



tmmob
makina mühendisleri odası

II. GAP ve SANAYİ

KONGRESİ

BİLDİRİLER KİTABI

Aralık 2001 / Ankara

Yayın No.....E/2001/284

tmmob
makina mühendisleri odası

Sümer Sok. 36/1-A
06440 Demirtepe / ANKARA
Tel: (0312) 231 31 59 Faks: (0312) 231 31 65
e-posta: mmo@mmo.org.tr
<http://www.mmo.org.tr>

Yayın No: E/2001/284

ISBN: 975-395-509-X

Bu yapıtın yayın hakkı Makina Mühendisleri Odası'na aittir. Kitabın hiçbir bölümü değiştirilemez. MMO'nun izni olmadan kitabın hiçbir bölümü elektronik, mekanik vb. yollarla kopya edilip kullanılamaz. Kaynak gösterilmek kaydı ile alıntı yapılabilir.

Aralık 2001 / Ankara

Baskı: Özkan Matbaacılık (312) 229 59 74

TMMOB Makina Mühendisleri Odası
II. GAP ve Sanayi Kongresi
29-30 Eylül 2001 Diyarbakır

JEOTERMAL KAYNAKLARDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ

Hakan F. ÖZTOP¹, Aydın ÇITLAK²

¹Fırat Üniversitesi Müh. Fak. Makina Müh. Böl., 23119, ELAZIĞ

Tel: 0 424 2370000 hfoztop@firat.edu.tr

²Fırat Üniversitesi Müh. Fak. Makina Müh. Böl., 23119, ELAZIĞ

Tel: 0 424 2370000 aydcitlak@hotmail.com

ÖZET

Enerji tüketiminin hızla arttığı günümüz dünyasında tüketimi çeşitli kaynaklardan karşılamak amacıyla çalışmalar devam etmektedir. Jeotermal enerji de özellikle elektrik enerjisi üretiminde alternatif enerji kaynaklarından biridir. Bu çalışmada, jeotermal enerjiden faydalanılarak elektrik enerjisi üretimi üzerinde durulmuş, jeotermal potansiyel ele alınarak, jeotermal kaynaklardan elektrik enerjisinin elde edilmesi incelenmiştir.

1. GİRİŞ

Son yıllarda enerji tüketiminin hızla artması, kaynakların hızla tükenmesi, çalışmaları, tüketimi karşılayacak yeni kaynakların araştırılmasına yöneltmiştir. Hidroelektrik ve termik santrallerle elektrik üretimi yanında, rüzgar, güneş ve jeotermal enerji gibi alternatif enerji kaynaklarına dayalı elektrik enerjisi üretimi üzerinde çalışmalar hızla devam etmektedir.

Jeotermal enerji yerin altında bulunan ısı enerjisi olup, başta konut ısınması olmak üzere, iklimlendirme, kurutma, soğuk depolama, seraların ısınması gibi birçok amaca yönelik olarak kullanılmaktadır.

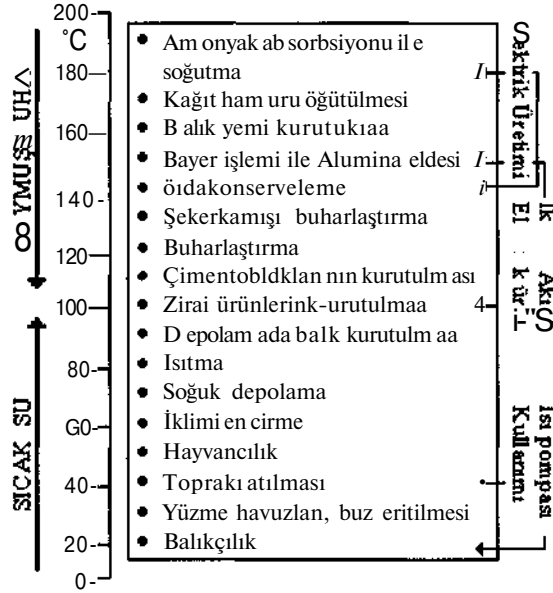
Jeotermal enerji uygulamalarında ısıtma yanında büyük bir öneme sahip elektrik enerjisi üretimi dünyada ve Türkiye 'de uygulanan bir metottur. Jeotermal enerji kaynaklarından elektrik üretimi ile ilgili olarak literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur [7,9,11]. Bu çalışmalarda, elektrik üretimi ve mevcut santral tiplerinin termodinamiği üzerinde durulmuş, bazı maliyet hesapları çıkarılmış, ancak, mevcut jeotermal potansiyelle bir karşılaştırma yapılmamıştır.

Bu çalışmada, Türkiye şartları için elektrik üretim potansiyeli ve mevcut durum değerlendirmesi sunulmuştur.

2. JEOTERMAL KAYNAKLARDAN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ

Jeotermal biriktiricilerde bulunan ısı enerjisini hazne, kayanın katı katmanlarından iletim (kondüksiyon) yoluyla, gözeneklerinden ise taşınım (konveksiyon) yoluyla alır. Ayrıca magmadan gelen sıcak gazların jeotermal akışkana karışarak kanşım yoluyla ısı verdikleri varsayılmaktadır.

Şekil 1 'de jeotermal enerjinin kullanım alanları ve çalışma sıcaklıkları detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 1. Lindal Diyagramı

Jeotermal akışkan biriktirici içinde akışkanın basınç ve sıcaklığına bağlı olarak üç durumda bulunabilir,

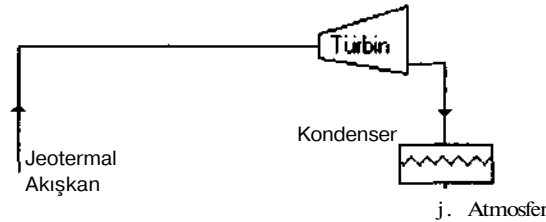
- Yüksek basınç altında sıkıştırılmış su veya aşırı soğutulmuş su durumunda,
- Islak buhar (doymuş buhar - doymuş su) durumunda,
- Kızgın buhar durumunda,

Çıkarılan bu jeotermal akışkanın durumuna bağlı olarak elektrik üretmek için farklı çevrimler kullanılır. Jeotermal santralde çevrim, termodinamikteki tanımıyla bilinen çevrimden biraz daha farklı olarak, çeşitli hal değişimlerinden geçtikten sonra tekrar ilk hale dönmeyip, ya atmosfere atılır ya da yer altına enjekte edilir. Bu çevrimler kondensersiz ve kondenserli kuru buhar çevrimleri, tek ve çift püskürtmeli çevrimler şeklinde sınıflandırılabilir. Kondensersiz çevrimler en basit santraller olup, maliyetleri düşüktür. Bu santrallerde türbini terk eden buhar atmosfere verilir. Bu durum çevre kirliliğine yol açacağı için bir dezavantaj olarak karşımıza çıkar. Ancak, bu santrallerin en önemli avantajı yapım ve işletme masraflarının düşük olmasıdır (Şekil 2) [7]. Bunun aksine kondenserli çevrimlerde türbini terk eden buhar sıvılaştığından çevre kirliliği daha az olacaktır. Ayrıca, buhar türbini çıkışında kondensere dolayısıyla vakum oluşacağı için buharın ısı enerjisinin daha büyük bir oranı güce çevrilmiş olur. Bu nedenle kondenserli kuru buhar çevrimleri, kondensersiz olanlardan benzer şartlar altında daha çok elektrik üretirler. Her iki santralinde ortak noktası doymuş veya kızgın

jeotermal buhar bulunan bölgelerde kullanılabilir olmasıdır. Kondenserli santrallerde genellikle direkt temaslı kondenserler kullanılır (Şekil 3). Bunun temel sebebi, jeotermal sıvının içinde bulunan yoğunlaştırılmayan gazlar sebebiyle basıncın çok düşürülememesi ve atmosferik basınçlarda direkt temaslı kondenserlerin iyi verim vermesi ve maliyetlerinin de düşük olmasıdır. Eğer yoğunlaşmayan gazların sürekli olarak ayrıştırılması başarılabilirse, gövde boru tipi kondenserlerde kullanılabilir.



