaları

Güneş enerjisi ile hidrojen üretimi üzerine yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Aşağıda bu çalışmaların bazılarında örnekler verilmiştir.

Suudi Arabistan için Almogren ve Veziroğlu (2003) tarafından yapılan bir çalışmada solar-hidrojen enerji sistemi modeli geliştirilmiştir. Bu modelde nüfus, enerji talebi, enerji üretimi, hidrojen üretimi, enerji fiyatları, milli hasıla, çevresel zarar ve yaşam kalitesi değişkenleri modeli oluşturmak için seçilmiştir. Sonuç olarak fosil yakıtların fiyatlarının sürekli artacağı, hidrojen maliyetinin ise gelişen teknolojiyle düşeceği öngörülmüştür. 2010 yılından itibaren hidrojen

fiyatlarının fosil yakıtlarla rekabetçi hale gelebileceği, 2021 yılında ise fosil yakıt fiyatlarının hidrojen fiyatıyla aynı seviyede olacağı öngörülmüştür. 2021'den itibaren ise hidrojen fiyatlarının daha avantajlı hale geleceği öngörülmüştür. Suudi Arabistan'ın bu seçeneği düşünmemesi halinde enerji ihraç eden bir ülkeyken gelecekte enerji ithal eden bir ülke olabileceği belirtilmiştir. Ancak hidrojen konusunda çalışmalarını yoğunlaştırırsa güneş potansiyeli sayesinde gelecekte hidrojen ihraç eden bir ülke olabileceği belirtilmiştir.

Bunun haricinde bir çalışma da arabalarda yakıt olarak kullanılan hidrojenin yerel üretimi için Bilgen (2004) tarafından bir model geliştirilerek yapılmıştır. Bu modelde fotovoltaik-elektroliz sistemle hidrojen elde edilmesi tasarlanmıştır. Sistemin şu komponentlerden oluştuğu belirtilmiştir :

- Fotovoltaik düzen
- Maksimum güç noktası izleyici panel (MPPT)
- DC-AC dönüştürücüleri
- Elektroliz sistemi

MPPT ve DC-AC dönüştürücü sistemler tüm zaman için fotovoltaik sistemi maximum gücünde işletmek ve AC akım elektriğin ihtiyacını karşılamada kullanılır. Elektroliz sistemi anahtar teslimi olarak elektroliz hücreler şeklinde olup su hazırlama ünitesi, üretilen hidrojeni sıkıştırmak için kompresörden oluşur. ABD'nde 4 iklim bölgesinden 12 bölge (tropikal- alt tropikal , kuru, sıcak ve soğuk) seçilmiştir. Simülasyonlar bu farklı bölgelerdeki hidrojen üretimi için uygulanmış ve sonuçlar yatay yüzeylerde yıllık toplam güneş radyasyonunun fonksiyonu olarak $\text{kg/kW}_p\text{-yıl}$ hidrojen üretimi bağıntısının elde edilmesinde kullanılmıştır. Ekonomik fizibilite çalışmasında fotovoltaik ve elektroliz sistem fiyatları değişken olarak alınmıştır. Tüm kapitalin aylık ödemelerle geri ödenmek üzere finansal kurumlardan borç alındığı kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçta sabit fotovoltaik panellerle hidrojen üretiminin $26\text{-}42 \text{ kg/kW}_p\text{-yıl}$ ve fiyatın $25\text{-}268 \text{ \$/GJ}$ arasında değiştiği bulunmuştur. Sonuç olarak bu maliyetlerin günümüzdeki fosil yakıt maliyetleriyle rekabet edemeyecek olmasıyla birlikte, gelecekte fosil yakıt maliyetlerinin artacağı ve gelişen teknolojiyle hidrojen maliyetinin düşeceği göz önünde tutularak hidrojenin gelecekte bu sistemle üretilerek kullanılabilceği belirtilmiştir.

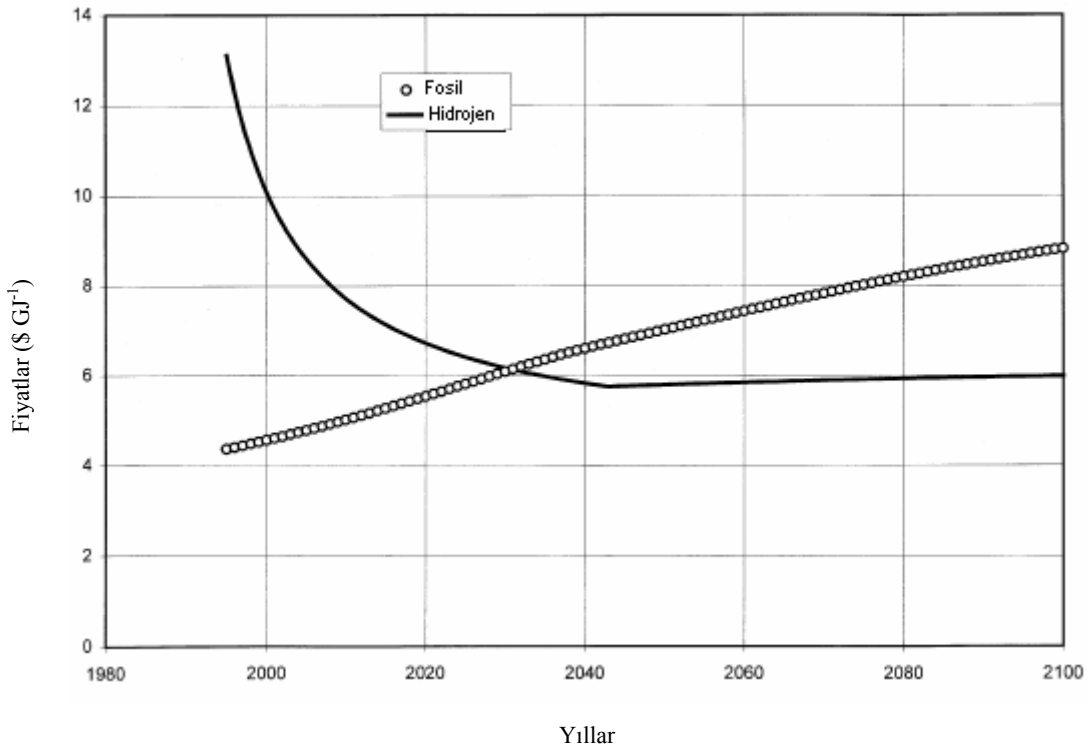
Bunların dışında Abdallah vd. (1999), Mısır'da devletin Toshka Çölü'nde düşündüğü çok amaçlı proje için solar-hidrojen sisteminin kurulmasının avantajlarını vurgulayan bir çalışma

yapmışlardır. Bu projenin amaçları Nil Nehri'nden sağlanacak suyla toprağı verimli hale getirmek ve bunun yanında enerji elde etmektir. Bu bölgede güneş enerjisi yıllık ortalama 2500 kWh/m²'yi aşmaktadır. Bu rakam solar-hidrojen enerji sistemi kurulması için ideal görünmektedir.

Hidrojen enerji taşıyıcısı olarak seçilmiştir çünkü temizdir, yenilenebilirdir, depolanabilirdir, taşınabilirdir, nakliye için kullanılabilir ve yakın gelecekte PV elektrolizleri yoluyla daha da ekonomiklik kazanacaktır. Hidrojen üretim yöntemi olarak ise suyun elektrolizi ön plana çıkmaktadır. Bunun nedenleri şunlardır:

- 1-) Fotovoltaikler bütün olasılıklar içinde uzun süreli kullanım için en uygun yollardan biridir
- 2-) Elektroliz cihazları direk solar-fotovoltaik elektriğe bağlanabilir
- 3-) Suyun elektrolizi oldukça geliştirilmiş bir metottur.

Solar-hidrojen enerji sistemi hesaplamaları yapılırken nüfus, enerji talebi, enerji üretimi, hidrojen üretimi, enerji fiyatları, gayri safi milli hasıla, hava kirliliğı ve yaşam kalitesi kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda zamanla fosil yakıt fiyatlarının artacağı, hidrojen fiyatlarının ise azalacağı öngörülmüştür. Bununla ilgili şekil aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1 Fosil yakıt ve hidrojen fiyatlarının zamanla değişimi (Abdallah vd., 1999)

Yapılan çalışmada 2030 yılı civarında hidrojen ve fosil yakıt fiyatlarının eşit olacağı öngörülmüştür. Sonrasında ise hidrojen maliyeti fosil yakıt maliyetinin altında olacaktır. Sonuç olarak hidrojenin kirliliği azaltması, fosil yakıt rezervlerinin kimyasal endüstri ve ihraç için korunması ve temiz bir enerji sistemi olması gibi nedenlerle Mısır için ideal bir enerji kaynağı olabileceği sonucuna varılmıştır. Mısır'ın gelecekte yaşayacağı muhtemel enerji noksanlığı solar-hidrojen enerji sistemi ile giderilebilir. Bu yolla hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak Avrupa'ya ihraç edilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca Mısır için kalıcı ve temiz bir enerji sistemi olup gayri safi milli hasılayı ve yaşam kalitesini arttırabileceği belirtilmiştir.

Gekas v.d. (2002) tarafından yapılan çalışmada ise SD (Stirling Dish) teknolojisine dayalı solar güç sisteminin fizibilitesi sunulmuştur. Sistem için Yunanistan'daki Creton Adası verileri baz alınmıştır. Sonuçlar geleneksel güç sistemleriyle kıyaslanmıştır. Bunun yanında maliyet hesaplamaları yapılırken bazı unsurların değişiminin nasıl sonuçlar doğuracağı öngörülmeye çalışılmıştır. Satın alma fiyatı, indirim oranı, yıllık solar radyasyon, işletme ömrü, sistemin verimi, elektrik fiyatı ve güç santralının büyüklüğü gibi verilerin farklı değerleri için hesaplamalar yapılmıştır. Aşağıdaki şartlar sağlandığında bu sistemin iyi ve ekonomik bir alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır:

- sistem satın alma fiyatı $< 550 \text{ €/kW}$
- indirim oranı $< \%10$
- işletme ömrü > 25 yıl
- solar radyasyon $> 1700 \text{ kWh/m}^2$
- yıllık üretilen elektrik $> 69.711 \text{ MWh}$
- elektrik satış fiyatı $> 0,073 \text{ €/kWh}$

Sonuç olarak sistemin endüstriyel, finansal ve karar mekanizması olan kurumlar tarafından desteklendiği takdirde uzun vadede elektrik pazarında kendine yer bulabileceği belirtilmiştir.

Güneş enerjisi ile ilgili yapılan bir çalışma da Bader v.d. (2005) tarafından yapılmıştır. Çalışmada Suudi Arabistan'daki 41 istasyonun solar radyasyon ve güneşlenme süreleri datalarından yararlanılmıştır. Analizler yenilenebilir enerji üretimi ve 5 MW kapasitedeki fotovoltaik güç santralının elektrik üretimini kapsamaktadır. Solar radyasyon değerleri olarak Tabuk'ta yılda $1,63 \text{ MWh/m}^2$ ile minimum, Bisha'da ise $2,56 \text{ MWh/m}^2$ ile maksimum değerler

elde edilmiştir. Ortalama değer yılda 2,06 MWh/m² olarak hesaplanmıştır. Güneşlenme süreleri 7,4 ile 9,4 saat arasında değişmekte olup ortalama değer 8,89 saat olarak hesaplanmıştır. Geri dönüş, geri ödeme periyodu, nakit para akışı, net bugünkü değer, karlılık ve yenilenebilir enerji üretim fiyatı göstermiştir ki seçilen bölgeler arasında en iyi bölge Bisha iken en kötüsü Tabuk'tur. Sonuç olarak çevresel faktörler açısından bakıldığında bu sistemle sera etkisi yapan gazların ortalama olarak yılda 8.182 tonluk kısmının atmosfere karışmasının engellenebileceği belirlenmiştir.

Apolinario vd. ise yaptıkları çalışmada fotovoltaik, rüzgar ve hidroelektrik kombinasyonu ile hidrojen üretim maliyet hesaplamalarını Brezilya için yapmış ve 10,3 \$/kg birim hidrojen maliyeti elde etmişlerdir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde solar-fotovoltaik sistemlerin günümüz için pahalı bir yöntem olduğu görülmektedir. Ancak çevresel faktörler ve fosil yakıt fiyatlarının artışı göz önünde bulundurulduğunda 20-25 yıllık bir süre içinde rekabetçi bir yöntem olacağı kanısı hakimdir.

4 FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Solar fotovoltaik sistemlerin önemi daha önceki bölümlerde vurgulanmıştı. Fotovoltaik güç üretiminin faydaları özet olarak şu şekilde sıralanabilir:

- fotovoltaik güç üretimi güvenilirdir
- işletme ve bakım maliyetleri düşüktür
- fotovoltaik sistemin işleyişi sessizdir
- atmosfere zararlı madde karışımı söz konusu değildir
- modülerdir ve kolayca devreye alınabilir
- enerjiye ihtiyaç duyulan bölgede iletim hattı kurulmadan güç üretimi sağlayabilir.

Günümüzde değişik şekillerdeki uygulamalarla fotovoltaik güç üretimi sağlanmaktadır. Diğer elektrik sağlayıcı sistemlerin uygulanması güç olan bölgelerde, yani kırsal alanlarda birçok sosyal imkan sağlamaktadır.

Solar elektriğin günümüzdeki en büyük dezavantajı fotovoltaik sistem kurulumunun yüksek kapital maliyetleridir. Bununla birlikte, üretim miktarları arttıkça ve araştırmalarla yeni gelişmeler sağlandıkça fotovoltaiklerin kullanım oranları hızlı bir şekilde artacaktır.

4.1 Fotovoltaik Sistemin Yapısı ve Bileşenleri

Solar piller fotovoltaik sistemin tek bileşenleri değildir. Diğer birçok parçalar da elektrik üretiminin sağlanması için gereklidir. Bazı fotovoltaik sistemler geceleri ve soğuk havalarda enerji sağlayabilmek açısından enerji depolama sistemi içerir.

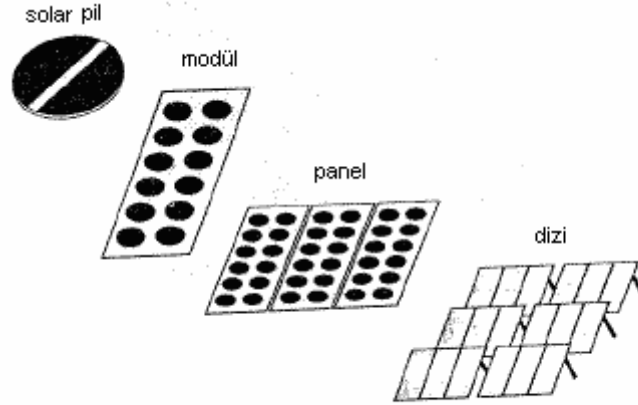
Solar piller direkt akım üretir. Diğer güç üretim ve kontrol elemanları sistemin değişik parçalarının ara birimlerini oluşturmakta ve solar enerjinin değişik şekillere dönüştürülmesini sağlamaktadırlar. Fotovoltaik sistemin sağlıklı işleyişi için tüm bu bileşenler gereği gibi birleştirilmiş, yerleştirilmiş ve tanımlanmış olmalıdırlar.

Fotovoltaik sistem genel olarak bazı alt sistemlerden oluşur. Bu alt sistemler şöyle sıralanabilir:

- 1-) fotovoltaik jeneratör
- 2-) piller (depolama sistemi)
- 3-) güç sağlama ve kontrol ekipmanı (ölçüm ve dataların izlenmesini de içerir)
- 4-) yedekleme jeneratörü

Bu bileşenlerden hangilerinin ne şekilde sisteme entegre edileceği bazı koşullara bağlıdır. Sistemler iki ana kategoriye ayrılabilir. Bunlar şebekeye bağlı (grid connected) ve bağımsız (stand-alone) olarak adlandırılırlar. Stand-alone sistemlerin en basit şekli sadece uygun zamanlarda aydınlatmayı sağlayan fotovoltaik jeneratördür. Ayrıca bu tip pompalama uygulamalarında da yaygındır. Diğer tiplerde, sistem genellikle enerji depolama için piller içerir. Çıkışta alternatif akım gereken durumlar için de sistemler mevcuttur. Bazı durumlarda ise sistem yedekleme jeneratörü içerir.

Sistemin kalbi fotovoltaik jeneratördür. Alternatif akım (AC) güç üretimi sağlayacak şekilde bağlanmış fotovoltaik modüllerden oluşur.



Şekil 4.1 Fotovoltaik hiyerarşi (Bubenzer ve Luther, 2002)

Fotovoltaik modüllerden pratikte en çok kullanılan tipleri kristal veya yarı kristal silikon pillerdir.

Modüllerdeki piller genellikle seri bağlanırlar. Dört inç çapındaki standart kristal silikon güneş pili veya 10x10 cm multikristal pil standart koşullarda verime bağlı olarak 1 ile 1,5 watt arası

güç sağlamaktadır. Bu güç genellikle 0,5'ten 0,6'ya kadar olan voltajda sağlanır. Bu voltajda çok az uygulama olduğundan en uygun çözüm pilleri seri bağlamaktır.

4.2 Büyük PV Sistemler

Fotovoltaiklerin işletme kapasiteleri geleneksel güç teknolojileri kadar yüksek değerlere henüz ulaşamamıştır.

Dünyadaki en büyük fotovoltaik yapı Almanya'da Solarpark Gut Erlasee'dir ve 12 MW gücündedir. 2006 yılında yapılmıştır. Yıllık 7700 ton CO₂ emisyonunun havaya karışmasını önlemektedir. (<http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>)

Dünyadaki en büyük üç fotovoltaik yapı Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Dünyadaki en büyük üç fotovoltaik yapı ve başlıca özellikleri
(<http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>)

Adı	Lokasyonu	Gücü	Yapım yılı	Çevresel etkisi
Solarpark Gut Erlasee	Almanya, Erlasee	12 MW	2006	Yıllık 7.700 ton daha az CO ₂ emisyonu
Serpa PV Power plant	Portekiz, Serpa	11 MW	2007, Mart	Yıllık 30.000 ton daha az CO ₂ emisyonu
Solarpark Pocking	Almanya, Pocking	10 MW	2006, Nisan	Yıllık 10.000 ton daha az CO ₂ emisyonu



Şekil 4.2 Almanya'da Bürstadt ve Muggenstrum'daki fotovoltaik yapılar
(<http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>)

Şu anda yapım aşamasında olan dört adet fotovoltaik güç istasyonu ise Erlasee'dekinden daha büyük olacaktır. Bunlar İspanya/Beneixama (20MW), Almanya/Muldentalkreis (40MW), Portekiz/Moura (52MW) ve Avustralya/Mildura-Swan Hill'deki fotovoltaik güç santralleridir.. Avustralya'daki santral tamamlandığında 154 MW kurulu güce sahip olacaktır.