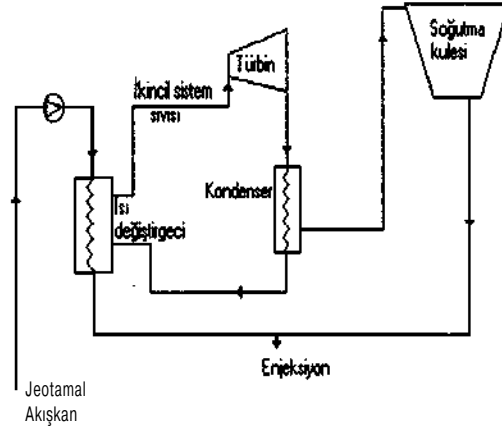
Şekil 2. Kondensersiz Tip Santral



Şekil 3. Kondenserli Jeotermal Santral

2.1. İkinci Bir Termodinamik Çevrim Akışkanı Kullanan Santraller

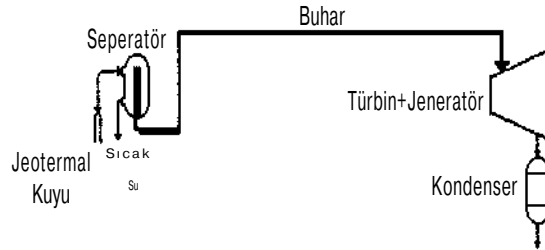
Bu tip santrallere binary tipi santraller de denir. Jeotermal akışkan ikinci bir çalışma sıvısına ısı geçişinin bir ısı değiştiricide sağlanması ve onunda türbinde genişleyip kondenserde yoğunlaşarak, atık ısının soğutma kulesinden dışarı atılmasını sağlayan sistemlerdir [10]. İkincil akışkan, kaynama sıcaklığı suyun kaynama sıcaklığından çok daha düşük olan bir akışkandır [7]. İkincil akışkan olarak, freonlar veya hidrokarbonlar (izobütan, izopentan, fluorokarbon) kullanılabilir [9]. İkincil akışkanın tamamladığı çevrim Rankine çevrimidir ve akışkanın bu santraldeki fonksiyonu çevrime ısı kaynak oluşturmaktır (Şekil 4). Binary santrallerinin kullanılabilirlik verimi faz dönüşümü santrallerine göre oldukça yüksektir. İkincil sıvılar sistemde yüksek basınçlar altında bulunduğu için türbinler su buharı türbinlerine göre daha küçüktür. Faz dönüşüm santrallerine göre yüksek basınçta çalışma, hava sızması problemlerinin olması, çalışma sıvısının korozif olmaması, türbin genişlemesinin tamamen kuru bölgede gerçekleşmesi, böylece toplam türbin ömrünün uzun olması gibi avantajlarının yanı sıra, ikincil sıvı maliyetinin yüksekliği, ısı değiştirgeçlerinin pahalı oluşu, hidrokarbonun yanıcı olma riski taşıması gibi dezavantajları da vardır.



Şekil 4. İkinci Bir Termodinamik Çevrim Sıvısı Kullanan Santraller (binary tipi)

2.2. Tek Püskürtmeli (Buharlaştırmak) Sistemler

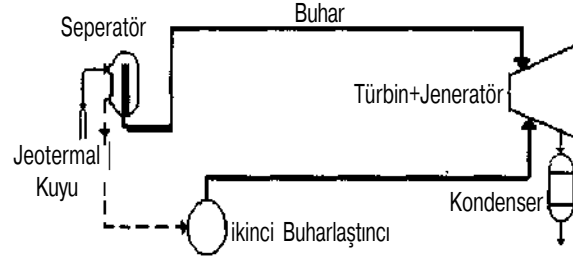
Yer altından çıkan jeotermal akışkan genellikle doymuş sıvı-buhar karışımıdır [7]. Jeotermal akışkandaki mevcut düşük su miktarı fazladır [11]. Kuyu dışına yerleştirilen bir seperatör yardımıyla akışkan ayrıştırılır ve buhar, türbine elektrik üretmek için gönderilir (Şekil 5). Kalan sıvı ise yer altına enjekte edilir. Yine, türbinden çıkan buhar bir soğutma kulesinde veya püskürtme havuzunda elde edilmiş soğutma suyu ile yoğuşturulur ve yer altına enjekte edilir. Bu tip santrallere örnek olarak, ABD 'deki East Republic santrali verilebilir.



Şekil 5. Tek Buharlaştırmak Çevrim

2.3. Çift Püskürtmeli (Buharlaştırmalı) Sistemler

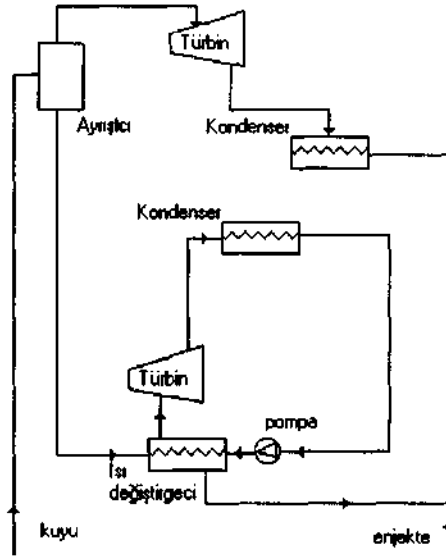
Çift püskürtmeli sistemler genellikle yüksek basınç altında ıslak buhar üreten sahalar için uygulanmaktadır [11]. Yer altından çıkan jeotermal akışkan sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda ikinci bir buharlaştırma işlemi yapılır (Şekil 6). İlk püskürtmeden sonra elde edilen buhar türbine gönderildikten sonra kalan sıvının basıncı veya sıcaklığı hala yüksek ise, bu sıvı ikinci bir püskürtme havuzuna tekrar püskürtülür [7]. Sıvının belli bir yüzdesi buharlaşır ve bu buhar türbine gönderilir. Bu tip santrallere örnek olarak, ABD 'deki East Republic santralinin ikinci etap kısmı verilebilir.