(http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics#PV_power_stations)

Türkiye'deki en büyük fotovoltaik tesis ise Muğla Üniversitesi yerleşkesinde olup toplam 54 kW kurulu güce sahiptir (Eke vd.).

Fotovoltaik tesislerin büyük güçlerde az olmasının nedeni fiyatın yanında saha koşullarının zorluğudur. Elektrik üretmek için büyük fotovoltaik projeleri uygulamaya alınmıştır. Ancak bunların büyük kısmı bu yeni teknolojinin teknik ve ekonomik potansiyelini belirlemek için yapılan fizibilite çalışmalarıdır.

Büyük fotovoltaik projelerinin uygulama alanları şu şekilde sıralanabilir:

- şebekeye bağlı güç üretimi
- köyler veya çeşitli topluluklar için şebekeden bağımsız elektrik üretimi
- hem şebekeye bağlı hem de bağımsız olarak elektrik üretebilen sistemler
- suyun arındırılmasında (şebekeden bağımsız)
- su pompalanması (şebekeden bağımsız)
- soğuk gıda depolanmasında (şebekeden bağımsız) (Markvaart, 1994)

Bu uygulamalardan anlaşılmıştır ki büyük fotovoltaik projelerde küçük olanların aksine şebekeye bağlı olanların birim fiyatları şebekeye bağlı olmayan sistemlere göre daha düşük olmaktadır. Bunun sebebi şebekeye bağlı sistemlerde üretilen fotovoltaik enerjinin tamamının kullanılabilmesi ve bu vesileyle üretilen elektriğin maliyetinin düşmesidir. Şebekeye bağlı olmayan; diğer bir deyişle stand alone sistemler ise enerjinin ulaştırılması güç olan bölgelerde ihtiyaç duyulan gücü sağlamak amacıyla kurulmaktadır.

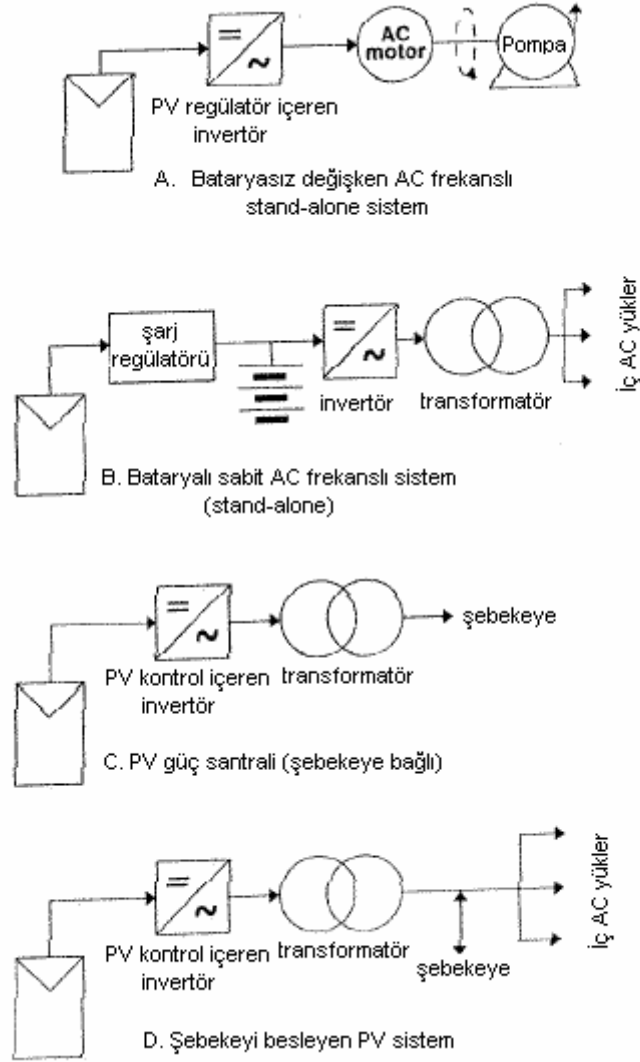
Günümüzde büyük fotovoltaik projelerinin geleneksel güç kaynaklarıyla rekabet etmesini zorlaştıran iki ana etken vardır. Bunlardan birincisi ilk yatırım maliyetlerinin geleneksel sistemlere göre fazla olmasıdır. İkincisi ise ihtiyaç duyulan alanın geleneksel sistemlere göre daha fazla olmasıdır.

4.2.1 Büyük PV Sistemlerin Teknik Özellikleri

Büyük fotovoltaik sistemlerin genel karakteristikleri şu şekildedir:

- Yüksek voltaj DC sistemi

- Büyük ölçekli fotovoltaik santralleri genel olarak santralden çıkan DC gücünü standart AC güce çeviren bir veya daha fazla invertör içerir.



Şekil 4.3 Değişik tip büyük PV sistemleri çalışma prensipleri

4.3 Fotovoltaik Paneller

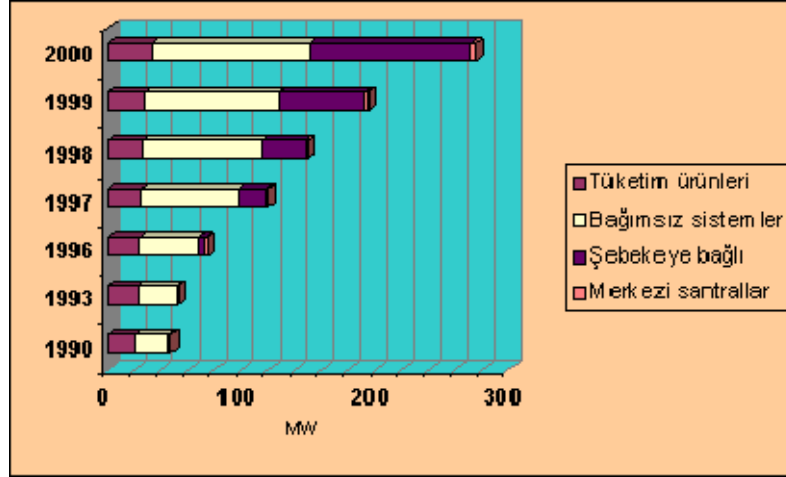
Güneş panelleri, güneşten aldıkları enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler. Bu olay “fotovoltaik etki” olarak tanımlanabilir. Fotovoltaik sistemlerin en önemli bölümünü fotovoltaik paneller oluştururlar. Fotovoltaik sistemlerin gücü ve verimi panellerin verimi ile direkt ilgilidirler. Bunun yanında düşük güç ihtiyacı olan uygulamalar olan şebekeden uzak güvenlik sistemleri, kamera ve dedektör cihazları, çevre ve sokak aydınlatmaları, telsiz ve aktarıcı istasyonları, baz istasyonu ve verici sistemleri gibi uygulamalarda tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 4.2’de çeşitli markalardaki panellerin teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 Değişik marka panellerin teknik özellikleri (www.enisolar.com)

Üretici	SHARP SOLAR		ENERGY SOLUTIONS		SOLARWATT	
Ürün Kodu	NE-80E2E	NT-R5E3E	ESL-90W	ESL-120W	SW60	SW120
Hücre Tipi / Adedi	Polikristal / 36	Monokristal / 72	Monokristal / 36	Polikristal / 36	Polikristal / 36	N/A
Güç	80 Wp	175 Wp	90 Wp	120 Wp	60 Wp	N/A
Maksimum Voltaj	17.1 V	35.4 V	17.3 V	16.9 V	18.0 V	N/A
Amperaj	4.67 A	4.95 A	5.2 A	7.1 A	3.31 A	N/A
Açık Devre Voltajı	21.3 V	44.4 V	21.7 V	21.7 V	22.1 V	N/A
Kısa Devre Akımı	5.31 A	5.55 A	5.6 A	7.9 A	3.63 A	N/A
Uzunluk	1200 mm	1575 mm	1200 mm	1490 mm	760 mm	N/A
Boy	530 mm	826 mm	530 mm	670 mm	650 mm	N/A
Derinlik	35 mm	46 mm	41 mm	41 mm	35 mm	N/A
Alan	0.63 m ²	1.30 m ²	0.63 m ²	0.99 m ²	0.49 m ²	N/A
Ağırlık	8.5 kg	17.0 kg	10.4 kg	13 kg	6 kg	N/A
Modül Verimi	%12.6	%13.5	%14.5	13%	%14	N/A

Üretici	KYOCERA					
Ürün Kodu	KS-10	KC-40T1	KC-50T1	KC-85T1	KC-125GHT	KC-170GHT
Hücre Tipi / Adedi	Polikristal / 36	Polikristal / 36	Monokristal / 36	Polikristal / 36	Polikristal / 36	Polikristal / 48
Güç	10 Wp	43 Wp	54 Wp	87 Wp	125 Wp	170 Wp
Maksimum Voltaj	16.9 V	17.4 V	17.4 V	17.4 V	17.4 V	23.4 V
Amperaj	0.60 A	2.48 A	3.11 A	5.02 A	7.20 A	7.27A
Açık Devre Voltajı	21.5 V	21.7 V	21.7 V	21.7 V	21.7 V	29.0 V
Kısa Devre Akımı	0.62 A	2.65 A	3.31 A	5.34 A	8.0 A	8.03 A
Uzunluk	304 mm	526 mm	639 mm	1007 mm	1425 mm	1290 mm
Boy	352 mm	652 mm	652 mm	652 mm	652 mm	990 mm
Derinlik	22 mm	36 mm	36 mm	36 mm	36 mm	36 mm
Alan	0.10 m ²	0.33 m ²	0.40 m ²	0.65 m ²	0.99 m ²	1.11 m ²
Ağırlık	1.9 kg	4.5 kg	5.0 kg	8.3 kg	12.2 kg	16.0 kg
Verimi	%16	%16	%16	%16	% 16	%16

Üretici	UNISOLAR					CONERGY		
Ürün Kodu	US-5	US-11	US-32	US-64	US-124	C 123P	C 165P	C-175M
Hücre Tipi / Adedi	Amorf Silikon	Amorf Silikon	Amorf Silikon	Amorf Silikon	Amorf Silikon	Polikristal / 36	Polikristal / 72	Monokristal / 72
Güç	5 Wp	11 Wp	32 Wp	64 Wp	125 Wp	123 Wp	155 Wp	175 Wp
Maksimum Voltaj	16.5 V	16.5 V	16.5 V	16.5 V	16.5 V	21.3 V	34.4 V	35.4 V
Amperaj	0.30 A	0.62 A	1.94 A	3.90 A	7.20 A	7.16 A	4.80 A	4.95 A
Açık Devre Voltajı	23.8 V	23.8 V	23.8 V	23.8 V	21.7 V	21.3 V	43.2 V	44.4 V
Kısa Devre Akımı	0.37 A	0.78 A	2.40 A	4.80 A	8.0 A	8.12 A	5.10 A	5.55 A
Uzunluk	491 mm	491 mm	1366 mm	1366 mm	1425 mm	1499 mm	1237 mm	1575 mm
Boy	222 mm	383mm	383 mm	741 mm	652 mm	662 mm	1082 mm	826 mm
Derinlik	22 mm	22 mm	31.8 mm	31.8 mm	36 mm	46 mm	46 mm	46 mm
Alan	0.10 m ²	0.16 m ²	0.40 m ²	0.65 m ²	0.99 m ²	0.92 m ²	1.32 m ²	1.30 m ²
Ağırlık	1.13 kg	1.63 kg	5.0 kg	8.3 kg	12.2 kg	14 kg	18 kg	17.0 kg
Verimi	-	-	-	-	-	%14	%14	%16



Şekil 4.4 Dünyada kurulu güneş panellerinin kullanım alanlarına göre dağılımı (EİE)

Şekilden de görülebileceği gibi güneş paneli uygulamaları hızla artmaktadır. Şebekeye bağlı ve bağımsız çalışan sistemlerdeki artış özellikle dikkat çekmektedir. Aşağıdaki şekillerde ise çeşitli güneş paneli uygulamaları görülmektedir.



Şekil 4.5 Çatısı güneş paneli kaplanmış ev (EİE)



Şekil 4.6 Güneş panelleri ile sokak aydınlatması (EİE)



Şekil 4.7 Şebekeye elektrik veren fotovoltaik sistem (EİE)

4.3.1 Fotovoltaik Panel-Güneş Işını Arasındaki Açılar

Yeryüzünün her hangi bir noktasındaki sabit veya hareketli bir panel ile bu panele gelen güneş ışınımı arasındaki konum ilişkisi çeşitli açılar ile tanımlanmıştır. Bu açılardan bazıları şunlardır:

Enlem Açısı: Konumlandırılan bölgenin Ekvator'un kuzeyinde veya güneyinde olmasına göre farklılık gösterir. Kuzey için pozitif alınır. $-90^{\circ} \leq \phi \leq 90^{\circ}$

Sapma Açısı: Güneşin Ekvator düzlemine göre açısal pozisyonunu verir. Kuzeyde pozitif alınır. $-23,45^{\circ} \leq \delta \leq 23,45^{\circ}$

Eğim Açısı: Panelin yüzey düzlemi ile yatay düzlem arasındaki açıdır. $0 \leq \beta \leq 180^{\circ}$

Yüzey Azimut Açısı: Dikmenin yatay yüzeydeki izdüşümünün lokal meridyene göre sapma açısıdır. Güneyde sıfır, doğuda negatif, batıda ise pozitifdir. $-180^{\circ} \leq \gamma \leq 180^{\circ}$

Saatlik Açı (ω): Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesiyle doğu veya batıya doğru saatte 15° açı farkı olarak meydana gelen açı burulmasıdır. Sabah saatlerinde negatif, öğleden sonra ise pozitifdir.

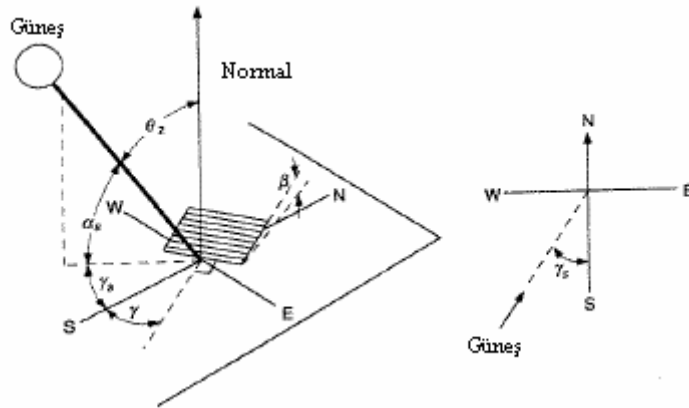
Gelme Açısı (θ): Yüzeğe gelen ışın ile yüzeyin dikmesi (normal) arasında kalan açıdır.

Zenit Açısı (θ_z): Güneş çizgisi ile dikme arasında kalan açıdır.

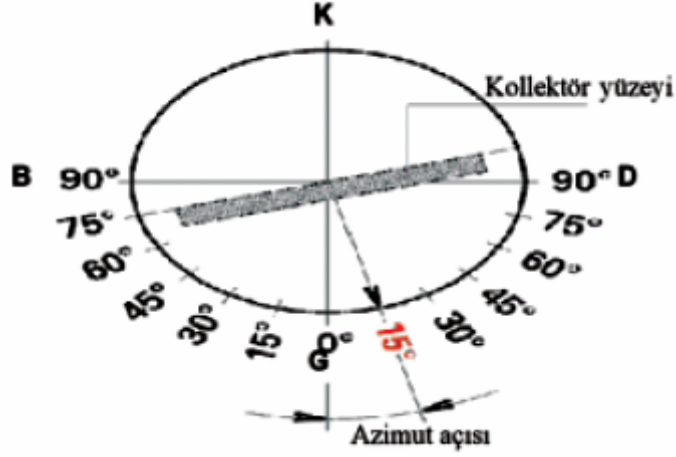
Solar Yükseklik Açısı (α_s): Yatay düzlem ile güneş çizgisi arasında kalan açı. Zenit açısının tamamlayıcısıdır.

Solar Azimut Açısı (γ_s): Güneş ışınının yatay yüzeye olan izdüşümünün güneyden yaptığı burulmadır.

Yukarıda tanımlamaları yapılan açılar şekil 4.8'de gösterilmiştir. Ayrıca şekil 4.9'da azimut açısı gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Panel ile güneş ışını arasındaki açılar



Şekil 4.9 Azimut açısı (Viesmann Isı Teknikleri A.Ş.)

4.3.2 Fotovoltaik Sistemlerin Çevresel Etkisi

Günümüzde dünyayı tehdit eden en önemli konu küresel ısınmadır. Sanayi devriminden beri, özellikle fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma ve sanayi süreçleri gibi çeşitli insan etkinlikleri ile atmosfere salınan sera gazlarının atmosferdeki birikimlerindeki, hızlı artışa bağlı olarak, şehirleşmenin de katkısıyla doğal sera etkisinin kuvvetlenmesi sonucunda, yeryüzündeki ve atmosferin alt bölümlerindeki sıcaklık artışına küresel ısınma adı verilmektedir. Küresel ısınmaya neden olan başlıca gazlar sera gazlarıdır. Bu gazların çevresel zararı en fazla olanı ise CO₂'dir.