Şekil 6. Çift buharlaştırma çevrim

2.4. Birleşik Püskürtmeli (Buharlaştırma) ve İkinci Bir Termodinamik Çevrim Sıvısı Kullanan Santraller

Bu çevrimde hem buharlaştırma hem de ikincil çevrimlerin avantajlarından aynı anda yararlanılmaya çalışılır. Yüksek sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar için uygundur ve bu özelliği ile çift püskürtmeli çevrimlere bir alternatif oluşturur. Jeotermal akışkan püskürtme havuzunda püskürtüldükten sonra elde edilen buhar bir buhar türbininden geçer ve elektrik elde edilir. Kondenserde yoğuşturulan jeotermal akışkan tekrar yer altına enjekte edilir. Püskürtme havuzundan çıkan jeotermal sıvı ikincil çevrimin ısı değiştiricisinden geçerek ısıl enerjisini ikincil akışkana transfer eder ve yer altına enjekte edilir (Şekil 7). İkincil akışkan ikincil çevrimi türbinden geçerek elektrik elde edilerek ikincil çevrim tamamlanır [7].

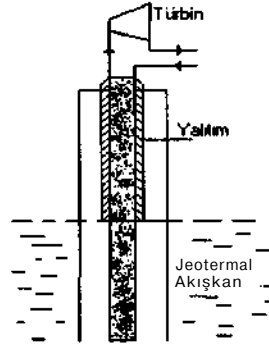


Şekil 7. Birleşik Püskürtmeli (Buharlaştırma) ve İkinci Bir Termodinamik Çevrim Kullanan Santral

2.5. Isı Borulu Sistem

Bu tip sistemlerde kuyu içerisinde kuyu boyunca yerçekimi takviyeli ısı borusu daldırılmaktadır. Borunun jeotermal akışkanla temasta olmayan kısmı yalıtılmıştır. Boru içinde kuyu sıcaklığına uygun bir çalışma maddesi vardır. Bu tip sistemlerde pompa gerekli değildir. Evaporatörde oluşan saf buhar

türbinde iş gördükten sonra kondensere geçmekte, böylece hem elektrik hem de ısı üretilmektedir (Şekil 8). Kuyu dibi ve kuyu başının küçük değerleri içinde sistem çalışmaktadır [11].



Şekil 8. Isı Borusu Sistemi İle Jeotermal Enerjiden Elektrik ve Isı Üretimi

2.6. Jeotermal Elektrik Santrallerinin Verimleri ve Maliyeti

Jeotermal santrallerdeki çevrim verimleri klasik termodinamikten bildiğimiz çevrim verimlerinden biraz farklı olarak, kapalı bir çevrim söz konusu olmadığından, $T_i = W_{net}/Q$ tanımı yerine, $r_u = W_{net}/\dot{E}$ kullanım verimi ile tanımlanır. Her iki denklemde de yer alan W_{net} elektrik enerjisi (iş) çıkışıdır. Birinci denklemdeki Q giren ısı, ikinci denklemdeki \dot{E} ise, kullanılabilir enerjidir ve;

$$\dot{E} = m(h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0)$$

şeklinde tanımlanır [9]. Bu eşitlikte, m kütleli debi, h , entalpi, s , entropi, olarak verilmektedir. 1 ve 0 indisleri ise, sisteme giriş ve sistemden çıkış şartlarını temsil etmektedir.

Üretilen net gücün kaynaktaki veya kuyu başındaki jeotermal akışkanın enerjisine oranı olarak tanımlanan buhar çevrimlerinin ısı verimleri % 10 ile % 17 arasında değişir. Aynı şekilde tanımlanan ikincil santrallerin verimleri de % 2.8 ile % 5.5 arasında değişir. Bu verimlerin düşük olmasının nedeni jeotermal akışkan sıcaklığının düşük olmasıdır. Ayrıca, ikincil santrallerin çoğu için soğutma ortamı olarak sadece hava mevcuttur ve bu nedenle kondenser sıcaklığı özellikle yaz aylarında yüksektir. Bu durum da ısı veriminin düşük olmasına neden olur. Alternatif olarak ikincil santraller için üretilen net gücün ikincil akışkana transfer edilen ısıya oran olarak bir dönüşüm verimi tanımlanabilir. Aslında tanımlanan Rankine çevriminin ısı verimidir. Dönüşüm verimi % 6 ile % 12 arasında değişir [7].

Jeotermal enerjinin maliyeti, diğer doğal kaynaklarda olduğu gibi, rezervuann derinliğine, arama risklerinin boyutlarına, jeotermal akışkanın niteliklerine ve kurulacak tesislerin özelliklerine göre değişmektedir. Tüm jeotermal uygulamalarda olduğu gibi, elektrik üretiminde de ilk yatırım maliyeti yüksek, işletme ve bakım masrafları azdır. Bununla birlikte, gerek elektrik enerjisi üretiminde, gerekse elektrik dışı uygulamalarda, maliyet nükleer enerji, kömür, petrol gibi fosil enerji kaynaklarına kıyasla düşüktür [7,11]. Tablo 1'de farklı enerji kaynaklarının elektrik üretim maliyetleri verilmiştir.

Jeotermal uygulamalar bakımından bir karşılaştırma yapılacak olunursa, jeotermal kaynaklardan elektrik üretiminin maliyetinin, jeotermal enerjinin bölge ısınmasına veya soğutmada kullanılmasına nazaran çok daha düşük olduğu görülür [7].

Tablo 1. Farklı Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretim Maliyeti [4].

Enerji Kaynağı	Üretim Maliyeti
Petrol	5 cent
Hidroelektrik	3-9 cent
Jeotermal	3-12 cent
Rüzgar	11 cent
Biokütle	11 cent
Güneş	15 cent

Elektrik enerjisi için toplam maliyetin yaklaşık % 50 'si, jeotermal akışkanın yer altından çıkarılmasına ve tekrar yer altına enjekte edilmesine, % 40 'ı elektrik santralının yapılması ve kalan % 10'nu ise diğer maliyetlere gitmektedir.

3. GENEL ENERJİ TÜKETİMİ İÇERİSİNDE JEOTERMAL ELEKTRİĞİN YERİ

Dünyanın klasik enerji kaynaklarının kısıtlı oluşuna rağmen, nüfus ve sanayileşmedeki artışın bir sonucu olarak enerjiye olan talepte sürekli artmaktadır. Geçmişte büyük teknolojik ve sosyal gelişmelere yol açmış olan fosil enerji kaynaklarının kullanımı halen çevre üzerinde giderek artan zararlara neden olmaktadır. Gün geçtikçe kirlenen dünyamızda bizim en çok farkına varabildiğimiz, her nefes alışta sağlığımızı doğrudan etkileyen ve bizzat yaşadığımız olgu hava kirliliğidir. Dünyadaki atmosfer, okyanuslar, iklim, ekosistemler, gıda kaynakları ve insan sağlığı, küresel fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan hava kirliliğinden olumsuz şekilde etkilenmektedir. Bu zararlı emisyonlar önemli bir sera etkisi yapan karbondioksit gazı; asit yağmuru, çürüme ve solunum hastalıklarına sebep olan sülfür oksit, bitkilere, hayvanlara ve insan sağlığına zarar verici nitelikte, ozon tabakasında incelmeye yol açan nitrojen oksit; ve bitkiler, hayvanlar ve insanlar üzerinde zararlı etkilere yol açan partikülleri içermektedir.

ABD Enerji Bakanlığı 'nın verilerine göre (1998, Jeotermal Stratejileri ve Hedefleri) sera etkisi yaratan CO₂ emisyonunun jeotermal enerjide sifıra yakın olduğu ve diğer fosil ve alternatif enerji kaynaklarında ise çok daha fazla olduğu saptanmıştır. Örneğin bu değer kömürde 900 - 1300 g / kWh, doğal gazda 00 - 1250 g / kWh, Güneş enerjisinde 20 - 250 g / kWh, rüzgar enerjisinde 20 - 50 g / kWh iken bu oran jeotermal enerjide 20 - 35 g / kWh olarak tespit edilmiştir [12].

Bu koşullar altında acilen sürdürülebilir ve çevre açısından temiz enerji kaynaklarının kullanımına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu açıdan jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ulusal öncelik vermektedir. Bunların arasında iki örnek verilebilir:

İzlanda 'daki evlerin ve diğer binaların yaklaşık % 86 'sı jeotermal su ile ısıtılmaktadır. Filipinlerdeki elektriğin % 22 'si jeotermal buhardan elde edilmektedir. Jeotermal enerjinin uzun süreli kullanımının

maliyeti hayli düşüktür. Buna çevreye sağladığı yararlarında ilave edilmesi halinde, jeotermal enerjinin daha artan ölçüde kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir.

Dünya jeotermal kaynaklı elektrik üretim potansiyel kurulu gücü 1977 yılında 502 MW 'ı ABD 'de olmak üzere 1350 MW kadardır. 1986 yılında ise kurulu güç 8228 MW 'a yükselmiştir. Bu alanda dünya liderleri 1919 MW kurulu güçle Çin, 1874 MW ile ABD ve 1443 MW ile İzlanda 'dır. Bu üç ülkeyi Fransa (337 MW), Japonya (318 MW), Yeni Zelanda (264 MW), İtalya (307 MW), Arnavutluk (245 MW), Macaristan (240 MW), Rusya (210 MW) ve Türkiye (140MW) izlemektedir. Toplam 27 ülkede elektrik üreten jeotermal santral bulunmaktadır [6].

1995 yılından günümüze kadar dünya elektrik kurulu gücünde % 17 ve ısıtmada % 87 artış olmuştur. Ayrıca 21 yeni ülke, jeotermal enerjiyi değerlendiren ülkeler arasına katılmıştır. Jeotermal enerji bugüne kadar güvenilirliğini ispatlamış olup, 21. yüzyılda da sürdürülebilir enerji olarak önemini artırmaya devam edecektir. Dünyada 'ki elektrik dışı jeotermal uygulamalar (ısıtma, soğutma v.b.) 17174 MW termal, jeotermal elektrik üretimi ise, 7974 MW elektriğe ulaşmıştır. Jeotermal kaynaklarda yer altı suyunun içinde erimiş halde bulunan bileşiklerin yer altı suyu ile birlikte atılması, çevre sorunları ortaya çıkarır. Bundan kaçınmak için kuyu içi eşanjör sistemi geliştirilmiştir [5].

Tablo 2. Yıllara Göre Genel Enerji Tüketimi [2].

	1990	1995	1996	1997	1998
Taş Kömürü (Bin T)	8.191	8.548	10.892	12.53	13.146
Linyit (Bin Ton)	45.891	52.405	54.961	59.47	64.504
Asfaltit (Bin Ton)	287	66	34	29	23
Petrol (Bin Ton)	22.700	27.918	29.604	29.17	29.022
Doğal gaz (mil m ³)	3.418	6.937	8.114	10.07	10.648
Hidrolik (GWh)	23.148	35.541	40.475	39.81	42.229
Jeoter. Elkt (Gwh)	80	86	84	83	153
Jeoter. ısı (Bin TEP)	16	64	90	108	85
Güneş (Bin TEP)	21	52	80	80	100
Odun (Bin ton)	17.870	18.374	18.374	18.37	18.374
Hay. Bit. Art B. ton)	8.030	6.765	6.666	6.575	6.739
Net Elkt. İth.(Gwh)	-731	-696	-73	2.221	3.000
İkincil Köm. İth. (Bin ton)	453	1.024	2.281	2.519	1.833
Toplam (Bin TEP)	52.632	63.215	69.402	73.25	74.249
Artış (%)	-	3.7	9.8	5.6	1.4
Kişi baş.tük (kgpet)	938	1.043	1.128	1.172	1.170

Tablo 2'de Türkiye 'de 1990-1998 yılları arası enerji tüketim bilançosu verilmiştir. Tabloya bakıldığında 1997 yılına kadar jeotermal elektrik enerjisi tüketiminde büyük değişiklikler olmamakta, 1998 yılında bu rakam yaklaşık 2 katına çıkmaktadır. Tablo 3'de Dünya jeotermal enerjiden elektrik enerjisi üretimi verilmiştir.

Tablo 3. Dünya Jeotermal Enerjiden Elektrik Enerjisi Üretimi

ÜLKE	Elektrik Üretim (Mwe)
	1997
ABD	2580
Filipinler	1780
Meksika	743
İtalya	742
Japonya	530
Y. Zelanda	364
Endonezya	528
El Salvador	105
Kenya	45
İzlanda	51
Nikaragua	70
Türkiye	20.4
Çin	32
Kosta Rika	65
Rusya	11
Azor Adası	8
Guadalupe	4.2

4. JEOTERMAL KAYNAKLAR VE TÜRKİYE POTANSİYELİ

Türkiye 'de kesin tespit edilmiş jeotermal enerji potansiyeli 2490 MW termiktir (Mertoğlu, 1999). Bunun yanında elektrik üretiminde kullanılacak tahmini potansiyel ise, 4500 MW elektrik enerjisidir [8]. Teorik değerler ise, bu değer çok üzerindedir. (Yaklaşık 31500 MW). Bu değer ise yaklaşık 3800 ton / h fuel-oil 'in yakılmasından elde edilecek enerjiye eş değerdir. Bu değer doğal gaz karşılığı ise, 30 milyar m³ 'tür. Ana hedef; Türkiye 'deki konutların % 30 'unu jeotermal enerji ile ısıtmaktır. Türkiye bu potansiyel ile Dünya 'da ilk 10 ülke arasında yer almaktadır.

Türkiye 'deki jeotermal kaynakların başlıca kullanım alanı konut ısınması ve kaplıcalarıdır. Ülkemizin 2000 yılındaki jeotermal kurulu ısıtma gücü 493 MW 'a ulaşmıştır. Bundan başka 327 MW termal tedavi için kullanımdır. 194 adet kaplıca bulunmaktadır. Böylelikle Türkiye 820 MW elektrik dışı jeotermal enerji uygulaması ile dünyanın 5. büyük ülkesi konumuna gelmiştir. 2010 yılında ise, Türkiye ısıtmada ilk 3'e girmeyi hedeflemiştir. Ayrıca Türkiye 'de 52000 konut eşdeğeri jeotermal ısıtma yapılmaktadır. Üretim halinde 381 adet kuyu bulunmaktadır. Jeotermal elektrik üretimi uygulaması ise Denizli-Kızıldere 'de 1968 yılında kurulmuş olan ülkemizin ilk ve tek jeotermal elektrik santrali ile yapılmaktadır. Bu santral 20 MW elektrik kurulu güce sahiptir. Dünya 'da jeotermal kaynaklardan elektrik üretimi 22 ülkede yapılmaktadır. Jeotermal akışkanda ergimiş halde bulunan (% 1,5) CO₂ gazının sanayinin ihtiyacını karşılamak amacı ile özel sektör tarafından 40,000 ton/yıl kapasiteli sıvı CO₂ üretim, dağıtım, tesis ve sistemi 1986 yılından beri işletilmektedir ve halen dünyadaki tek uygulamadır.