Çevresel organizasyonların en büyük ortak amacı atmosferdeki sera gazı emisyonlarının azaltılarak küresel ısınmanın önüne geçebilmektir. Çünkü bu gazların salınımının çevresel olarak çok büyük zararları ve maliyetleri vardır. Karbondiosksit gazının iklim değişikliğine neden olarak verdiği net ekonomik zarar karbonun sosyal maliyeti (SCC-the social cost of carbon) olarak tanımlanmıştır. Değişik tahminlere göre bir ton CO₂ gazının SCC maliyeti 3\$ ile 95\$ arasında değişmektedir. 2005 yılı için ortalama değer ise 12 \$/ton olarak gerçekleşmiştir. Bu maliyeti göz önünde bulundurduğumuzda Portekiz'deki Serpa güç istasyonunun yıllık çevresel katkısı 360.000 \$ olmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilecek olan enerjinin ne kadar CO₂ emisyonunu engelleyeceği belirlenebilir. Bunun için öncelikle bilinmesi gereken fosil yakıtlar kullanılarak enerji üretiminde ortaya çıkacak CO₂ miktarıdır. Çizelge 4.3'te 1 kWh elektrik üretimi için ortaya çıkacak emisyon miktarları görülmektedir.

Çizelge 4.3 1 kWh elektrik üretimi için salınan CO₂ miktarı

Yakıt	Salınan CO ₂ /kWh (kg)
Kömür	0,958
Doğal Gaz	0,463
Petrol	0,702

Hesaplamalar yapılarak solar-fotovoltaik sistemle üretilecek elektrik enerjisi miktarı bulunarak ne kadar CO₂ emisyonunun havaya karışmasının engellenebileceği bulunabilir.

Fotovoltaik sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin handikap gibi görülmesiyle beraber CO₂ gazı salınımının azaltılması vesilesiyle engelleyeceği çevresel zararlar ve maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

5 EKONOMİK ANALİZ

Bu bölümde güneş enerjisi yoluyla elde edilen hidrojenin maliyet hesapları çıkarılacaktır. Çevresel faktörler, enerji kaynağının sınırsız olması gibi çok büyük artıları bulunan bu enerji kaynağının kullanımının yaygınlaşması için üzerinde durulması gereken en önemli konu hidrojenin üretim maliyetidir.

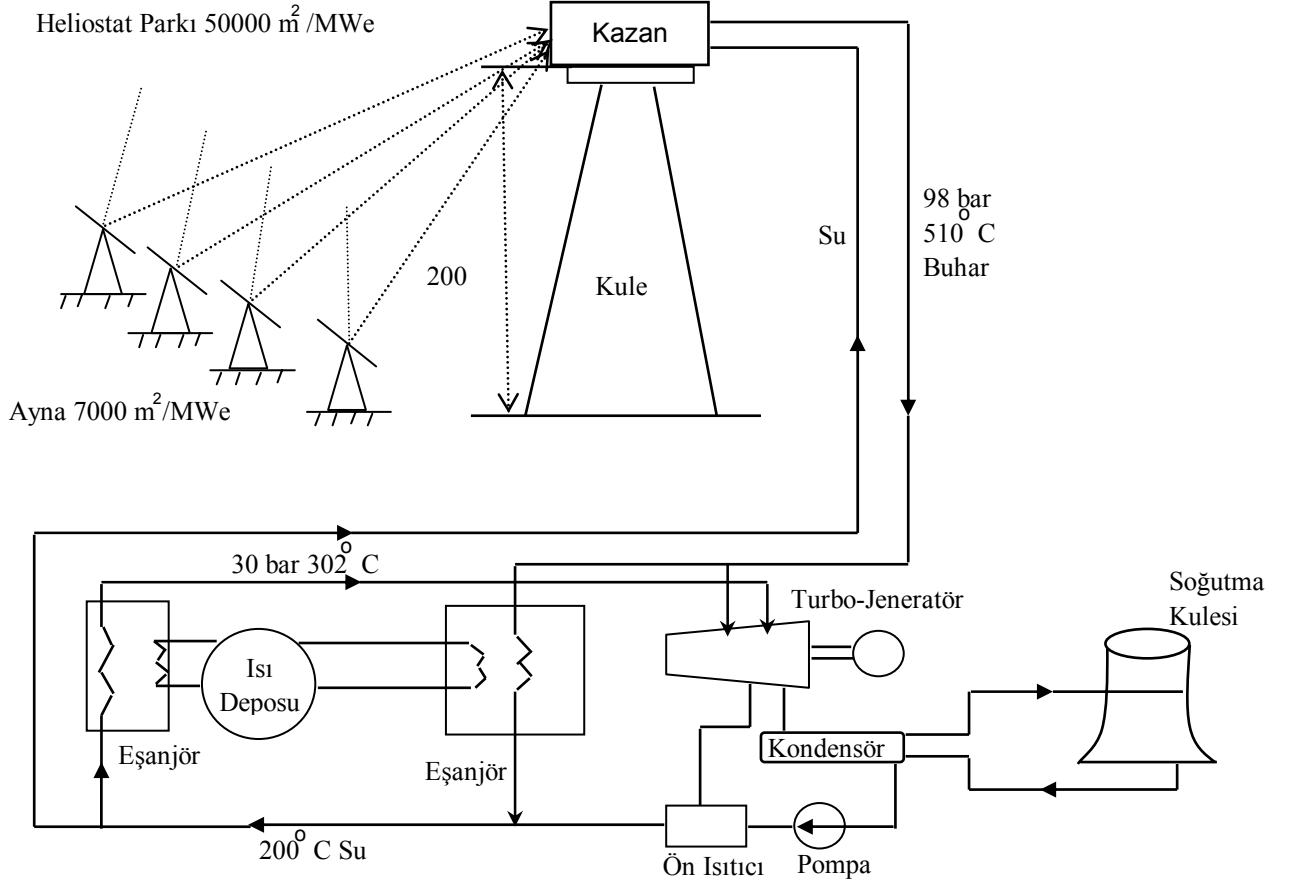
Hidrojen maliyeti çıkarılırken hesaplamalar iki adımda yapılacaktır. Öncelikle güneş enerjisinden elde edilen elektriğin maliyeti çıkarılacak, ardından bu elektriğin elektrolizde kullanımıyla elde edilen hidrojenin üretim maliyeti çıkarılacaktır. Yani hidrojenin maliyeti güneş enerjisinden elde edilen elektriğin ve elektroliz işleminin maliyetleri toplamına eşit olacaktır.

5.1 Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi

Güneş enerjisiyle elektrik üretiminde öncelikle kule tipi güneş enerji santrali ve fotovoltaik sistemin hesaplamaları yapılarak mukayese edilecektir. Hangi yöntem ile daha uygun maliyetle elektrik elde ediliyorsa o maliyetteki elektrik kullanılarak elektroliz vasıtasıyla elde edilen hidrojenin toplam maliyet hesaplaması yapılacak ve değerlendirilecektir. Hesaplamalar yapılırken Türkiye'deki yedi bölge için değerler bulunacaktır.

5.1.1 Kule Tipi Güneş Gücü Santraliyle Elektrik Üretimi

Bu sistemler termodinamik dönüşümle elektrik üretimi esasına dayanmaktadır. Heliostat adı verilen iki eksen etrafında hareketli parabolik aynalar güneş ışınlarını yaklaşık 200m. yüksekliğindeki bir kule üzerinde bulunan bir kazana yönelterek buhar üretir. Kule tipi termodinamik dönüşüm jeneratörü adı verilen bu sistemde elde edilen buhar, Rankine çevrimiyle kullanılarak, klasik bir turbo-jeneratör sistemi çalıştırılır (Aybers ve Şahin,1995). Şekil 5.1'de 10 ile 200 MW güç aralığında kullanılabilen termodinamik dönüşümlü ve kule tipinde güneş santralinin çalışma şeması görülmektedir.



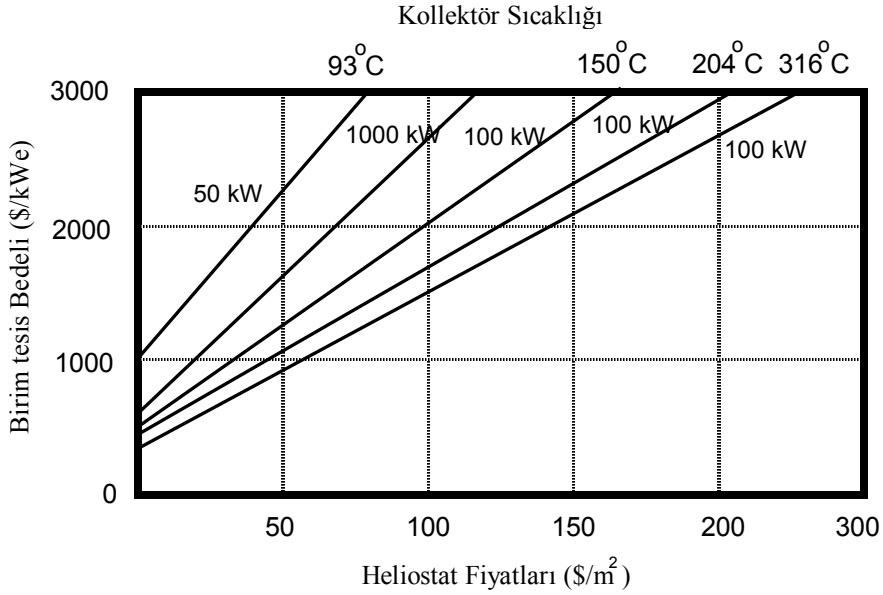
Şekil 5.1 Termodinamik dönüşümlü, kule tipi güneş güç santrali (10-200 MW)
(Aybers ve Şahin,1995)

Kule tipi güneş santralinde, kazanda üretilen 98 bar, 510°C şartlarındaki buhar, türbinin yüksek basınç kademesine gelerek enerji üretir. İş gören çürük buhar kondenserde yoğunlaştırılır, ön ısıtıcıda ısıtılarak 200°C sıcaklıkta kazana geri gönderilir. Az güneşli zamanlarda istenilen gücü sağlamak amacıyla heliostat ve kazan grubunun enerji toplama gücü biraz fazla tutulur. Güneşli günlerde elde edilen fazla ısı enerjisi bir eşanjör yardımıyla depo edilir ve bu enerjiyle ikinci bir eşanjörde 30 bar, 302°C şartlarında buhar üretilerek türbinin orta basınç kademesine gönderilir. Bu sistemin sakıncası çok büyük alan işgal etmesidir. 7000 m²/MW ayna yüzeyine ve 50000 m²/MW heliostat park alanına ihtiyaç duyar.

Bu sistem üzerindeki çalışmalar ABD’nde 1970 yılında NSF (National Science Foundation) tarafından başlatılmıştır. Daha sonra 1970 senesinde ERDA (Energy Research and Development)

ve DOE (Department of Energy) gibi kuruluşlar da bu çalışmalara katılmışlardır. İlk önemli uygulama ise 1980'li yıllarda Fransa'da çalıştırılan 3,5 MW gücündeki deneysel tesistir.

Santralin birim tesis bedeli, heliostat ve arazinin fiyatına çok duyarlıdır. Heliostat fiyatlarıyla birim tesis bedelinin değişimi Şekil 5.2'de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, kolektör sıcaklığı 204°C olan 100 kW gücündeki bir tesiste heliostat fiyatı 100 \$/m² iken birim tesis bedeli (direkt masraflar) 1750 \$/kW, heliostat fiyatı 200 \$/m² fiyatına çıktığı zaman birim tesis bedeli 3000 \$/kW olmaktadır. Dolayısıyla birim tesis bedelinin heliostat fiyatlarına çok duyarlı olduğunu söyleyebiliriz.

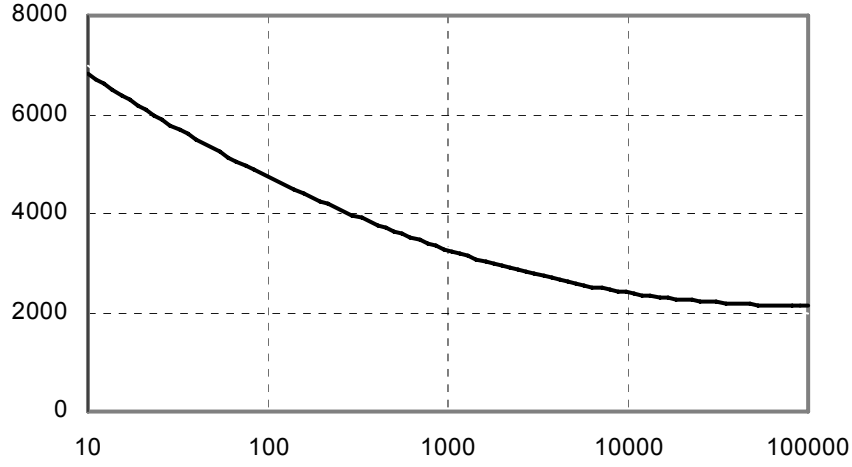


Şekil 5.2 Birim tesis bedelinin heliostat fiyatları ile değişimi (Aybers ve Şahin,1995)

Gücü MW seviyesine ulaşan bir santralde, heliostat fiyatı 100 ile 150 \$/m² olduğu zaman, birim tesis bedeli 3000 ile 3500 \$/kW arasında değişeceği tahmin edilmektedir(Aybers ve Şahin,1995).

Diğer enerji santrallerinde olduğu gibi, güneş santrallerinde de birim tesis bedeli kurulu güç arttıkça düşüş gösterir. Şekil 5.3'te birim tesis bedelinin kurulu güç ile değişimi görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi 100 kW gücündeki kule tipi bir güneş santralinin birim tesis bedeli

5000 \$/kW iken, 1000 kW gücündeki bir santralin birim tesis bedeli ise yaklaşık olarak 3500 \$/kW kadardır.



Şekil 5.3 Birim tesis bedelinin kurulu güç ile değişimi

5.1.1.1 Kule Tipi Güneş Gücü Santraliyle Elektrik Üretimi Maliyet Hesabı

Hesaplamalar yapılırken bazı kabuller yapılacaktır. Bu kabuller Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Kule tipi güneş santrali maliyet hesabı için kabul edilen değerler

Tesis Gücü	N_e	5 MW
Santral Emniyet Payı	E_p	%15
Kollektör Işınım Şiddeti	I_k	0,93
Santral Verimi	η_s	%25
Faiz Oranı	i	%5
Amortisman Süresi	n	10 yıl
Tesis Ömrü		25 yıl

Hesaplamalar yapılırken ilk olarak ilk yatırım ve bakım maliyetleri bulunacaktır. Bunun için öncelikle heliostat yüzeyi (H_y) bulunmalıdır:

$$H_y = \frac{N_e \times (1 + E_p)}{I_k \times \eta_s} \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’de değerler yerine konulduğunda H_y değeri elde edilir.

$$H_y = \frac{5000 \times (1 + 0,15)}{0,93 \times 0,25} = 24.730 \text{ m}^2$$

Heliostat alanının belirlenmesinden sonra arsa maliyetinin belirlenmesi gerekmektedir. Toplam arsa bedeli 5.2 denkleminden elde edilir.

5.2 denkleminde A_b arsa bedelini ifade etmektedir. Hesaplamalar yedi farklı b6lge için yapılacağından yedi b6lgedeki ortalama g6ncel arsa fiyatları baz alınacaktır. Heliostat alanı ve arsa bedeli sırayla 10 ve 1,5 ile çarpılmıştır. 1 m² heliostat alanı için 10 m² arsa ihtiyacı olduğu için 10 ile çarpım yapılmaktadır. Ayrıca diğer tesisler için de %50 ilave toplam alana ihtiyaç vardır. Bunun için de 1,5 ile çarpım yapılmaktadır. T6rkiye’nin yedi farklı b6lgesi için hesaplamalarda kullanılacak arsa fiyatları izelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 T6rkiye’deki yedi b6lge için hesaplamalarda kullanılacak arsa fiyatları (\$/m²)
(eşitli emlak sitelerinin ortalama fiyatları baz alınmıştır)

B6lge	Arsa Fiyatı (\$/m ²)
Marmara B6lgesi	15
Ege B6lgesi	14
Akdeniz B6lgesi	14
İç anadolu B6lgesi	13
Karadeniz B6lgesi	13
Doğu anadolu B6lgesi	12
G6neydoğu anadolu B6lgesi	12

Bu değerler kullanılarak her b6lge için bulunan toplam arsa bedeli değerleri (TA_b) izelge 5.3’te verilmiştir. Marmara B6lgesi için yapılan hesaplama g6sterilecektir.

$$TA_b = H_y \times A_b \times 10 \times 1,5 \quad (5.2)$$

$$TA_b = 24.730 \times 15 \times 10 \times 1,5 = 5.564.250 \$$$

Çizelge 5.3 Bölgeler için bulunan toplam arsa bedel değerleri (\$)

Bölge	Toplam Arsa Bedeli (TA _b) (\$)
Marmara Bölgesi	5.564.250
Ege Bölgesi	5.193.300
Akdeniz Bölgesi	5.193.300
İç anadolu Bölgesi	4.822.350
Karadeniz Bölgesi	4.822.350
Doğu anadolu Bölgesi	4.451.400
Güneydoğu anadolu Bölgesi	4.451.400

Birim tesis bedeli (C_s) şekil 5.2'den 3000 \$/kW seçilmiştir. Bu durumda toplam tesis bedeli şu şekilde bulunur:

$$T_{tb} = C_s \times N_e \quad (5.3)$$

5.3 denkleminde değerler yerine konulduğunda;

$$T_{tb} = 3000 \times 5000 = 15 \times 10^6 \$$$

olarak bulunur.

Toplam tesis bedeli ve arsa maliyetinin toplamı toplam ilk yatırım maliyetini (YM_t) verecektir. Bu durumda;

$$YM_t = T_{tb} + TA_b \quad (5.4)$$

olacaktır.

5.4 eşitliğine göre hesaplamalar yapıldığında her bölge için bulunan toplam ilk yatırım maliyeti değerleri çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 Her bölge için bulunan toplam yatırım maliyeti değerleri

Bölge	Toplam Yatırım Maliyeti (YM _t) (\$)
Marmara Bölgesi	20.564.250
Ege Bölgesi	20.193.300
Akdeniz Bölgesi	20.193.300
İç anadolu Bölgesi	19.822.350
Karadeniz Bölgesi	19.822.350
Doğu anadolu Bölgesi	19.451.400
Güneydoğu anadolu Bölgesi	19.451.400

Toplam yatırım maliyetinin belirlenmesinin ardından amortisman faktörü hesabına geçilir.

Amortisman faktörü (C_{rf}) şu şekilde bulunur:

$$C_{rf} = i \cdot \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.5)$$

4.5 denkleminde değerler yerine konduğunda;

$$C_{rf} = \frac{0,05 \times (1,05)^{10}}{(1,05)^{10} - 1} = 0,1295$$

olarak bulunur.

Yatırım maliyeti (YM), toplam ilk yatırım maliyeti (YM_t) ile amortisman faktörünün çarpımına işletme ve bakım maliyeti (M_i) eklenerek bulunur:

$$YM = C_{rf} \times YM_t + M_i \quad (5.6)$$

Denklem 5.6'da değerler yerine konduğunda

$$YM = 0,1295 \times 20.564.250 + 40 \times 5.000 = 2.863.070 \$$$

olarak bulunur (Bu işlemde birim işletme ve bakım maliyeti 40 \$/kW alınmıştır).

Yukarıda yapılan işlemde bulunan değer Marmara Bölgesi için yapılan hesaplamadır. Çizelge 5.5'te tüm bölgeler için bulunan yatırım maliyeti değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.5 Tüm bölgeler için bulunan yatırım maliyeti değerleri

Bölge	Yatırım Maliyeti (YM) (\$)
Marmara Bölgesi	2.863.070
Ege Bölgesi	2.815.032
Akdeniz Bölgesi	2.815.032
İç Anadolu Bölgesi	2.766.994
Karadeniz Bölgesi	2.766.994
Doğu Anadolu Bölgesi	2.718.956
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	2.718.956

Bu hesaplamanın ardından bölgelerimizin güneş ışınım şiddetleri göz önünde bulundurularak heliostatlar ile toplanacak yıllık enerjinin hesaplanmasına geçilir. Heliostatların tamamı ile toplanacak toplam yıllık enerji (I_h) şu şekilde bulunur:

$$I_h = H_y \times I_{hl} \quad (5.7)$$

Bu denklemdeki I_{hl} bir heliostat alanı ile toplanacak yıllık enerji miktarını ($\text{kWh/m}^2\text{yıl}$) vermektedir. Her bölge için yıllık ortalama toplam güneş enerjisi süreleri çizelge 2.4'te verilmişti. Buna göre bu değer sırasıyla Güneydoğu Anadolu Bölgesi için 1460, Akdeniz Bölgesi için 1390, Doğu Anadolu Bölgesi için 1365, İç Anadolu bölgesi için 1314, Ege Bölgesi için 1304, Marmara bölgesi için 1168, Karadeniz bölgesi için 1120 olarak alınacaktır.

Bir heliostat alanı ile toplanacak yıllık enerjinin hesaplanmasının ardından santral verimi hesaba katılarak üretilecek yıllık enerji miktarı şu formülle bulunur:

$$E = I_h \times \eta_s \quad (5.8)$$

Ardından birim enerji maliyetine (g) geçilir. Birim enerji maliyeti yatırım maliyetinin üretilecek yıllık enerjiye oranıdır:

$$g = \frac{YM}{E} \quad (5.9)$$

5.7, 5.8 ve 5.9 denklemleri kullanılarak Marmara Bölgesi için birim enerji maliyeti hesabı yapılacak ve diğer bölgeler için bulunan değerler çizelge 5.6'da verilecektir. Ayrıca şekil 5.4'te birim maliyetler en ucuz bölgeden en pahalısına doğru sıralı olarak gösterilecektir.

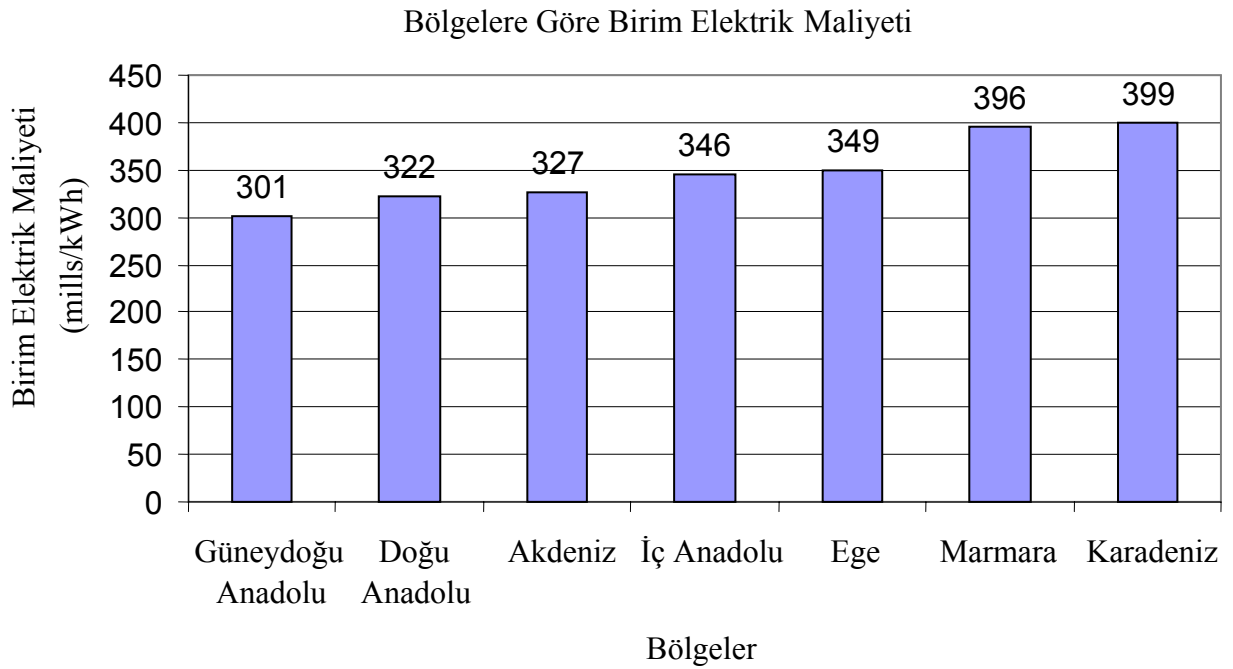
$$I_h = 24.730 \times 1.168 = 28.884.640 \text{ kWh/yıl}$$

$$E = 28.884.640 \times 0,25 = 7.221.160 \text{ kWh/yıl}$$

$$g = \frac{2.863.070}{7.221.160} = 396 \text{ mills/kWh}$$

Çizelge 5.6 Tüm bölgeler için bulunan birim enerji maliyetleri

Bölge	Birim Enerji Maliyeti (g _k) (mills/kWh)
Marmara Bölgesi	396
Ege Bölgesi	349
Akdeniz Bölgesi	327
İç Anadolu Bölgesi	346
Karadeniz Bölgesi	399
Doğu Anadolu Bölgesi	322
Güneydoğu anadolu Bölgesi	301



Şekil 5.4 Bölgelere göre birim elektrik maliyet grafiği

Çizelge 5.6’da verilen değerler bölgeler için yıllık ortalama güneş enerjisi verilerinden yapılan hesaplama ile elde edilmiş olan verilerdir. Bu sistemlerde maliyet direkt olarak güneş enerjisi ile doğru orantılıdır. Çizelge 2.4’te verilen değerlerden her bölge için en çok ve en az güneş enerjisi verileri ile maksimum ve minimum maliyet değerleri elde edilebilir. Çizelge 5.7’de ve 5.8’de sırasıyla bölgelere göre en çok ve en az güneş enerjisinin yeryüzüne ulaştığı aylara göre yapılan hesaplamayla elde edilen değerler sunulmuştur. Şekil 5.5 ve 5.6’da ise bu verilerle oluşturulan grafikler verilmektedir.

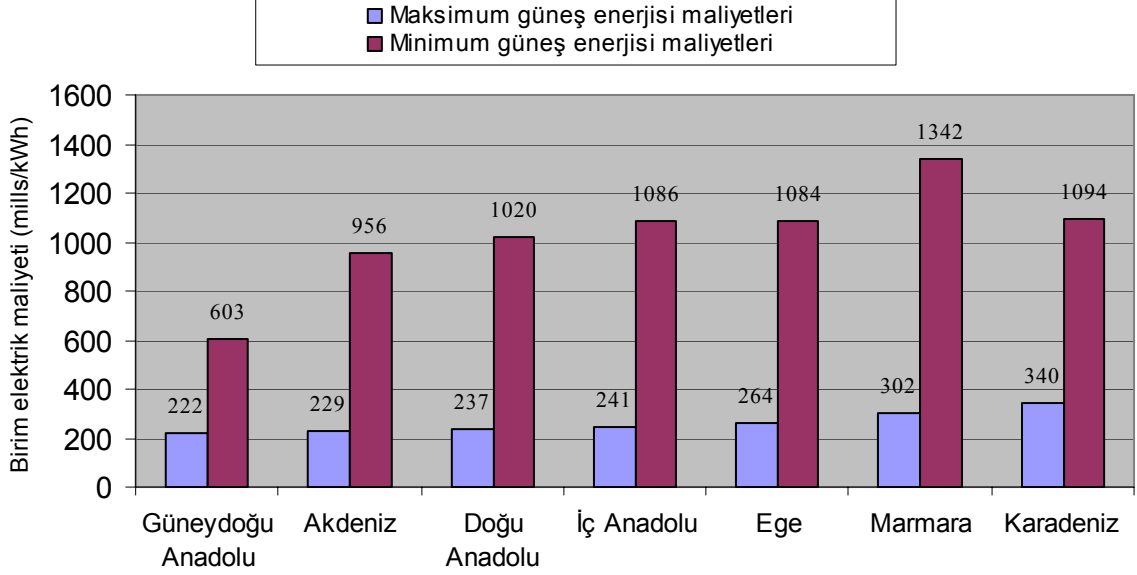
Çizelge 5.7 Tüm bölgeler için birim enerji maliyetleri (maksimum güneş enerjisi için)

Bölge	Birim Enerji Maliyeti (g _k) (mills/kWh)
Güneydoğu anadolu Bölgesi	222
Akdeniz Bölgesi	229
Doğu Anadolu Bölgesi	237
İç anadolu Bölgesi	241
Ege Bölgesi	264
Marmara Bölgesi	302
Karadeniz Bölgesi	340

Çizelge 5.8 Tüm bölgeler için birim enerji maliyetleri (minimum güneş enerjisi için)

Bölge	Birim Enerji Maliyeti (g _k) (mills/kWh)
Güneydoğu anadolu Bölgesi	603
Doğu Anadolu Bölgesi	956
Akdeniz Bölgesi	1020
Ege Bölgesi	1084
İç Anadolu Bölgesi	1086
Karadeniz Bölgesi	1094
Marmara Bölgesi	1342

Çizelge ve şekillerden de görülebileceği gibi maksimum güneş enerjisi verileri göz önünde tutulduğunda birim elektrik maliyeti 222 mills/kWh değerine kadar düşebilmektedir.



Şekil 5.5 Bölgelere göre birim elektrik maliyet grafiği

5.1.2 Kule Tipi Güneş Gücü Santraliyle Elektrik Üretimi İçin Verim Arttırıcı Yöntemler

Kule tipi güneş gücü santrali için hesaplamalar yapılarak yedi bölge için sonuçlar elde edilmiştir. Bu bölümde bu yöntemle elektrik üretiminde verimi ve üretimi arttırıcı yöntemler irdelenecek ve maliyet kıyaslaması yapılacaktır.

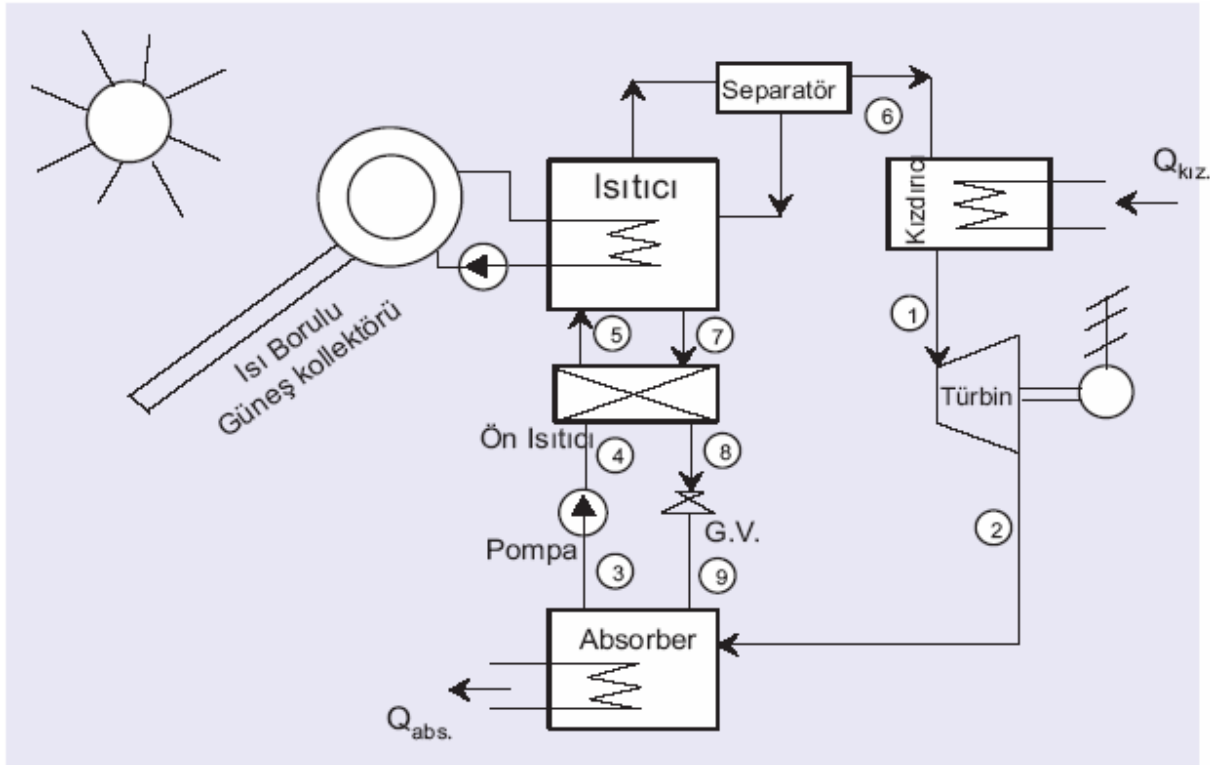
5.1.2.1 Absorbsiyon Soğutmalı Güç Üretme Çevrimi

Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimlerine alternatif olarak geliştirilen absorpsiyonlu soğutma çevrimi güneş enerjisi, atık ısılar veya doğrudan gaz yakma sistemleri ile çalışabilmelerinden dolayı, pompa için kullandığı elektrik enerjisi dışında, düşük sıcaklıkta ısı kaynağı kullanımını gerektiren bir çevrimdir. Buhar sıkıştırımlı çevrimlerin en büyük dezavantajı olan elektrik harcamasını, absorpsiyonlu çevrimler, sadece sistemde bulunan pompada kullanılan elektrik enerjisi seviyesine kadar düşürebilmektedirler.

Absorpsiyonlu soğutma için çeşitli absorpsiyon çifti alternatifleri mevcuttur. $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ çifti yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı kaynağı olarak güneş enerjisini kullanan absorpsiyon teknolojisi, güneş enerjisinin kaynak olarak kullanıldığı güç üretme sistemlerine (Su buharlı çevrim ve güneş pilleri) alternatif olabilir.

Absorbsiyonlu soğutmanın buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminden temel farkı; düşük sıcaklıktaki ve basınçtaki soğutucu akışkan buharının sıvı fazdaki bir akışkan ile eriyik hale getirilerek, bu eriyiğin bir pompa yardımı ile basıncı yükseltilip bir ayırıştırıcıda ayırıştırılan soğutucu akışkanın yüksek basınçta elde edilmesidir. Absorbsiyonlu soğutma çevrimlerinde elde edilen bu soğutucu akışkan buharı, yoğuşturucuya, genleşme valfine ve oradan da soğutucuya giderek soğutucuda gerekli soğutmayı gerçekleştirmektedir. Bu sistemlerde, ayırıştırıcıdan elde edilen yüksek basınçtaki soğutucu akışkan buharı gerekirse (ilave yakıt kullanılarak) kızgın buhar durumuna getirilip daha sonra bir türbinde basıncı absorber basıncına kadar düşürülerek güç üretimi mümkün olabilmektedir.

Absorbsiyonlu güç üretme çevrimi konusunda ilk çalışma 1983 yılında Kalina tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada bir kombine güç üretme çevriminin baca gazlarının atık ısısından yararlanılarak ve absorbsiyonlu güç üretme çevrimi kullanılarak ilave güç üretimi düşünülmüş ve bu çevrim literatürde Kalina çevrimi adını almıştır (Öztürk).



Şekil 5.6 Güneş enerjisi kaynaklı basit bir absorbsiyon güç üretme çevrimi

Güneş enerjisini kaynak olarak kullanan ve Şekil 5.6'da şematik olarak gösterilen çevrimde absorbsiyon çifti olarak $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ kullanılması uygundur. Absorbere 2 numaralı hatla gelen

düşük basınç ve sıcaklıktaki amonyak buharı, genişleme valfinde basıncı düşürülen, 9 numaralı akış hattındaki düşük konsantrasyondaki eriyik tarafından, absorberde bir miktar ısıyı dışarı atarak absorbe edilir. Bu eriyiğin basıncı pompa yardımı ile ısıtıcı ve ayrıştırıcı basıncına yükseltilir. 4 numaralı akış hattına ayrıştırıcıdan gelen 7 numaralı akış hattı ile bir ön ısıtma yapılır. Isıtıcıda güneş enerjisinden temin edilen enerji vasıtası ile 120° C'de elde edilen amonyak buharı seperatöre giderek içerdiği su zerreciklerinden ayrıştırılarak kızdırıcıya sevk edilir. Kızdırıcıda, güneş enerjisi elde edilen yüksek sıcaklıktaki akışkan yardımı ile veya ilave yakıt kullanarak amonyak buharı kızdırılır. Elde edilen kızgın amonyak buharı bir türbinden geçirilir ve güç üretimi gerçekleştirilir.