Ayrıca Germencik (Aydın) sahasında 1982 yılında yapılan çalışmalarda 200-232 °C sıcaklıkta 9 kuyu tespit edilmiştir. Sahada elektrik üretimi ile ilgili fizibilite çalışmaları devam etmektedir. Yaklaşık 125 MW elektrik güç kapasiteli olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında Çanakkale Tuzla(173 °C), Salavatlı Aydın (171 °C), Simav-Kütahya (162 °C) jeotermal sahaları tespit edilmiş ve önümüzdeki 20 yılda jeotermal elektrik üretimi düzeyinin 500 MW seviyesine geleceği tahmin edilmektedir. Ülkemiz jeotermal potansiyelinin bölgelere göre dağılımı Tablo 4'de verilmiştir [10].

Tablo 4. Ülkemiz Enerji Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı

Bölgeler	Enerji Potansiyeli, MWt
Marmara	133.6
Kuzey Anadolu	20.11
Ege	697.27
İç Anadolu	159.2
Doğu Anadolu	26.6
Güneydoğu Anadolu	1.95
Akdeniz	7.0
Toplam	1045.79

Türkiye 'nin doğal gaz yaptığı yatırımlar jeotermal enerjiye yapıldığı takdirde ülkemizin % 30 'u 1/4-1/7 daha ucuz maliyetli doğal ve çevre dostu özkaynağımız olan jeotermal enerji ile ısıtılmış olacaktır. Türkiye 'de jeotermal enerji ile önümüzdeki 10 yıl içerisinde ısıtılacak potansiyel yerleşim birimleri toplamı yaklaşık 825.000 konuttur. Bu ise, yılda yaklaşık 1 milyon dolar Fuel oil tasarrufu sağlarken bunun yanında yaklaşık 2.5 milyon otomobilin ürettiği CO₂ eşdeğeri kadar CO₂ miktarında azalmaya neden olur.

2.1. Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi Jeotermal Enerji Kaynakları

Doğu ve güneydoğu Anadolu bölgesinin tüm sahalarında jeotermal potansiyel illere ve buldukları yörelere göre verilmiştir (Tablo 5). Bu yörelerden sadece, Diyarbakır, Erzurum Ilıca, Erzurum Pasinler, Urfa ve Van Erciş Zilan yörelerinde kuyular açılmıştır. Van Erciş Zilan bölgesindeki jeotermal kaynak Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgesinde bulunan en sıcak kaynak olarak tespit edilmiştir. Tabloda verilen değerler Şekil 1 'de verilen Lindal diyagramı ile karşılaştırıldığında kaynakların jeotermal enerji kaynaklı elektrik enerjisi üretimine uygun olmadığı görülmektedir.

Tablo 5. Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi Jeotermal Potansiyeli

Jeotermal Saha	Derinlik (m)	Sıcaklık (°C)	Debi (m ³ /h)
Ağrı Diyadin Köprüçermik	—	71	—
Bingöl Kös	—	47	—
Bingöl Hacıköy	—	62	—
Bingöl Harur	---	52	---
Bingöl Hozavit	—	48	---
Bitlis Nemrut	—	66	—
Bitlis İhcaköy	---	44	---
Diyarbakır Çermik	116	51	21
Elazığ Kolan	—	42	---
Erzurum Ilıca	604	39	6
Erzurum Pasinler	200-205	40-42	75-110
Erzurum Kığıhazman	—	56	—
Erzurum Meman	—	45	—
Mardin Germiab	---	61	---
Siirt Hista	—	67	—
Siirt Billuris	---	38	---
Urfa Yardımcı-Karaali	138-198	41,5-49	120
Van Erciş-Zilan	394-1172	80-105	40
Van Zereni	—	55	—

5. SONUÇLAR

Jeotermal enerji, öz kaynağımız olan ve sürdürülebilir, temiz, çevre dostu, hazır, üretimi kolay, fosil yakıtlara ve diğer alternatif enerji kaynaklarına göre daha ucuz, dünya çapında yaygın, elektrik üretimi için ideal (bilhassa kırsal kesimde avantajlı), hacim ısıtma, soğutma, tarım, endüstriyel kullanım ve daha bir çok değerlendirme alanı olan ve bölgesel olarak geliştirilmeye müsait bir enerjidir. Tüm alternatif enerji kaynaklarında olduğu gibi jeotermal enerji kaynakları da detaylı olarak araştırılıp, özellikle elektrik enerjisine uygun alanlarda, ilk yatırım maliyetinden kaçınmayıp, en son teknolojiyi kullanarak santraller kurulmalıdır. Santral tiplerinin incelenmesi bölümünde de verildiği gibi, jeotermal santrallerde basınç artıran elemanlar kullanılmalıdır. Jeotermal elektrik santrali kurma maliyetinin diğer kaynaklara göre düşük olduğu dikkate alınarak, akışkan sıcaklığı 150 °C 'nin üzerindeki kaynaklar değerlendirilerek çevrim santralleri inşa edilebilir. Sonuç olarak, jeotermal enerjinin, toplumun sürdürülebilir ihtiyaçlarının karşılanmasında gerek temiz bir enerji oluşu gerekse güvenilir bir kaynak olması bakımından önemi büyüktür. Ayrıca, dünya çapında hemen her ülkede az veya çok ve farklı uygulama alanları ile karşımıza çıkabilen jeotermal enerjinin yine de büyük bir kısmının kullanımı için gerekli yatırımlar yapılmamıştır. Jeotermal enerji kaynaklarının özellikle ilk yatırım maliyetlerini azaltmada ve işletme sırasında verimi artırmada gerekli araştırma geliştirme çalışmalarına devam edilmelidir.

6. KAYNAKÇA

1. O. Mertoğlu, Türkiye 'deki Jeotermal Enerji Uygulamalarının Çok Yönlü Önemi ve Dünyadaki yeri, Mühendis ve Makina dergisi, Cilt 41, sayı: 485, sayfa: 27-31.
2. E. Koç, Türkiye 'de Genel ve Nihai Enerji Durumu, Termodinamik dergisi, sayı:99, sayfa: 70-78, 2000.
3. O. Mertoğlu, Methods and Techniques of Electrical Energy Production from Geothermal Fluids, Symposium on Geothermal Energy, Ankara, 1977.
4. F. Kaymakçı, Jeotermal Potansiyel Yakın Geleceğin Enerjisi, Geleceğin Kliması, Jeotermal Klimalar, Termodinamik dergisi, sayı: 99, sayfa: 50, 2000.,
5. H.M. Söhmen, Y. Erdallı, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretiminde Kullanılması, TMMOB, Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı: 22, sayfa: 31-34, 1995.
6. M. Doğan, E.B. Denkbaş, Enerji kaynakları-Çevre sorunları ve çevre dostu-Alternatif Enerji Kaynakları, Standard dergisi, Sayı: 468, sayfa: 28-36, 2000.
7. M. Kanoğlu, Jeotermal Elektrik Üretiminde Kullanılan Termodinamik Çevrimler, Mühendis ve Makina, sayı: 493,2001.
8. Y. Saatçi, Teiniz ve Yenilenebilir Enerji Potansiyelimiz, Standard dergisi, sayı: 469, sayfa: 28-34, 2001.
9. T. Çoban, Jeotermal Enerji Santralleri, 2000'li yıllarda Jeotermal Enerji Yaz Okulu, 1999.
10. U. Serpen, Jeotermal Enerji, Petrol Mühendisleri Odası Yayını, 2000.
11. M. Acar, Ü. Yiğit, Jeotermal Enerji Santralleri ve Ekonomik Durumu, Jeotermal Enerji Sempozyumu '94 Bildiri Özetleri, P.Ü.,Denizli.
12. Dünya Jeotermal Kongresi WGC 2000 Deklarasyonu, Yeşil Enerji Jeotermal, Türkiye Jeotermal Derneği Bülteni, sayı: 2, 2000.