Bu sistemlerde ısıtıcı ve seperatör birlikte ayrıştırıcı olarak adlandırılabilir ve amonyak-su çiftini kullanan absorpsiyonlu sistemde ayrıştırıcı için gerekli sıcaklık aralığı 80-120° C arasındadır. Isı borulu güneş kollektörlerinin bu sıcaklık aralığındaki verimleri %70-%58 aralığında değişmektedir.

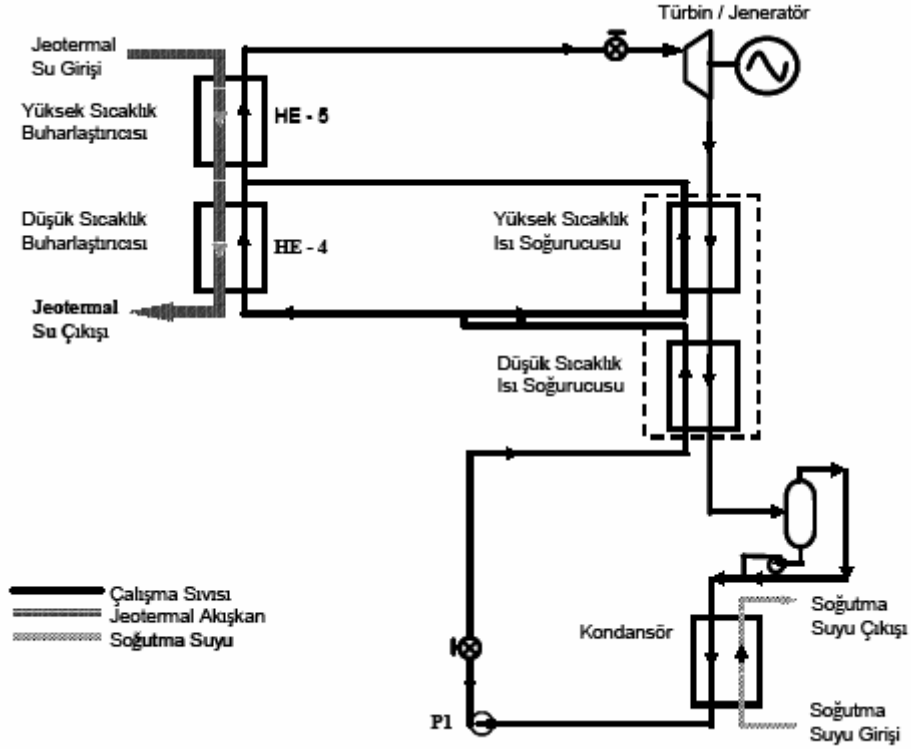
Absorpsiyonlu güç üretme sistemlerinde güneşin olmadığı durumlarda ilave ısı (atık ısı veya doğal gaz) kullanılarak kesintisiz güç üretimi mümkün olabilmektedir. Bu durum güneş pillerine göre avantaj sağlamaktadır.

5.1.2.2 Kalina Çevrimi

Karışık binary çalışma sıvısı kullanan termodinamik çevrimler orta ve düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklara uygulandıkları zaman elde edilen yüksek ısıl verimlilikleriyle dikkat çekmektedirler. EPRI'ye (Electric Power Research Institute) göre karışık çalışma sıvısı (Hidrokarbonlar ve amonyak/su) kullanan gelecekteki binary çevrimler, elektrik üretimi için düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklara uygulanabilecek en düşük maliyetli ve en iyi sistemler olacaktır.

Kalina çevrimi santraller özellikle düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklar için tasarlanmıştır ve amonyak/su çalışma sıvısını kullanmaktadır. Jeotermal akışkan buharlaştırıcısı %70 kalitede buhar üretmekte ve amonyak/su absorpsiyon tekniğiyle türbin çıkış basıncını düşürmektedir. Bu da ORC (Organic Rankine Cycles) sistemlerine göre %25'lik bir verim artışı sağlamaktadır.

Şekil 5.7’de jeotermal enerji kaynağının kullanıldığı Kalina çevrimi şematik olarak gösterilmiştir. Burada, çalışma sıvısı düşük sıcaklık buharlaştırıcısında ön ısıtmaya tabi tutulmakta ve daha sonra yüksek sıcaklık buharlaştırıcısında tamamen buharlaştırılmaktadır. Bu proses, jeotermal akışkandan çalışma sıvısına etken bir ısı alımı sağlamaktadır. Bu ısı alımı, kullanılan çalışma sıvısının niteliği dolayısıyla, isopentan ORC sistemlerinden daha az termodinamik kayıp sağlamaktadır. Ayrıca, Kalina çevriminde türbindeki genişleme, seperatörün altından alınan sıvının türbin egzosuna yönlendirilmesiyle artmakta ve daha fazla iş üretimi sağlanmaktadır (Jeotermal enerji semineri).

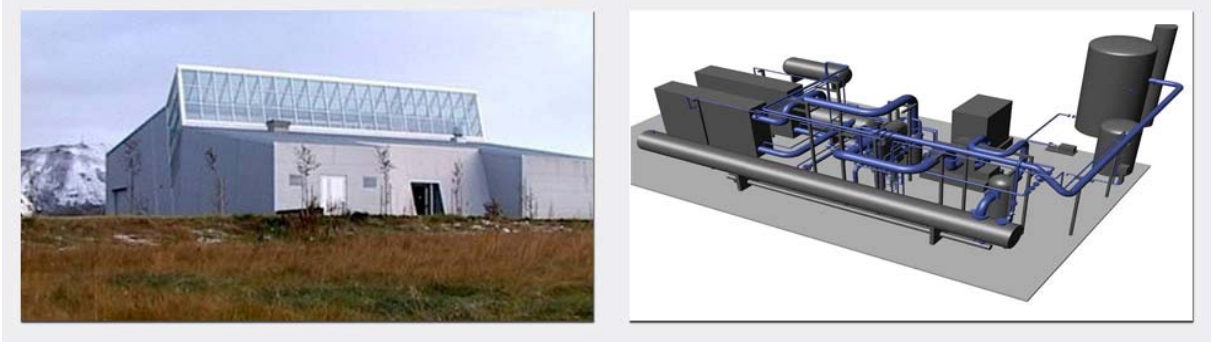


Şekil 5.7 Kalina tip binary sistemden elektrik üretimi

Bunun yanında 3 MW gücündeki bir Kalina çevrimi üzerine hesaplamalar yapılmıştır. Çevrimde amonyak-su karışımının çalışma sıvısı olduğu absorpsiyonlu soğutma prensibi ile sistemin çalıştığı varsayılmıştır. Sonuç olarak Kalina çevriminin Rankine çevrimine göre %10 daha verimli olduğu bulunmuştur (Wall, 1989).

Yine Kalina çevrimi üzerine yapılan bir çalışmada Kalina çevriminin %10 daha verimli olduğu ve yakıt sarfiyatını %20 azalttığı sonucu elde edilmiştir (Prisyazhniuk, 2005). Buradaki mantık, buhar jeneratörüne girmeden suya amonyak katılması ve gerekli ısı miktarının azalması sonucu daha az yakıt sarfiyatının söz konusu olmasıdır (Prisyazhniuk, 2006).

İlk ticari Kalina çevrimi güç santrali 1998’de Japonya Kashima’da kurulmuştur. Enerji kaynağı olarak atık ısı kullanılmıştır. 98°C’de 1.300 ton/saat su kaynak olarak kullanılıp 3,1 MW güç üretimi sağlanmıştır. İkinci ticari Kalina güç santrali 1999’da İzlanda Husavik’te devreye alınmıştır ve jeotermal enerji kaynağı kullanılmıştır. 1.8 MW güç üretimi sağlanmıştır. Şekil 5.8’de Husavik santrali ve santralin 3 boyutlu şematik şekli gösterilmektedir (Geodynamics:Kalina History).



Şekil 5.8 Husavik santrali ve santralin 3 boyutlu görünüşü (Geodynamics:Kalina History)

5.1.2.3 Kule Tipi Güneş Gücü Santrali İçin Kalina Çevrimi Uyarlaması

Daha önceki bölümlerde kule tipi güç santrali için hesaplamalar yapılmıştı. Kule tipi güç santrali için Rankine çevrimi kullanılarak elektrik üretim maliyetleri elde edilmişti. Bu bölümde Rankine çevrimi yerine Kalina çevrimi kullanılırsa maliyetlere ne şekilde etki edeceği konusunda hesaplamalar yapılacak ve sonuçlar değerlendirilecektir.

Kalina çevriminde türbin çıkış basıncı düşük olduğundan bu çevrimin verimi Rankine çevrimine göre %10-%25 daha fazladır. Biz hesaplamalarımızda %20 daha verimli bir çevrim kullanacağımızı varsayacağız. Bu durumda Rankine çevrimi için %25 kabul ettiğimiz verim Kalina için %30 olarak kullanılacaktır Bunun dışındaki kabullerimiz aynı olacak. Kalina çevrimi için heliostat yüzeyi şu şekilde elde edilir:

$$H_{ykal} = \frac{5000 \times (1 + 0,15)}{0,93 \times 0,3} = 20.609 \text{ m}^2$$

Çevrimin veriminin artması kullanılacak heliostat yüzeyinde de azalmaya neden olmuştur. Bu da maliyetlerin azalması anlamına gelmektedir. Geri kalan hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

$$TA_{bkal} = 20.609 \times 15 \times 10 \times 1,5 = 4.637.025 \$$$

$$T_{tbkal} = 3000 \times 5000 = 15 \times 10^6 \$$$

$$YM_{tkal} = 15 \times 10^6 + 4.637.025 = 19.637.025 \$$$

$$YM_{kal} = 0,1295 \times 19.637.025 + 40 \times 5000 = 2.742.994 \$$$

$$I_{hkal} = 20.609 \times 1.168 = 24.071.312 \text{ kWh/yıl}$$

$$E_{kal} = 24.071.312 \times 0,3 = 7.221.393 \text{ kWh/yıl}$$

$$g_{kal} = \frac{2.742.994}{7.221.393} = 380 \text{ mills/kWh}$$

Selçuk için Rankine çevrimi ile 396 mills/kWh olan birim elektrik üretim maliyetinin Kalina çevrimi kullanıldığı takdirde 380 mills/kWh'e kadar düştüğü görülmektedir.

5.1.2.4 Vakum Tüplü Kollektör Kullanılarak Elektrik Üretim Maliyet Hesabı

İzmir için yapılan bir hesaplamada vakum borulu kollektörlerin %63 daha verimli olduğu görülmüştür (Sunmax). Buna göre doğrusal orantı kurarak ve sistemde Kalina çevrimi kullanıldığını kabul ederek aşağıdaki değerleri elde ederiz:

$$K_{yv} = \frac{2060900}{163} = 12.643 \text{ m}^2$$

K_{yv} : Vakum tüplü kollektör yüzeyi

$$M_{kv} = 12.643 \times 500 = 6.321.500 \$$$

M_{kv} : Vakum borulu kollektör maliyeti

$$TA_{bv} = 12.643 \times 15 \times 1,5 = 284.468 \$$$

$$T_{tbv} = 6.321.500 \times 0,5 = 3.160.750 \$$$

$$YM_{tv} = 6.321.500 + 3.160.750 = 9.482.250 \$$$

$$YM_v = 0,1295 \times 9.482.250 + 40 \times 5000 = 1.427.950 \$$$

$$g_v = \frac{1.427.950}{7.221.393} = 198 \text{ mills/kWh}$$

Bu durumda Selçuk için birim elektrik üretim maliyeti vakum tüplü kollektörler için 198 mills/kWh olmaktadır.

5.1.3 Fotovoltaik Sistemlerden Elektrik Üretimi

Daha önceki bölümde güneş kulesi sistemi ile elektrik üretiminin hesabı yapılmıştı. Bu bölümde solar-fotovoltaik sistem kurulumu ile elektrik üretiminin maliyet hesabı yapılacaktır.

Hesaplamalar iki adımda yapılacak olup ilk etapta panellerde toplanan radyasyon hesaplanacak, sonrasında ise üretilecek elektrik miktarı belirlenerek birim elektrik maliyeti çıkarılacaktır.

Panellerde toplanacak olan solar radyasyon şu şekilde bulunur:

$$I_T = K_T \times H_0 \times \left[(r_t - \frac{H_d}{H} \times r_d) \times R_b + \frac{H_d}{H} \times r_d \times \left(1 + \frac{\cos \beta}{2}\right) + \rho_g \times r_t \left(1 - \frac{\cos \beta}{2}\right) \right] \quad (5.10)$$

I_T : eğimli yüzeye gelen saatlik ışınım

K_T : günlük açıklık (hava için) indeksi

H_0 : uzaydan gelen günlük radyasyon

r_t : saatlik toplam radyasyonun günlük toplam radyasyona oranı

r_d : saatlik difüz radyasyonun günlük difüz radyasyona oranı

H_d : günlük difüz radyasyon

H : günlük ışınım

R_b : eğimli yüzeye gelen radyasyonun yatay yüzeye gelene oranı

ρ_g : yerin yansıtma katsayısı

β : eğim açısı

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (5.11)$$

şeklinde elde edilir.

$$r_t = \frac{\pi}{24} \times (a + b \cos w) \times \frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - \frac{\pi w_s}{180} \cos w_s} \quad (5.12)$$

bu formüldeki a ve b katsayıları aşağıdaki şekilde bulunur:

$$a = 0,409 + 0,5016 \times \sin (w_s - 60) \quad (5.12a)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \times \sin (w_s - 60) \quad (5.12b)$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \times \frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - \frac{\pi w_s}{180} \cos w_s} \quad (5.13)$$

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \times \cos \delta \times \cos w + \sin(\phi - \beta) \times \sin \delta}{\cos \phi \times \cos \delta \times \cos w + \sin \phi \times \sin \delta} \quad (5.14)$$

$\frac{H_d}{H}$ değeri şu şekilde bulunur:

eğer $w_s \leq 81,4^\circ$ ve $0,3 \leq K_T \leq 0,8$ ise;

$$\frac{H_d}{H} = 1,391 - 3,560 \times K_T + 4,189 \times K_T^2 - 2,137 \times K_T^3 \quad (5.15)$$

eğer $w_s > 81,4^\circ$ ve $0,3 \leq K_T \leq 0,8$ ise;

$$\frac{H_d}{H} = 1,311 - 3,022 \times K_T + 3,427 \times K_T^2 - 1,821 \times K_T^3 \quad (5.16)$$

saatlik uzay radyasyonu (5.17) denklemiyle şu şekilde bulunur:

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left[\cos \phi \cos \delta (\sin w_2 - \sin w_1) + \frac{\pi(w_2 - w_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right]$$

I_o : uzaydan gelen saatlik radyasyon

G_{sc} : solar sabit

n : gün

w_s : güneşin doğuş veya batışındaki saatlik açı

w : saatlik açı

ϕ : lokal açı

δ : sapma açısı

bu hesaplamaların ardından Z_i değeri bulunur:

$$Z_i = \left(\frac{I_o}{I_T} \right)^2 (a_1 x b_1 + a_2 x b_2 + a_3 x b_3) \quad (5.18)$$

buradaki a ve b değerleri aşağıdaki denklemlerle elde edilir:

$$a_1 = \frac{R_b^2 + \rho x (1 - \cos \beta) x R_b + \rho^2 x (1 - \cos \beta)^2}{4} \quad (5.18a)$$

$$a_2 = \frac{R_b x (1 + \cos \beta - 2R_b) + \rho x (1 + \cos \beta - 2R_b) x (1 - \cos \beta)}{2} \quad (5.18b)$$

$$a_3 = \left[\frac{1 - \cos \beta}{2} - R_b \right]^2 \quad (5.18c)$$

$$b_1 = -0,1551 + 0,9226 x K_T \quad (5.18d)$$

$$b_2 = 0,1456 + 0,0544 x \ln K_T \quad (5.18e)$$

$$b_3 = K_T x (0,2769 - 0,3184 x K_T) \quad (5.18f)$$

ardından $\frac{U_L}{\pi \alpha}$ şu şekilde bulunur:

$$\frac{U_L}{\pi \alpha} = \frac{G_{T,NOCT}}{(T_{C,NOCT} - T_a)} \quad (5.19)$$

U_L : kollektörün toplam ısı kaybı katsayısı

τ : iletim

α : emilim kesri

$T_{C,NOCT}$: nominal işletme sıcaklığı için pil sıcaklığı

T_a : ortam sıcaklığı

$G_{T,NOCT}$: nominal işletme sıcaklığı için eğimli yüzeydeki radyasyon

NOCT (nominal operating cell temperature) olarak behsedilen sıcaklık hücre veya modül sıcaklığının 800 W/m^2 radyasyon, 1 m/s rüzgar hızı, 20 C° ortam sıcaklığı için ulaştığı sıcaklıktır.

Bu değerler bulunduktan sonra saatlik modül verimi aşağıdaki denklemle elde edilir:

$$\eta_i = \eta_{mp,ref} \times \eta_e \left[1 + \frac{\mu_{mp}}{\eta_{mp,ref}} \times (T_{a,i} - T_{ref}) + \frac{\mu_{mp} \times I_T}{\eta_{mp,ref}} \frac{\tau \alpha}{U_L} \times (1 - \eta_{mp,ref}) \times Z_i \right] \quad (5.20)$$

$\eta_{mp,ref}$: maksimum güç verimi

η_e : maksimum güç noktası elektroniği verimi

μ_{mp} : maksimum güç noktası sıcaklık katsayısı

$T_{a,i}$: saatlik sıcaklık (12 ayın ortalaması)

T_{ref} : referans sıcaklık

buradan ortalama saatlik elektrik üretimi E_i şu şekilde bulunur:

$$E_i = \eta_i \times A_c \times I_T \quad (5.21)$$

A_c : panel alanı

$$R_h = \frac{I_T}{(H_T \times r_T)} \quad (5.22)$$

$$x_{c,i} = \frac{L_i}{I_T \times A_c \times \eta_i} \quad (5.23)$$

$x_{c,i}$ = kritik radyasyon oranı

0

eğer $x_c \geq x_m$

$$\phi = \left(1 - \frac{x_c}{x_m}\right)^2 \quad \text{eğer } x_m = 2 \quad (5.24a)$$

$$\left| g - \left[g^2 + (1 + 2g)x \left(1 - \frac{x_c}{x_m}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right| \quad \text{diğer durumlarda} \quad (5.24b)$$

burada;

$$g = \frac{(x_m - 1)}{(2 - x_m)} \quad (5.25)$$

$$x_m = 1,85 + \frac{0,169xR_h}{k^2} - \frac{0,0696x \cos \beta}{k^2} - \frac{0,981xk}{\cos^2 \delta} \quad (5.26)$$

saatlik artan enerji ve aylık yükü karşılayacak enerji sırasıyla şu şekilde bulunur:

$$E_{ex,i} = E_i x \phi_i \quad (5.27)$$

$$E_{L,i} = E_i - E_{ex,i} \quad (5.28)$$

fotovoltaik sistemde aylık olarak depolanmadan yüklenen ortalama günlük enerji oranı aşağıdaki denklem ile bulunur:

$$f_0 = \frac{E_{L,i}}{L_i} \quad (5.29)$$

depolama sisteminin katkısının belirlenmesi için Δf_s değerinin belirlenmesi gerekir. Öncelikle d_0 değeri bulunur:

$$d_0 = \eta_b x \frac{E_{ex}}{L} \quad (5.30)$$

 η_b : depolama verimi

$$\Delta f_{\max} = \min \left[(1 - f_0), \frac{B_c}{L} \right] \quad (5.31)$$

 B_c : depolama kapasitesi

güç denklemi aşağıdaki gibidir:

$$P = 1,315 - 0,1059x \frac{f_0 x L}{B_c} - \frac{0,1847}{K_T} \quad (5.32)$$

güce bağlı olarak Δf_s değeri şu şekilde bulunur:

$$\Delta f_s = \frac{1}{2P} \left[d_0 + \Delta f_{\max} - \left\{ (d_0 + \Delta f_{\max})^2 - 4xPx d_0 x \Delta f_{\max} \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5.33)$$

aylık toplam yüklenme katsayısı f_0 ve Δf_s değerlerinin toplanmasıyla bulunur.

sistemin ay bazında günlük ortalama elektrik üretimi aşağıdaki denklem ile bulunur:

$$E = (f_0 + \Delta f_s) \times L_i \quad (5.34)$$

5.1.3.1 Fotovoltaik Sistemlerden Elektrik Üretimi Maliyet Hesabı

Bir önceki bölümde verilen hesaplamaların uygulaması spesifik olarak saat 10:00-11:00 arası Selçuk için yapılacaktır. Diğer bölgeler için ortalama güneş enerjisi değerleri ile elde edilen değerler çizelge ve grafik halinde sunulacaktır.

Hesaplamalar haziran ayının 11. günü baz alınarak yapılmış olup kullanılacak ve kabul edilecek bazı değerler şu şekildedir:

NOCT sıcaklığı: 46°C

Referans sıcaklık: 25°C

Maksimum güç verimi: %16

Bir panel alanı: 0,4 m²

Maksimum güç noktası sıcaklık katsayısı: -0,00050

Maksimum güç noktası elektroniği verimi: 0,9

Eğim: 35°

Selçuk için enlem: 38°

Selçuk için haziran ayı günlük ortalama güneş enerjisi: 24,12 MJ/m²

Yerin yansıtma katsayısı: 0,2

Selçuk için 12 ayın saatlik ortalama sıcaklıkları ise 07:00'den başlayarak saat 17:00'a kadar sırasıyla 8°C, 8°C, 9°C, 11°C, 13°C, 14°C, 15°C, 15°C, 14°C ve 13°C alınmıştır.

n: 162 (11 haziran-yılın 162. günü)

Hesaplamalara başlarken sapma açısının hesaplanması veya seçilmesi gerekir. Hesaplama aşağıdaki formülle yapılır:

$$\delta = 23,45 \times \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (5.35)$$

Veya çizelge 5.9'dan seçilebilir.

δ değeri çizelge 5.9'dan 23,1° olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.9 Ortalama hesaplar için önerilen günler ve bu günler için kullanılacak değerler (Duffie&Beckman, 1991)

Ay	Ayın i. günü için n değeri	Ayın ortalama günü için değerler		
		Tarih	n, yılın günü	δ
Ocak	i	17	17	-20,9
Şubat	31 + i	16	47	-13,0
Mart	59 + i	16	75	-2,4
Nisan	90 + i	15	105	9,4
Mayıs	120 + i	15	135	18,8
Haziran	151 + i	11	162	23,1
Temmuz	181 + i	17	198	21,2
Ağustos	212 + i	16	228	13,5
Eylül	243 + i	15	258	2,2
Ekim	273 + i	15	288	-9,6
Kasım	304 + i	14	318	-18,9
Aralık	334 + i	10	344	-23,0

Daha sonra w_s değeri aşağıdaki formülle bulunur:

$$\cos w_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad (5.36)$$

5.36 denkleminde değerler yerine konulduğunda

$w_s \approx 109,5^\circ$ bulunur.

Denklem 5.11'de verildiği gibi $K_T = \frac{H}{H_0}$ idi. Selçuk için haziran ayı ortalama günlük ışınlama miktarı $24,12 \text{ MJ/m}^2$ 'dir. H_0 değeri çizelge 5.8'den seçilir.

Çizelge 5.10'dan H_0 değeri $\phi = 38^\circ$ değerine karşılık $41,6 \text{ MJ/m}^2$ seçilmiştir.

Değerler yerine konulduğunda;

$$K_T = \frac{24,12}{41,6} = 0,579 \text{ bulunur.}$$

Sırasıyla 5.12a ve 5.12b denklemlerinde değerler yerine konulduğunda;

$$a = 0,409 + 0,5016 \times \sin(109,5-60) = 0,7904$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \times \sin(109,5-60) = 0,2985 \text{ bulunur.}$$

Çizelge 5.10 Günlük ortalama radyasyon miktarı (Duffie&Beckman, 1991)

ϕ	Oc	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
90	0.0	0.0	1.2	19.3	37.2	44.8	41.2	26.5	5.4	0.0	0.0	0.0
85	0.0	0.0	2.2	19.2	37.0	44.7	41.0	26.4	6.4	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	4.7	19.6	36.6	44.2	40.5	26.1	9.0	0.6	0.0	0.0
75	0.0	0.7	7.8	21.0	35.9	43.3	39.8	26.3	11.9	2.2	0.0	0.0
70	0.1	2.7	10.9	23.1	35.3	42.1	39.7	27.5	14.8	4.9	0.3	0.0
65	1.2	5.4	13.9	25.4	35.7	41.0	38.3	29.2	17.7	7.8	2.0	0.4
60	3.5	8.3	16.9	27.6	36.6	41.0	38.8	30.9	20.5	10.8	4.5	2.3
55	6.2	11.3	19.8	29.6	37.6	41.3	39.4	32.6	23.1	13.8	7.3	4.8
50	9.1	14.4	22.5	31.5	38.5	41.5	40.0	34.1	25.5	16.7	10.3	7.7
45	12.2	17.4	25.1	33.2	39.2	41.7	40.4	35.3	27.8	19.6	13.3	10.7
40	15.3	20.3	27.4	34.6	39.7	41.7	40.6	36.4	29.8	22.4	16.4	13.7
35	18.3	23.1	29.6	35.8	40.0	41.5	40.6	37.3	31.7	25.0	19.3	16.8
30	21.3	25.7	31.5	36.8	40.0	41.1	40.4	37.8	33.2	27.4	22.2	19.9
25	24.2	28.2	33.2	37.5	39.8	40.4	40.0	38.2	34.6	29.6	25.0	22.9
20	27.0	31.5	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.2	35.6	31.6	27.7	25.8
15	29.6	32.6	35.9	38.0	38.5	38.4	38.3	38.0	36.4	33.4	30.1	28.5
10	32.0	34.4	36.8	37.9	37.5	37.0	37.1	37.5	37.0	35.0	32.4	31.1
5	34.2	36.0	37.5	37.4	36.3	35.3	35.6	36.7	37.2	36.3	34.5	33.5
0	36.2	37.4	37.8	36.7	34.8	33.5	34.0	35.7	37.2	37.3	36.3	35.7
-5	38.0	38.5	37.9	35.8	33.0	31.4	32.1	34.4	36.9	38.0	37.9	37.6
-10	39.5	39.3	37.7	34.5	31.1	29.2	29.9	32.9	36.3	38.5	39.3	39.4
-15	40.8	39.8	37.2	33.0	28.9	26.8	27.6	31.1	35.4	38.7	40.4	40.9
-20	41.8	40.0	36.4	31.3	26.6	24.2	25.2	29.4	34.3	38.6	41.2	42.1
-25	42.5	40.0	35.4	29.3	24.1	21.5	22.6	27.0	32.9	38.2	41.7	43.1
-30	43.0	39.7	34.0	27.2	21.4	18.7	19.9	24.6	31.2	37.6	42.0	43.8
-35	43.2	39.1	32.5	24.8	18.6	15.8	17.0	22.1	29.3	36.6	42.0	44.2
-40	43.1	38.2	30.6	22.3	15.8	12.9	14.2	19.4	27.2	35.5	41.7	44.5
-45	42.8	37.1	28.6	19.6	12.9	10.0	11.3	16.6	24.9	34.0	41.2	44.5
-50	42.3	35.7	26.3	16.8	10.0	7.2	8.4	13.8	22.4	32.4	40.5	44.3
-55	41.7	34.1	23.9	13.9	7.2	4.5	5.7	10.9	19.8	30.5	39.6	44.0
-60	41.0	32.4	21.2	10.9	4.5	2.2	3.1	8.0	17.0	28.4	38.7	43.7
-65	40.5	30.6	18.5	7.9	2.1	0.3	1.0	5.2	14.1	26.2	37.8	43.7
-70	40.8	28.8	15.6	5.0	0.4	0.0	0.0	2.6	11.1	24.0	37.4	44.9
-75	41.9	27.6	12.6	2.4	0.0	0.0	0.0	0.8	8.0	21.9	38.1	46.2
-80	42.7	27.4	9.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	20.6	38.8	47.1
-85	43.2	27.7	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	20.3	39.3	47.6
-90	43.3	27.8	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	20.4	39.4	47.8

Saat 10:00-11:00 arası saatlik açı $w=-22,5^\circ$ dir. Saatlik açı saat 12:00 için 0 kabul edilir. Öğleden sonra pozitif, önce ise negatif olarak saatte 15° artar veya azalır.

a,b ve w değerleri denklem 5.12'de yerine konulduğunda ;

$$r_t = \frac{\pi}{24} x (a + b x \cos(-22,5)) \frac{\cos(-22,5) - \cos 109,5}{\sin 109,5 - \frac{\pi x 109,5}{180} x \cos 109,5} = 0,267 \text{ bulunur.}$$

Denklem 5.13'te değerler yerine konulduğunda ;

$$r_d = \frac{\pi}{24} x \frac{\cos(-22,5) - \cos 109,5}{\sin 109,5 - \frac{\pi x 109,5}{180} x \cos 109,5} = 0,251 \text{ bulunur.}$$

$$R_b = \frac{\cos(38 - 35)x \cos 23,1x \cos(-22,5) + \sin(38 - 35)x \sin 23,1}{\cos 38x \cos 23,1x \cos(-22,5) + \sin 38x \sin 23,1} = 0,953 \text{ bulunur.}$$

$w_s > 81,4^\circ$ ve $0,3 \leq K_T \leq 0,8$ olduğundan

$$\frac{H_d}{H} = 1,311 - 3,022x0,579 + 3,427x0,579^2 - 1,821x0,579^3 = 0,357 \text{ bulunur.}$$

Denklem 5.10'da değerler yerine konulduğunda;

$$I_T = 24,12x10^6 \left[(0,267 - 0,357x0,251)x0,953 + 0,357x0,251x\left(1 + \frac{\cos 35}{2}\right) + 0,2x0,267x\left(1 - \frac{\cos 35}{2}\right) \right] = 7,889x10^6 \text{ J bulunur.}$$

Denklem 5.17'de değerler yerine konulduğunda;

$$I_o = \frac{12x3600}{\pi} x 1367x\left(1 + 0,033x\cos\frac{360x162}{365}\right) \left[\cos 38x \cos 23,1x\{\sin(-15) - \sin(-30)\} + \frac{\pi x\{(-15) - (-30)\}}{180} x \sin 38x \sin 23,1 \right] = 4,339 \text{ MJ}$$

bulunur.

5.18a, 5.18b ve 5.18c denklemlerinde değerler yerine konulduğunda;

$$a_1 = \frac{0,953^2 + 0,2x(1 - \cos 35)x0,953 + 0,2^2 x(1 - \cos 35)^2}{4} = 0,236$$

$$a_2 = \frac{0,953x(1 + \cos 35 - 2x0,953) + 0,2x(1 + \cos 35 - 2x0,953)x(1 - \cos 35)}{2} = -0,043 ,$$

$$a_3 = (0,0905 - 0,953)^2 = 0,744 \text{ bulunurken;}$$

5.18d, 5.18e ve 5.18f denklemlerinde değerler yerine konulduğunda;

$$b_1 = -0,1551 + 0,9226x0,579 = 0,379$$

$$b_2 = 0,1456 + 0,0544x\ln 0,579 = 0,116$$

$$b_3 = 0,579x(0,2769 - 0,3184x0,579) = 0,054$$

şeklinde b değerleri elde edilir. Bulunan bu değerler 5.18 denklemine yerine konulduğunda;

$$Z_i = \left(\frac{4,339}{7,889} \right)^2 \times (0,236 \times 0,379 + (-0,043) \times 0,116 + 0,744 \times 0,054) = 0,038 \text{ bulunur.}$$

Denklem 5.19'da değerler yerine konulduğunda;

$$\frac{U_L}{\tau\alpha} = \frac{800}{(46 - 20)} = 30,76 \text{ W/m}^2\text{K bulunur.}$$

Bu değerlerin bulunmasının ardından saatlik panel verimi 5.20 denkleminde değerler yerine konularak bulunabilir:

$$\eta_i = 0,16 \times 0,9 \left[1 - \frac{0,0005}{0,16} \times (11 - 25) - \frac{0,0005 \times 7,889 \times 10^6}{0,16 \times 30,76 \times 3600} \times (1 - 0,16) \times 0,038 \right] = 0,151$$

Saatlik panel veriminin bulunmasının ardından saatlik elektrik çıkışı 5.21 denkleminde değerlerin yerine konmasıyla hesap edilebilir:

$$E_i = 0,151 \times 0,4 \times \frac{7,889 \times 10^6}{3600} = 132,6 \text{ W olarak bulunur.}$$

Hesaplamaların bundan sonraki kısmı panelde üretilen elektriğin bir bölümünün elektrik yükünü karşılamasına dayalı olduğu durumlar için geçerlidir. Biz ise ürettiğimiz tüm elektriği elektrolizde hidrojen elde etmek için kullanacağımızı varsaydığımız için E_i değerini baz alacağız. Bulduğumuz E_i değeri Selçuk için haziran ayının 11. günü saat 10:00-11:00 arası için yapılan hesaplamaların sonucudur. Buradan günlük hesaba geçeceğiz.

Günlük hesaplamalarda belirlenen günler için saat hesapları ayrı ayrı yapılarak toplandı. Bu şekilde günlük toplam elektrik üretim miktarları elde edildi. Çizelge 5.11'de 11 haziran için yapılan hesaplamaların özet tabloları bulunmaktadır. Çizelge 5.12'de ise 11 Haziran, 16 Mart, 15 Eylül ve 10 Aralık için gün bazında bulunan toplam elektrik üretim miktarları görülmektedir.

Çizelge 5.11 Selçuk için saat bazında hesaplama özet tablosu (11 Haziran)

Saat	Ta (C)	I_T (MJ)	Z_i	η_i	E_i (Wh)
7-8	7	0.503	2.118	0.152	8.504
8-9	8	3.212	0.111	0.152	54.115
9-10	8	5.841	0.052	0.152	98.415
10-11	9	7.889	0.038	0.151	132.538
11-12	11	9.024	0.032	0.150	150.703
12-1	13	9.024	0.032	0.149	149.801
1-2	14	7.889	0.038	0.149	130.565
2-3	15	5.841	0.052	0.148	96.371
3-4	15	3.212	0.111	0.148	52.991
4-5	14	0.503	2.118	0.149	8.328

Çizelge 5.12 Hesaplama yapılan günler için panel başına elektrik üretimi

Hesaplama yapılan tarih	Günlük üretilen elektrik (Wh)
11 Haziran	882,331
16 Mart	492,383
15 Eylül	445,761
10 Aralık	405,131

Bu adımdan sonra panelin üreteceği yıllık elektrik miktarı bulunacaktır. Bu işlem yapılırken hesaplama yapılan günlerin değerleri buldukları mevsim için baz alınacaktır. Buna göre bir panelin üreteceği ortalama günlük enerji yaz ayı için 882,331 Wh, ilkbahar için 492,383 Wh, sonbahar için 445,761 Wh ve kış için 405,131 Wh olacaktır.

O halde yaz ve ilkbahar mevsimlerinin 92'şer gün, sonbaharın 91 gün ve kışın 90 gün olduğu göz önüne alındığında Selçuk için bir panelin üreteceği yıllık toplam elektrik gücü şu şekilde bulunur :

$$E_p = 92 \times 882.331 + 92 \times 492.383 + 91 \times 445.761 + 90 \times 405.131 = 203.500 \text{ Wh}$$

E_p = Bir panelin üreteceği yıllık enerji miktarı

5.1.3.2 Sabit Yıllık Sermaye Masrafı

Fotovoltaik sistemlerde yatırım maliyetinin en önemli kısmını fotovoltaik paneller oluşturmaktadır. Bu sistemlerin kurulumları birkaç ay içinde tamamlandığı için inşaat maliyetleri sistemin diğer birimleri ile beraber panel maliyetinin %30'luk bir kısmı içinde düşünülebilir. Bu şekilde toplam tesis bedeli (T_{tb}) bulunur. Diğer kabuller çizelge 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13 Fotovoltaik sistem maliyet hesabı için kabuller

Tesis Gücü	N_e	1 MW
Panel Fiyatı	C	100 \$
Panel Gücü	P	54W
Panel Alanı	A	0,4 m ²
Faiz Oranı	i	%5
Amortisman Süresi	n	10 yıl
Tesis Ömrü		25 yıl

Panel fiyatı iyimser bir yaklaşımla 100 \$ alınabilir(Enisolar). 1 MW kurulu güç için gereken panel sayısı 5.35 denklemiyle bulunabilir:

$$B = \frac{N_e}{P} \quad (5.35)$$

Panel sayısı belirlendikten sonra tesis için gerekli alanın hesabına geçilir. Bunun için panel sayısı ile birim panel alanı çarpılır ;

$$A_t = B \times A \times 1,2 \quad (5.36)$$

A_t = Tesis alanı

Tesis alanı hesaplanırken %20 diğer sistem elemanları ve yönetim binalarının kaplayacağı alan olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle panel sayısı ve birim panel alanını 1,2 ile çarptık. Tesis alanı bulunduğundan sonra toplam arsa bedeli (TA_b) bulunan alanın hesaplama yapılan bölge için kullanacağımız birim arsa fiyatı ile çarpımı sonucu elde edilir. Birim arsa fiyatlarını çizelge 5.2'ye göre alacağız.