TMMOB Makina Mühendisleri Odası
II. GAP ve Sanayi Kongresi
29-30 Eylül 2001 Diyarbakır

FOTOVOLTAİK DESTEKLİ SU POMPASI UYGULAMASININ DİNAMİK ANALİZİ

Z Abidin FIRATOĞLU

Bülent YEŞİLATA

Tel:0414 3128456 (2350)
e-mail:byesilata@harran.edu.tr

Tel: 0414 3128456 (2355)
e-mail: firatoglu@harran.edu.tr

Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Bu çalışmada; seçilen bir fotovoltaik destekli su pompası uygulamasının iklimsel verilere bağlı olarak gün ve yıl boyunca performansında görülen dinamik değişim simülasyonlar yardımıyla araştırılmaktadır. Sistem olarak PVDSP uygulamaların direkt akupleli kombinasyonu seçilmiştir. Temel amaç PVDSP uygulamalarının anlık ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığı gibi iklimsel değişkenlere karşı sistem komponentlerinin dolayısıyla sistemin dinamik tepkisinin saptayarak PVDSP uygulamaları ile iklimsel değişkenler arasındaki var olan dinamik ilişkiyi tespit etmektir. Elde sonuçlar iklimsel değişkenlerdeki dinamiksel değişimin gün ve yıl boyunca sistem performansı üzerinde ihmal edilemeyecek düzeylerde bir etkisi olduğu ve bu etkininde tamamen sistemin komponentlerine bağlı spesifik bir durum olduğu saptanmıştır.

GİRİŞ

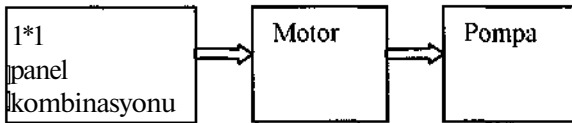
Güneş radyasyonunun yeryüzüne geliş açısı yıl boyunca sabit olmasına rağmen, dünyanın gün boyunca saat açısı ve yıl boyunca da deklinasyon açısının zamana bağlı değişmesine paralel olarak, güneş radyasyonunun yeryüzüyle yaptığı açı da dinamik bir değişme görülür. Yeryüzünün fiziksel yapısından dolayı görülen bu dinamik değişme yalnızca deklinasyon ve saat açısına değil aynı zamanda yörenin enlemine bağlı olarak da değişiklik göstermektedir. Gün ve yıl boyunca güneş ışınımında görülen dinamik süreç yalnızca ışınım şiddetinde değil aynı zamanda buna bağlı olarak çevre sıcaklığı gibi tüm iklimsel verilerde bir değişim görülmesine sebep olur. Bu dinamik süreçler literatürde uzun zaman iklimsel verilerin ortalaması dikkate alınarak çeşitli matematiksel modellerle ifade edilmiştir.

Işınım şiddetine bağlı olarak iklimsel verilerde görülen değişim ivmesi dolayısıyla tüm güneş enerjisi uygulamalarının performansında gün ve yıl boyunca dinamik bir süreç yaşanması söz konusudur.

Güneş uygulamalarının performansın da görülen bu değişkenlik ivmesi optimizasyon ve dizayn açısından ısı uygulamalarda o kadar önemli olmasa da fotovoltaik uygulamalarda iklimsel verilerdeki değişikliklerin etkisinin varsayılmayacak kadar küçük bir anda sisteme yansımından dolayı bu sistemlerde dizayn ve optimizasyonunda son derece önemli bir noktadır.

Güneş ışınlarının direkt olarak elektriksel güce dönüştürülebildiği teknolojiye verilen isim olan fotovoltaik (PV) sistemlerin kullanımı özellikle son çeyrek asırda önemli derecede artmıştır. Bu artışta en etkili faktör bu tür sistemlerin çalışma prensibini oluşturan yarı-iletken malzemelerin üretim teknolojisinde son yıllarda ulaşılan gelişmelerdir. Bu gelişmeler doğrultusunda günümüzde PV sistemler uzun yıllar öncesine kıyasla daha düşük maliyet ve çok daha yüksek verimle çalışabilmektedir [1,2]. Örneğin, ilk kullanılan PV sistemlerde yüzey üzerine ulaşan güneş ışınımı %1-%2 mertebesinde bir verim ile elektrik enerjisine dönüştürülürken günümüzde bu oran %17 seviyesine varabilmektedir. PV hücrelerinin maliyeti 1974 yılında yaklaşık 200 \$/Watt iken 2000' li yıllarda bu değer 2 \$/Watt seviyelerine gerilemiştir . Benzer şekilde önceleri sadece küçük pil hücrelerinin birleşmesi sonucu oluşturulan modüller bugün süper teknoloji ile tek parça olarak üretilebilmekte ve yaklaşık otuz yıl bakım gerektirmeksizin kullanılabilir. Uzun ömürlü paneller vasıtasıyla kullanım yılı başına düşen maliyet, düşük seviyelerde kalabilmektedir [3,4]. PV sistemlerin yaygınlaşmasına engel teşkil eden bu dezavantajların çözümünde ulaşılan nokta henüz yeterli olmamakla birlikte, sistem sahip olduğu önemli avantajlar nedeniyle özellikle fotovoltaik destekli su pompaları (PVDSP) gibi bazı spesifik uygulamalar için bugün en iyi enerji alternatifi olarak gündemdedir[5,6].

Bu çalışmada da seçilen bir PVDSP kombinasyonu üzerinde uygulanan bilgisayar simülasyonlar vasıtasıyla gün ve yıl boyunca ışınım şiddetinin ve çevre sıcaklığının anlık değişimine karşı sistemin gösterdiği dinamik süreç araştırılmaktadır. Simülasyonlar için bölgesel referans yüzeyi olarak Şanlıurfa'nın iklimsel koşulları seçildi. Sistem olarak, ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığı gibi iklimsel verilerdeki anlık değişimin sistem performansı üzerindeki etkisinin direkt olarak gözlemleyebilmek [7] amacıyla PVDSP sistemlerin direkt akupleli kombinasyonu seçilmiştir. Seçilen kombinasyonun temel elemanlarını gösteren şematik akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Seçilen Sistemin Temel Elemanlarını Gösteren Akış Şeması

Seçilen sistem kombinasyonunda panel olarak ASE-50- ATF/17 tipi panel kullanılıp panelin yataya Şanlıurfa için aylık ortalama optimum eğim açılarında [8] yerleştirildiği varsayılmıştır . Sürücü (Motor) olarak da sürekli mıknatıslanmak GNM 2145 tipi de motor seçilmiş olup sistemin 5 mSS statik bir)iike manız kalacak şekilde dizayn edildiği kabul edilmiştir.