Toplam arsa bedeli ve toplam tesis bedeli toplamı yatırım maliyetini (YM) verecektir.

$$YM = T_{tb} + TA_b \quad (5.37)$$

Ardından yıllık sabit sermaye maliyeti hesabına geçilecektir. Bunun için öncelikle amortisman faktörü bulunmalıdır. Amortisman faktörü denklem 5.5'te değerlerin yerine konulmasıyla bulunabilir. Amortisman faktörü ile yatırım maliyetinin çarpımı yıllık sermaye masrafını verecektir:

$$M_y = YM \times C_{rf} \quad (5.38)$$

M_y : Yıllık sermaye masrafı

Yıllık üretilen elektrik enerjisi bir panelin ürettiği enerji ile panel sayısının çarpımıyla bulunur:

$$E = E_p \times B \quad (5.39)$$

Yıllık sermaye masrafının üretilen yıllık elektrik enerjisine bölümüyle birim yatırım maliyeti elde edilir:

$$g_k = \frac{M_y}{E} \quad (5.40)$$

1 MW kurulu gücü sağlamak için gerekli panel sayısı 5.35 denkleminde değerler yerine konulduğunda bulunabilir:

$$B = \frac{1.000.000}{54} = 18.518 \text{ adet}$$

Panel fiyatının iyimser bir yaklaşımla 100 \$ alınabileceği daha önce belirtilmişti. Bu durumda sistemin ana maliyetini oluşturan panel maliyeti şu şekilde bulunur:

$$M_p = 18.518 \times 100 = 1.851.800 \$$$

M_p = panel maliyeti

Toplam tesis bedeli panel fiyatlarına diğer sistem parçalarının, yönetim ve diğer binalar ile sistemin inşaat maliyetlerinin eklenmesiyle bulunur. Bu maliyetler panel maliyetinin %30'u olarak kabul edildi. Fotovoltaik sistemlerin kurulum süreleri ortalama 3-4 ay olduğu için inşaat süresince oluşacak eskalasyon maliyeti ihmal edilebilir. Bu durumda toplam tesis bedeli panel maliyetinin 1,3 ile çarpımıyla elde edilebilir:

$$T_{tb} = 1.851.800 \times 1,3 = 2.407.340 \$$$

Şimdi bu gücü sağlayacak panellerin kaplayacağı alan 5.36 denklemiyle bulunabilir.

$$A_t = 18.518 \times 0,4 \times 1,2 = 8888 \text{ m}^2 \text{ (hesaplamada } 9000 \text{ m}^2 \text{ olarak kullanacağız)}$$

Selçuk Ege Bölgesi'nde yer aldığından arsa fiyatı olarak çizelge 5.2'den $14 \text{ \$/m}^2$ değerini kullanabiliriz. Buna göre toplam arsa bedeli şu şekilde bulunabilir:

$$T_{A_b} = 9.000 \times 14 = 126.000 \$$$

5.37 denklemde değerler yerine konulduğunda yatırım maliyeti bulunabilir :

$$YM = 2.407.340 + 126.000 = 2.533.340 \$$$

Amortisman süresinin 10 yıl faiz oranının %5 alınacağı çizelge 5.13'te belirtilmişti. Buna göre amortisman faktörü denklem 5.5'te değerler yerine konularak bulunabilir:

$$C_{rf} = \frac{0,05 \times (1,05)^{10}}{(1,05)^{10} - 1} = 0,1295$$

Bu hesaplamaların ardından yıllık sermaye masrafı 5.38 denklemine göre bulunur.

$$M_y = 2.533.340 \times 0,1295 = 328.068 \text{ \$/yıl}$$

Ardından 5.39 denklemine göre yıllık üretilen elektrik enerjisi miktarı bulunur:

$$E = 203.500 \times 18.518 = 3.768.413 \text{ kWh/yıl}$$

5.40 denklemine göre ;

$$g_k = \frac{328.068}{3.768.413} = 87,05 \text{ mills/kWh olarak bulunur.}$$

5.1.3.3 İşletme ve Bakım Maliyeti

İşletme ve bakım masrafları işletme esnasındaki tüm işçilik, malzeme tedarik ve depolama, tamir ve bakım, sigorta v.b. gibi masrafları kapsar. Bu masrafları iki kısım halinde ele almak mümkündür.

- \$ / kW yıl olarak ifade edilen ve kullanma süresi veya şebeke yük faktörüne bağlı olmayan yıllık sabit masraflar

- \$ / kWh olarak ifade edilen ve üretilen enerji ile orantılı yıllık değişken masraflar (Aybers ve Şahin,1995).

Fotovoltaik sistemlerde işletme ve bakım maliyeti ilk yatırım maliyetinin %2'si kabul edilebilir. Bu durumda yıllık işletme ve bakım maliyetini şu şekilde formülize edebiliriz:

$$M_i = YM \times k \quad (5.41)$$

M_i : yıllık işletme ve bakım maliyeti

k: Yıllık işletme ve bakım maliyet katsayısı (0,02 → %2 kabul edildiği için)

$$g_i = \frac{M_i}{E} \quad (5.42)$$

5.42 denklemleri ile birim elektrik enerjisi başına işletme ve bakım maliyeti bulunur. Birim elektrik enerjisi başına düşen sabit sermaye maliyeti ile işletme ve bakım maliyetlerinin toplamı birim elektrik enerjisi maliyetini verir:

$$g = g_k + g_i \quad (5.43)$$

5.41 formülündeki değerler yerine konulduğunda;

$$M_i = 2.533.340 \times 0,02 = 50.667 \text{ \$/yıl olarak bulunur.}$$

Bu adımdan sonra yapılacak işlem g_i değerini bulmak ve g_k ile g_i değerlerini toplayarak toplam elektrik enerjisi maliyetini çıkarmaktır.

$$g_i = \frac{50.667}{3.768.413} = 13,44 \text{ mills/kWh}$$

$$g = 87,05 + 13,44 = 100,5 \text{ mills/kWh}$$

Bulunan bu maliyet Selçuk için yapılan hesaplama sonucunda ortaya çıkmıştır. Hesaplamalar saatlik üretilecek elektrik enerjisinden yola çıkılarak yıllık üretilecek elektrik enerjisi ve yapılan harcamaların hesaplanmasıyla birim elektrik enerjisi üretim maliyetinin bulunması şeklinde yapılmıştır. Maliyeti etkileyen birçok parametre olmakla beraber bunların en önemlisi ve en belirleyici olanı bölgenin güneş enerjisi potansiyelidir. Bu hesaplamayı baz alarak ve diğer

parametrelerin etkisini ihmal ederek Türkiye'nin yedi bölgesi için fotovoltaik sistem ile üretilecek elektrik enerjisi maliyeti ortaya konabilir.

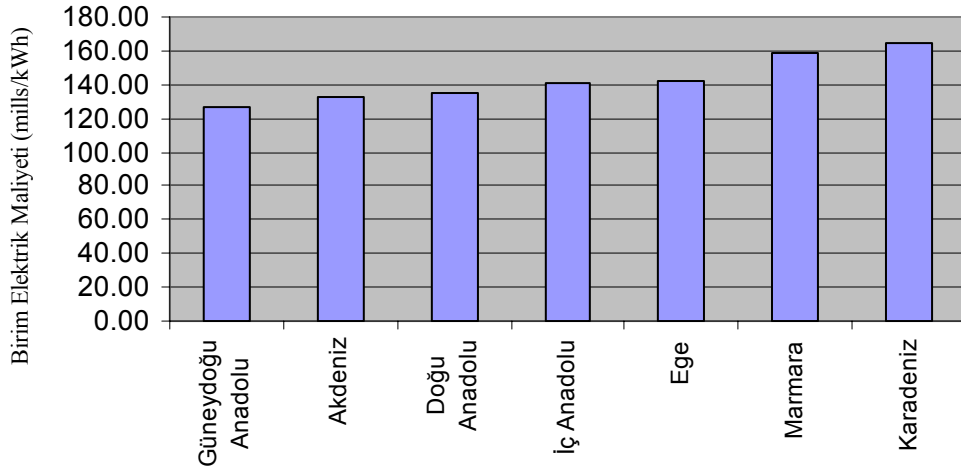
Selçuk için yıllık güneş enerjisi potansiyeli 1838 kWh/m² yıldır. Bu değere göre bölgelerimizin ortalama güneş enerjisi potansiyelleri ile Selçuk için bulduğumuz maliyeti ters orantı yaparak maliyet analizi yapabiliriz.

Çizelge 2.3'te Türkiye'nin yedi bölgesi için yıllık ortalama güneş enerjisi potansiyeli verilmişti. Bu değerler ve bu değerlere göre bulunan maliyetler çizelge 5.14'te verilecek olup şekil 5.7'de grafiksel olarak gösterilecektir.

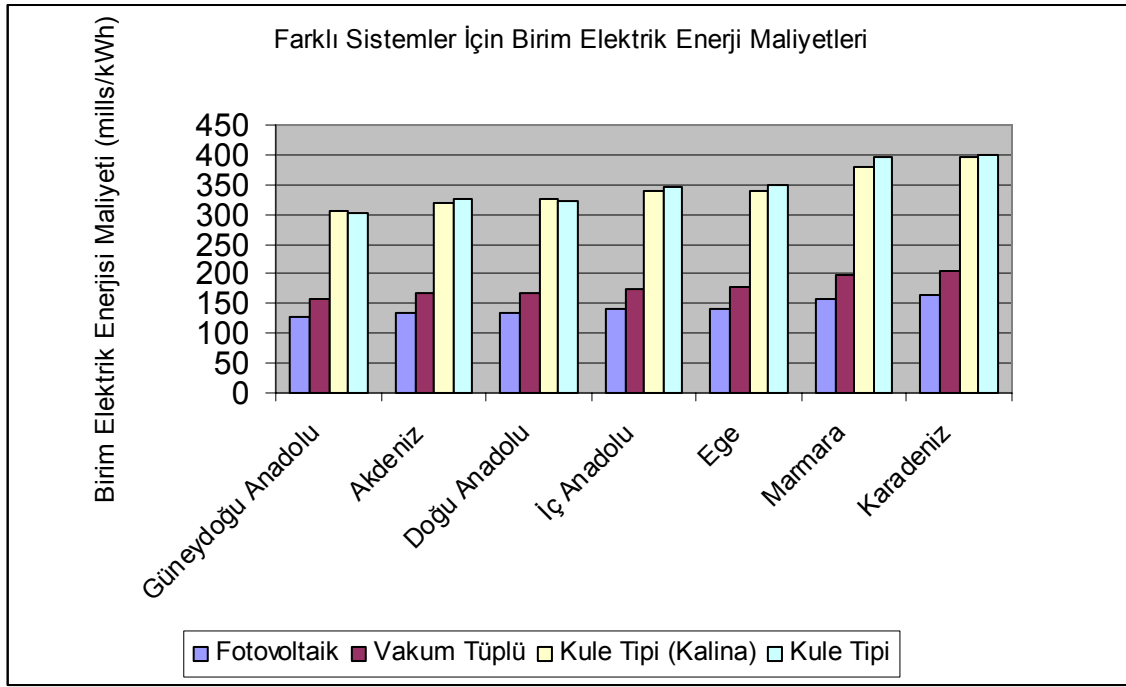
Çizelge 5.14 Bölgelere göre birim enerji maliyeti

<u>Bölgeler</u>	<u>Güneş enerji potansiyeli</u> (kWh/m ² yıl)	<u>Birim Enerji Maliyeti</u> (mills/kWh)
Güneydoğu Anadolu	1460	126,52
Akdeniz	1390	132,89
Doğu Anadolu	1365	135,33
İç Anadolu	1314	140,58
Ege	1304	141,66
Marmara	1168	158,15
Karadeniz	1120	164,93

Bölgelere Göre Birim Elektrik Maliyeti



Şekil 5.9 Bölgelere göre birim elektrik maliyetleri



Şekil 5.10 Farklı sistemler için birim elektrik maliyet grafiği

5.2 Elektroliz Maliyeti

Hidrojen üretim maliyeti hesaplaması yapılırken güneş enerjisinden elde edilen elektriğin maliyetinden sonra hesaplanacak ikinci maliyet elektroliz maliyetidir. Elektroliz maliyet hesabında amortisman metodu kullanılacaktır.

Bir tesisin kuruluşunda yapılan toplam yatırım masraflarının, kredi alınmışsa kredinin faizi de dahil olmak üzere belirli bir sürede geri ödenmesi amacıyla toplam yatırım değerinin önceden belirlenmiş bir kısmının, sermaye maliyeti olarak her yıl işletme gelirlerinden ayrılması ve vergi dışı bırakılması işlemine “Amortisman” adı verilir. Yıllık gelirden ayrılacak amortisman payının belirlenmesinde çeşitli yöntemler vardır (Aybers ve Şahin, 1995). Enerji maliyeti hesabında sabit yıllık amortisman metodu kullanılacaktır.

$$A = P \cdot \left[\frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (5.44)$$

A: Yıllık amortisman

P: Yatırım maliyeti

i: Faiz oranı

n: Tesis ömrü

Elektroliz sistemi için kabul edilen değerler çizelge 5.15'te verilmiştir.

Çizelge 5.15 Elektroliz maliyet hesabında kabul edilen değerler

Faiz Oranı	(i)	0,05
Tesis Ömrü	(n)	20 yıl
Kapital Maliyeti	(C _s)	1.000.000 \$

5 MW kapasiteli bir elektroliz tesisinin toplam yatırım maliyeti 3.518.000 \$'dır (Toprak, 2006). Biz hesaplamamızda 1 MW kapasiteli elektroliz sistemi kullanacağımız kabul ediyoruz. Elimizdeki veri ışığında 1 MW kapasiteli tesis için 1.000.000 \$ toplam yatırım maliyeti baz alınmıştır.

Bu veriler ışığında 5.44 denkleminde değerler yerine konulduğunda;

$$A = 1.000.000x \left[\frac{(1 + 0,05)^{20} \cdot 0,05}{(1 + 0,05)^{20} - 1} \right] = 80.257 \text{ \$/yıl bulunur.}$$

5.2.1 Tesis Maliyeti

Birim tesis maliyeti yıllık amortisman ödemesinin yıllık hidrojen üretimine bölünmesiyle bulunur:

$$M_{te} = \frac{A}{H_y} \quad (5.45)$$

H_y : Yıllık üretilen hidrojen miktarı

M_{te} : Üretilen birim hidrojen başına tesis maliyeti

5.2.2 İşletme ve Bakım Maliyeti

Birim işletme ve bakım maliyeti yıllık işletme ve bakım maliyetinin yıllık hidrojen üretimine bölünmesiyle bulunur. Elektroliz sistemlerinde işletme ve bakım maliyeti ilk maliyetin %5'i kadar alınabilir (Bilgen ve Yumurtacı,2004). İşletme ve bakım maliyetinin yıllık üretilen hidrojen miktarına bölünmesiyle birim işletme ve bakım maliyeti elde edilir.

$$\dot{I}_y = 1.000.000 \times 0,05 = 0,05 \times 10^6 \$$$

\dot{I}_y : Yıllık işletme ve bakım maliyeti

$$M_{ie} = \frac{\dot{I}_y}{H_y} \quad (5.46)$$

M_{ie} : Üretilen birim hidrojen başına işletme ve bakım maliyeti

5.2.3 Enerji Maliyeti

Enerji maliyeti hesaplanırken hidrojen üretmek için kullandığımız yıllık enerji ile birim enerji maliyetini çarpmamız gerekir. Hesaplamamızı yaparken fotovoltaik sistemde ürettiğimiz tüm elektrik enerjisi ile hidrojen ürettiğimizi varsayıyoruz. Bu durumda toplam enerji maliyeti 5.47 denklemine göre bulunur.

$$T_{em} = E \times g \quad (5.47)$$

T_{em} : Elektroliz için yıllık toplam enerji maliyeti

E : Yıllık kullanılan enerji

g : Birim enerji maliyeti

Yıllık kullanılan enerji hesaplama yapılan bölge için üretilen elektrik enerjisi miktarıdır. Çünkü hesaplama yaparken ürettiğimiz tüm elektriği hidrojen üretimi için kullandığımızı varsayıyoruz.

$$T_{em} = 3.768.413 \times 0,1005 = 378.725 \$/\text{yıl}$$

Yukarıdaki hesaplama Selçuk için bulunan değerdir. Diğer bölgeler için hesaplamalar yapılmış olup bu değer 378.673 \$ alınacaktır.

5.3 Hidrojen Üretim Maliyeti

Hidrojen üretim maliyetini hesaplamak için öncelikle üretilecek hidrojen miktarının bulunması gerekmektedir. Bu işlem fotovoltaik sistemde üretilen elektrik enerjisinin birim hidrojen üretmek için gerekli enerjiye bölünmesi ile bulunabilir. Hidrojen üretmek için ihtiyacımız olan enerji miktarının belirlenmesi için çizelge 5.17'deki bilgilerden faydalanılacaktır.

Çizelge 5.16 Elektroliz sistem özellikleri (Ivy,2004)

	Sistemin Enerji İhtiyacı (kWh/kg)	Hidrojenin Isıl Değeri (kWh/kg)	Sistemin Verimi (%)	Üretim Basıncı (psi)
Stuart: IMET 1000	53,4	39	73	360
Teledyne: EC-750	70,1	39	56	60-115
Proton: HOGEN 380	62,3	39	63	200

Norsk Hydro: Atmospheric	53,5	39	73	435
Avalence: Hydrofiller 175	60,5	39	64	10000

Çizelgenin ilk sütununda farklı elektroliz sistemlerinde 1 kg hidrojen üretmek için gerekli enerji miktarları verilmiştir. Bu değerlerin ortalaması alındığında 1 kg hidrojen üretmek için 59,96 kWh'lik enerjiye ihtiyacımız olduğu görülmektedir. Bu durumda fotovoltaik sistem ile ürettiğimiz enerjiyi 1 kg hidrojen üretmek için ihtiyacımız olan enerjiye böldüğümüzde hesaplama yaptığımız bölge için yıllık üretilecek hidrojen miktarını bulmuş oluruz.

$$H_y = \frac{E}{e} \quad (5.48)$$

e : Bir kg hidrojen üretmek için ihtiyacımız olan enerji

$$H_y = \frac{3.768.413}{59,96} = 62.848 \text{ kg}$$

Selçuk için fotovoltaik sistemde elde edilen elektrik enerjisi ile üretilecek yıllık hidrojen miktarı 62.848 kg olarak bulunmuştur. Hesaplama yapılan bölgeler için bulunan değerler şekil 5.7'de sunulmuştur.

Yıllık üretilecek hidrojen miktarı bulunduktan sonra elektroliz birim enerji maliyeti hesaplanabilir.

$$M_{el} = \frac{T_{em}}{H_y} \quad (5.49)$$

M_{el} : Elektroliz birim enerji maliyeti (\$/kg)

Selçuk için T_{em} 378.725 \$ bulunmuştur. Üretilecek yıllık hidrojen miktarı ise 62.848 kg bulundu.

Buna göre Selçuk için elektroliz birim enerji maliyeti

$$M_{el} = \frac{378.725}{62.848} = 6,026 \text{ \$/kg} \text{ şeklinde bulunur.}$$

Tesis maliyeti ile işletme ve bakım maliyetlerinin bulunması için kullanılacak formüller sırasıyla 5.45 ve 5.46 denklemlerinde verilmişti. Bu denklemlerde değerleri yerine koyduğumuzda Selçuk için sonuçlar elde edilmiş olur.

$$M_{te} = \frac{80.257}{62.848} = 1,277 \text{ \$/kg}$$

$$M_{ie} = \frac{50.000}{62.848} = 0,795 \text{ \$/kg}$$

Üretilecek hidrojenin toplam maliyetini bulmak için enerji maliyetine tesis maliyeti ile işletme ve bakım maliyetlerini eklemek gerekmektedir.

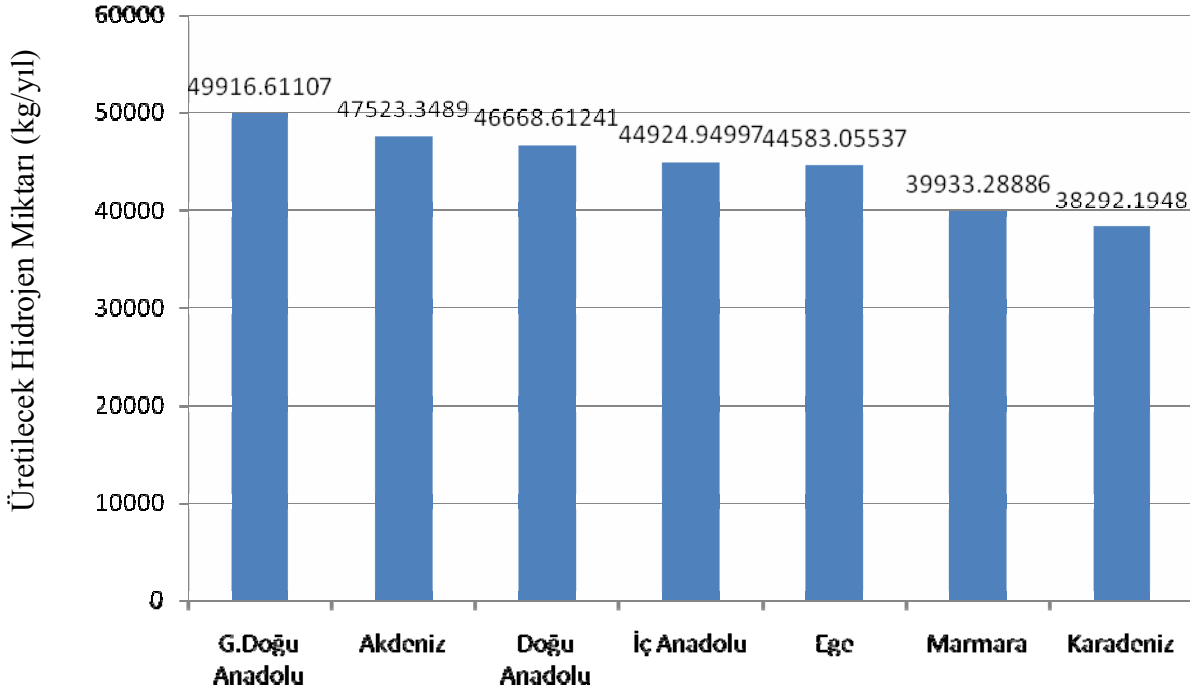
$$M_t = M_{el} + M_{te} + M_{ie} \quad (5.50)$$

M_t : Hidrojenin toplam üretim maliyeti

$$M_t = 6,026 + 1,277 + 0,795 = 8,098 \text{ \$/kg}$$

Selçuk için hidrojen üretim maliyeti 8,098 \\$/kg olarak bulunmuştur.

Hesaplama yapılan diğer bölgeler için bulunan değerler çizelge 5.18'de verilecek ve şekil 5.9'da grafik olarak sunulacaktır.

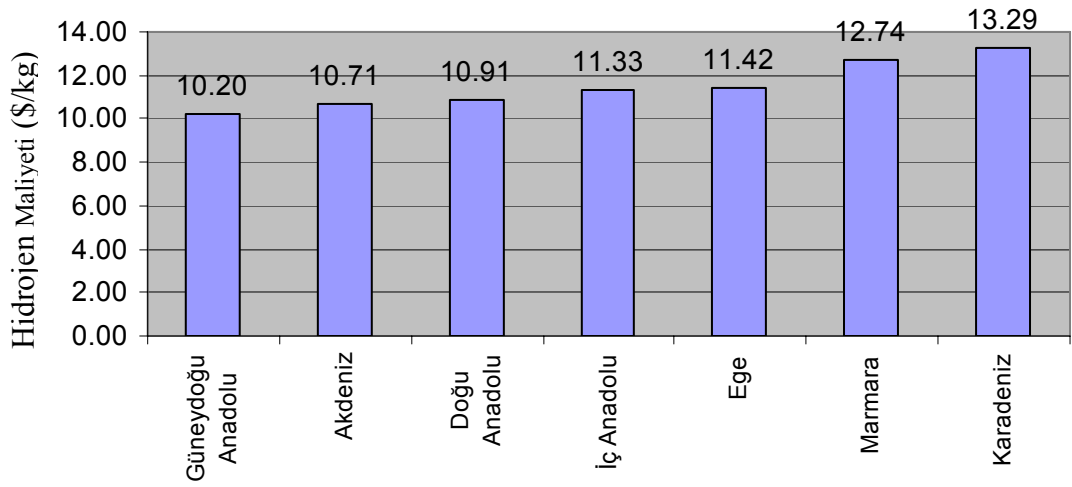


Şekil 5.11 Bölgelere göre üretilen yıllık hidrojen miktarı

Çizelge 5.17 Bölgeler için hidrojen maliyetleri

Bölgeler	Birim Enerji Maliyeti (\\$/kg)	Birim Tesis Maliyeti (\\$/kg)	Birim Bakım Maliyeti (\\$/kg)	Toplam Maliyet (\\$/kg)
G.Doğu Anadolu	7,58	1.61	1.00	10,20
Akdeniz	7,96	1.69	1.05	10,71
Doğu Anadolu	8,11	1.72	1.07	10,91
İç Anadolu	8,42	1.79	1.11	11,33
Ege	8,49	1.80	1.12	11,42
Marmara	9,48	2.01	1.25	12,74
Karadeniz	9,88	2.10	1.31	13,29

Çizelge 5.17’de görüldüğü gibi bölgesel ortalamalar alınarak yapılan hesaplamada hidrojen üretim maliyetleri 10,20\$/kg ile 13,29\$/kg arasında değişmektedir. Güneşlenme açısından en iyi bölge olan Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde en düşük maliyet elde edilirken güneşlenme açısından en zayıf bölge olan Karadeniz Bölgesi’nde maliyet en yüksek çıkmaktadır. Bunun sebebi elektrolizde kullandığımız güneş enerjisi maliyetinin hidrojenin toplam üretim maliyetine doğrudan ve en yüksek orantı ile etki etmesidir. Ayrıca üretilecek hidrojen miktarı da güneşlenmenin iyi olduğu bölgelerde daha fazla olacağından birim tesis maliyeti ile birim işletme ve bakım maliyetleri de bu bölgelerde daha düşük olmaktadır.



Şekil 5.12 Bölgelere göre birim hidrojen üretim maliyetleri

6 SONUÇLAR

Günümüzde enerji iki açıdan ön plana çıkmaktadır. Birincisi ülkelerin kendi enerji ihtiyacını karşılayarak dışarıya bağımsız olmaları, ikincisi ise enerji üretiminin çevresel etkileridir. Her iki açıdan da bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek makul görülmektedir.

Bu çalışmada öncelikle termodinamik dönüşüm tekniği, solar-fotovoltaik, Kalina çevrimli ve vakum tüplü sistemlerden elektrik üretiminin maliyet analizi yapılarak kıyaslanmıştır. Hesaplamalar yapılırken tüm yöntemler ile bulunan sonuçlar Türkiye'nin yedi bölgesi bazında çizelgeler ve grafikler halinde sunulmuştur. Solar-fotovoltaik sistem için hesaplamalar İzmir'in Selçuk ilçesi için yapılmış olup sonuçlar yedi bölgenin güneş enerjisi potansiyeli ile Selçuk'un güneş enerjisi potansiyeli arasında orantı kurularak her bölge için ayrı ayrı verilmiştir. Birim elektrik üretim maliyetleri termodinamik dönüşüm tekniği ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde en düşük maliyetle 301 mills/kWh, Karadeniz Bölgesi'nde ise en yüksek maliyetle 399 mills/kWh olarak elde edilmiştir. Solar-fotovoltaik sistem ile ise Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde 126,52 mills/kWh, Karadeniz Bölgesi'nde ise 164,93 mills/kWh olarak bulunmuştur. Tüm sistemlerde Güneydoğu Anadolu Bölgesi güneş enerjisi potansiyeli en yüksek bölge olmasından dolayı en uygun maliyetlerin elde edildiği bölge olarak ön plana çıkmıştır. Bunun yanında spesifik olarak seçilecek, güneş enerjisi açısından daha zengin bölgelerde bu maliyetler daha da aşağılara gelebilecektir. Örneğin hesaplama yapılan Selçuk'ta birim elektrik enerjisi fiyatı 100,5 mills/kWh olarak bulunmuştur. Bunun yanında Selçuk için yapılan hesaplamada 3.768.413 kWh/yıl elektrik üretileceği hesaplanmıştır. Aynı elektriği kömür kullanarak elde etmek atmosfere 3610 ton CO₂ salınması anlamına gelmektedir. Bu da çevresel anlamda 43.320 \$/yıl maliyetin engellenmesi demektir.

Solar-fotovoltaik sistemden elde edilen elektrik elektroliz sisteminde kullanılarak hidrojen üretim maliyetleri çıkarılmıştır. En ucuz birim hidrojen maliyeti 10,20 \$/kg ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde elde edilirken, en pahalı maliyet ise 13,29 \$/kg ile Karadeniz Bölgesi'nde elde edilmiştir. Selçuk için bu değer 8,098 \$/kg'dır. Hidrojen maliyeti birim elektrik maliyeti ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Buna göre bu sistemi güneş enerjisi potansiyeli en yüksek bölgeye kurmak birim maliyetlerin en ucuz şekilde elde edilmesi anlamına gelmektedir.

Fosil yakıt rezervleri hızla azalmaktadır. Bu nedenle bu tip yakıtların fiyatları da hızlı bir şekilde artmaktadır. Bunun yanında küresel ısınma gibi dünyayı oldukça ciddi derecede tehdit eden

çevresel zararlara neden olmaktadır. Bu yüzden vakit kaybetmeden yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelinmesi gerekmektedir. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi sınırsız bir alternatif olarak karşımızda durmaktadır. Güneş enerjisinden dünyanın coğrafik yapısı gereği belli bölgelerde verimli olarak yararlanılabilmektedir. Hidrojen bu enerji taşıyıcısı olarak bu handikapı ortadan kaldırabilecek en önemli alternatif gibi görünmektedir. Elektroliz yöntemiyle suyun ayrıştırılmasıyla elde edilmesi hidrojeni de sınırsız bir enerji kaynağı olarak önümüze koymaktadır.

Türkiye için bu alternatifi değerlendirmek oldukça mantıklı görünmektedir. Çünkü Türkiye hem enerji ithal eden bir ülke konumundadır, hem de güneş enerjisi açısından zengin bir coğrafyada bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar teşvik sistemiyle bu konuda girişime hazır önemli bir kitle olduğunu göstermektedir.

Hidrojen enerjisi günümüz için pahalı ve geleneksel yakıtlarla rekabet edemeyecek gibi bir konumda görünse de hem teknolojik gelişmelerle maliyeti azalacağından, hem de doğaya zarar vermeyeceğinden dolayı üzerinde yoğun olarak çalışılarak geliştirilmesi ve aktif olarak kullanımına geçilmesi gereken bir enerjidir.

KAYNAKLAR

- Almogren, S. Ve Veziroğlu N. (2004), “Solar-hydrogen Energy System for Saudi Arabia”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 29:1181-1190.
- Apolinario, F. R., Camargo, J. C., Da Silva, E. P., Ferreira, P. F. P., Marin Neto, A. J. Ve Pinto, C. S. (2003), “Analysis of Hydrogen Production from Combined Photovoltaics, Wind Energy and Secondary Hydroelectricity Supply in Brazil”, *Solar Energy* 78, 670-677.
- Aybers, N.ve Şahin, B., (1995), *Enerji Maliyeti*, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını No:299, İstanbul.
- Bader, M. A., Rehman, S. ve Al-Moallem S. A. (2007), “Cost of Solar Energy Generated Using PV Panels”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1843-1857.
- Beckman, A. W. ve Duffie J. A., (1991), *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley&Sons, New York.
- Benli, T., Eltez, A., Karaosmanoğlu, K. ve Oktik, Ş., “Güneş-Elektrik Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin Anket Değerlendirmeleri”, V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 26-28 Mayıs 2004.
- Berlin Yenilenebilir Enerjiler için Avrupa Konferansı Sonuç Bildirgesi, 19-21 Ocak 2004, Berlin.
- Bilgen, E. (2004), “Domestic Hydrogen Production Using Renewable Energy”, *Solar Energy* 77, 47-55.
- Bubenzer, A. ve Luther, J., *Photovoltaics Guidebook for Decision Makers*, 2002.
- Eke, R., Eltez, M., Oktik, Ş. Ve Tozlu, C., “Güneş Enerjisi ve Muğla Üniversitesi Temiz Enerji Kaynakları Araştırma Geliştirme Merkezi Uygulamaları”, Muğla Üniversitesi Temiz Enerji Kaynakları Araştırma Merkezi, Muğla.
- ETKB, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2006.
- Gekas, V., Tsoutsos, T. ve Marketaki, K. (2003), “Technical and Economical Evaluation of Solar Thermal Power Generation”, *Renewable Energy*, 28:873-886.
- Gönüllü, T. ve Varınca, K., “Türkiye’de Güneş enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yayınlığı Üzerine Bir Araştırma”, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2006.
- Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi Sonuç Bildirgesi, 24-25 Haziran 2005, Mersin.
- Hefner, R., “Toward Sustainable Economic Growth:The Age of Energy Gases”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 20:945-948, 1995.
- Markvaart, T., *Solar Electricity*, 1994.

Nicholetti, G., "The Hydrogen Option for Energy", International Journal of Hydrogen Energy, 20:759-765, 1995.

Okken, P. A., Lako, P. ve Ybema, J. R., "Effective Integration of Hydrogen in energy Systems with CO₂ Contraints", International Journal of Hydrogen Energy, 20:975-985, 1995.

Öztürk, İ. T., "Güneş Enerjisinden Absorbsiyon Teknolojisi Yardımı İle Güç Üretimi", Mühendis ve Makina, Cilt:47 Sayı:563.

Prisyazhniuk, V. A., "Alternative trends in development of thermal power plants", Applied Thermal Engineering, 2006.

Prisyazhniuk, V. A., "Strategies for emission reduction from thermal power plants", Journal of Enviromental Management, 2005.

Toprak K., Rüzgar Enerji Santralleri Yardımıyla Hidrojen Eldesinin Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.

Viessmann Isı Teknikleri A.Ş.

World Resource, 1992-1993.

Yumurtaci, Z., ve Bilgen, E., (2004), "Hydrogen Production From Excess Power in Small Hydroelectric Installations", International Journal of Hydrogen Energy 29, 687-693, 2004.

www.enisolar.com

www.eie.gov.tr

http://maps.grida.no/go/graphic/world_coal_consumption

http://maps.grida.no/go/graphic/world_oil_consumption

<http://www.koeri.boun.edu.tr/meteoroloji/enerji1.htm>

http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics#PV_power_stations

www.daviddarling.info/encyclopedia/E/AE_evacuated_tube_collector.html

www.geodynamics.com.au/irm/ShowStaticCategory.aspx

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	15.08.1979	
Doğum yeri	Diyarbakır	
Lise	1990-1997	Cağaloğlu Anadolu Lisesi
Lisans	1997-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2003-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makinaları Programı
Çalıştığı Kurumlar		
	2001-2004	AVEA
	2006-	BEKO Elektronik A.Ş.