Yapılan araştırmalar sonucunda PVDSP sistemlerinin gün boyunca özellikle sistem performansında ve sistem çıktısında ihmal edilemeyecek derecede bir dinamik değişim söz konusudur. Söz konusu olan bu değişimin tamamen sistemin kendine özgü karakteristiklerine bağlı spesifik bir durum olması

dolayısıyla özellikle herhangi bir seçim yapılırken bölgenin iklimsel koşullarının yıl ve gün boyunca gösterdiği değişimlere karşı sistem komponentlerinin göstereceği dinamik tepki göz önünde tutulmalıdır. Aksi halde sistem performansı ve ekonomik açıdan varılabilecek iyileştirmelerin çok altında bir seviye kalacağı sonucuna varılmıştır.

2. GÜN BOYUNCA IŞINIM ŞİDDETİ VE ÇEVRE SICAKLIĞINDAKİ DİNAMİK DEĞİŞİM

Fotovoltaik uygulamalarının performanslarında gün boyunca dinamik bir değişim görülmesindeki temel sebebi panellerin I-V (Akım-Volt) karakteristiklerinin ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığı gibi iki değişkenin birer fonksiyonu olmasıdır. Böylesi bir dinamik değişimin saptana bilmesi için ilk etapta anlık, ışınım ve çevre sıcaklığındaki değişimin tespiti gerekir.

Bu değişkenlerin günlük ortalama aylık değişimleri dikkate alınarak çalışmanın bölgesel açıdan referans yüzeyi olan Şanlıurfa, mevsimsel açıdan Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos birinci referans düzeyi, Mart, Nisan, Eylül, Ekim ikinci referans yüzeyi, Ocak, Şubat, Kasım, Aralık üçüncü referans yüzeyi olmak üzere üç referans yüzeyinde değerlendirildi. Bu üç referans yüzeyindeki optimum eğim açılı panel yüzeyine gelen toplam radyasyon miktarı (I_{Tc} ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{gün}$)), maksimum sıcaklık (T_{max} (K)), minimum sıcaklık (T_{min} (K)) ve güneşlenme süreleri (t_s (h)) verileri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'deki veriler uzun yıllar ortalaması dikkate alınarak saptanmıştır. Tablo 1'deki veriler yardımıyla anlık; ışınım şiddetinde ve çevre sıcaklığındaki değişim literatürde var olan matematiksel modeller vasıtasıyla tespit edilebilir.

Tablo 1. Referans Yüzeylerindeki İklimsel Veriler

Referans Yüzeyleri	1	2	3
I_{Tc} ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{gün}$)	25439.5	18375.2	12318.2
T_{max} (K)	34.95	24.55	13.12
T_{min} (K)	20.12	11.43	3.85
t_s (h)	14.08	12.61	9.91

2.1. Anlık Işınım Şiddetinin Saptanması

Literatürde anlık ışınım şiddetindeki değişim; eksponansal, sinüsaj ve polinomik gibi çeşitli matematiksel modellerle ifade edilmiştir. Bu çalışmada da bu matematiksel modellerin en yaygını olan Liu ve Jordan tarafından öne sürülen aşağıdaki bağıntı yararlanıldı (Bkz:[9]).

$$\frac{I_a}{I_{Tc}} = \left(\frac{\pi}{24} \right) \frac{\cos(15t) - \cos(7.5t_i \cdot \bullet)}{\ln(h_s) - (2nh_s / 360) \cos(h_s)} \quad (1)$$

Denklemden I_a anlık ışınım değişimini t anı göstermektedir. Denklem (1)'deki bağıntı kullanılarak her üç referans yüzeyindeki anlık ışınım şiddetindeki değişim tespit edilip Şekil 2'deki diyagramda gösterilmiştir.

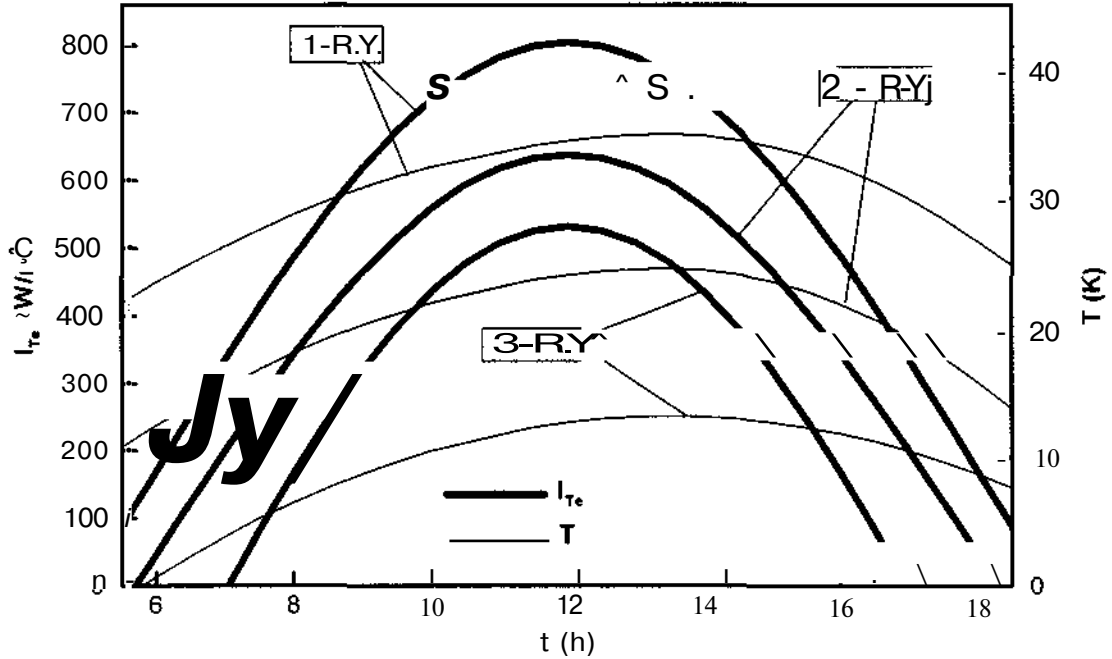
2.2. Anlık Çevre sıcaklığının Saptanması

Gün boyunca çevre sıcaklığında anlık meydana gelen değişim literatürde bir çok denklemle ifade edilmiştir. Bu çalışmada anlık çevre sıcaklığının tespitini de aşağıdaki Tegethoff tarafından önerilen (Bkz:[10]) Denklem (2)'deki parabolik bağıntılardan yararlanıldı.

$$l \wedge l_{max} \rightarrow * l_a - l_{max} \quad U \wedge l \quad l_{max} / \quad (2)$$

$$t \wedge t_{max} \rightarrow \frac{t}{t_{max}} = \frac{t}{t_{max}} - \frac{2Ct}{t_{max}} (t - l_{max})^2$$

Bağıntılardaki a ($1/^\circ\text{C}$) minimum sıcaklığa bağlı birer sabiti ve t_{max} maksimum sıcaklık anını göstermektedir. Bu an yaklaşık 13:50 olarak kabul edilmektedir. Denklem (2)'deki bağıntılar kullanılarak her üç referans yüzeyindeki çevre sıcaklığındaki anlık değişim tespit edilip Şekil 2'deki diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 2. Gün Boyunca Çevre Sıcaklığı ve Işınım Şiddetinin Zamana Bağlı Değişimi

3. SEÇİLEN P-M-P KOMBİNASYONUNUN KARAKTERİSTİKLERİ

Şekil 2'de görüldüğü gibi gün boyunca ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığında dinamik bir değişim söz konusudur. Bu dinamik değişime bağlı olarak PVDSP sistemlerinin çıktı debisinde de gün boyunca bir değişim gözlemlenir. Gün boyunca çıktı debisindeki bu değişim tamamen anlık ışınım şiddetindeki değişime paralel değildir. Çünkü sistem verimi sabit olmayıp her ışınım seviyesindeki çalışma noktasına bağlı spesifik bir değişim göstermektedir. Bunu yanı sıra ışınım şiddetiyle paralelligi söz konusu olan çevre sıcaklığının özellikle çalışmanın seçilen sistem açısından referans yüzeyi olan direkt akupleli sistemlerinin verimleri üzerinde aleyhte bir durumu söz konusudur [11].

Anlaşılacağı üzere PVDSF sistemlerinin gün boyunca performanslarındaki değişim, yalnızca iklimsel verilere bağlı olmayıp seçilen sistemin kendisine özgü karakteristiklerine de bağımlı bir dinamik süreci içermektedir. Bu nedenle herhangi bir dinamik analizde sistem bileşenlerinin karakteristiklerinin tespiti gerekeceğinden seçilen sistemin bileşenlerinin karakteristikleri tespit edildi.

3.1. Panel-Motor Karakteristikleri

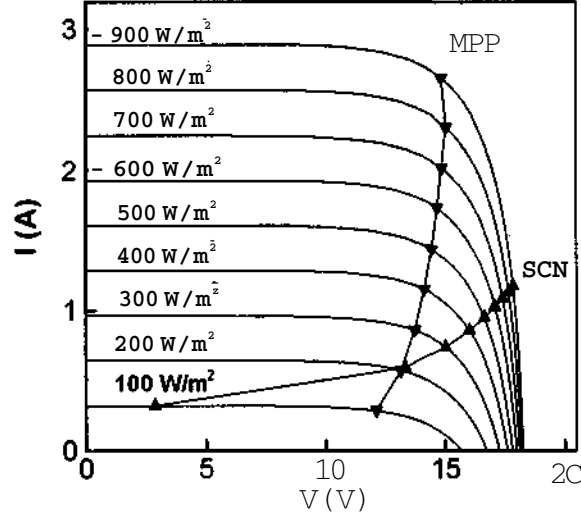
Sürücü (Motor) ve panel karakteristikleri (I-V(Akım-Volt)) arasında bir çok spesifik parametreye bağlı bir ilişkinin bulunması bu karakteristiklerin birbirine bağlı değişimlerini ifade edebilecek genel bir matematiksel modelin türetilmemesi gibi bir olumsuzluğa sebep olmaktadır. Bu nedenle genellikle sürücü I-V karakteristiği deneysel veriler üzerinde yapılan denklem uydurmaları sonucu motora özgü türetilen denklemlerle ifade edilir. Seçilen motor tipinin Tablo 2'de verilmiş deneysel verilerin üzerinde yapılan denklem uydurması sonucu seçilen sürücünün I-V büyüklükleri arasında ilişki aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir.

$$I = 7.179e-4V^3 - 1.769e-2V^2 + 0.153V - 0.00931 \quad (3)$$

Seçilen ASE-50- ATF/17 tipi panelin I-V karakteristikleri Fıratoğlu ve Yeşilata; Tovstend (1989), Eckstein (1990) ve Al-İbrahim tarafından önerilen matematiksel model yardımıyla tespit ettiği [12] karakteristiklerin, Denklem (3)'deki sürücü karakteristik ifade eden eğriyle kesişimleri dolayısıyla çalışma noktaları Newton-Rapson nümerik çözüm yöntemi yardımıyla saptandı. Seçilen sistemin tespit edilen çalışma noktalarının (SCN) panel karakteristikleri üzerindeki konumları ve ayrıca maksimum çalışma noktaları (MPP), nominal çevre sıcaklığı olan 298 K için Şekil 3'deki diyagramda gösterilmiştir. Şekil 3'deki diyagramdan yalnızca ışınım şiddetine bağlı olarak seçilen sistemin 298 K nominal çevre sıcaklığında çalışma noktalarındaki değişim izlenebilir. Bu çevre sıcaklığı açısından statik bir durumdur. Fakat gün boyunca fotovoltaik uygulamaları çevre sıcaklığı seçilen panel-motor ikilisinin panel karakteristikleri üzerindeki çalışma noktaları tespit açısından dinamik değişimin söz konusu olduğundan çevre sıcaklığındaki değişimin seçilen sistemin çalışma noktaları üzerindeki etkisi de bilgisayar simülasyonları yardımıyla araştırıldı. Bu araştırmalar sonucu Şekil 4'deki hazırlanan diyagramdan seçilen sistemin

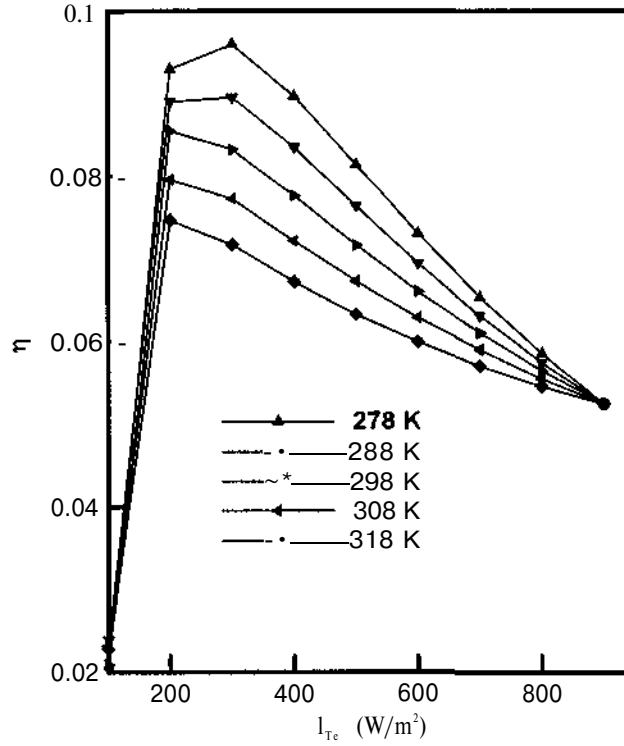
Tablo 2. Seçilen Sürücünün Deneysel Verileri

V (Volt)	I (Amper)
2.96875	0.323
3.82812	0.366
6.01561	0.413
7.89061	0.453
10	0.473
11.95612	0.521



Şekil 3. Seçilen Sistemin Panel Karakteristikleri Üzerindeki Çalışma Noktaları

çevre sıcaklığındaki değişimine bağlı olarak verimde dolayısıyla çalışma noktalarında meydana gelen değişim gözlemlenebilir. Seçilen sistemdeki motorun deneysel dataları üretici firma tarafından hazırlanan kataloglardan temin edilmiştir.



Şekil 4. Seçilen Sistem Veriminin Çevre Sıcaklığına ve Işınım Şiddetine Bağlı Değişimi

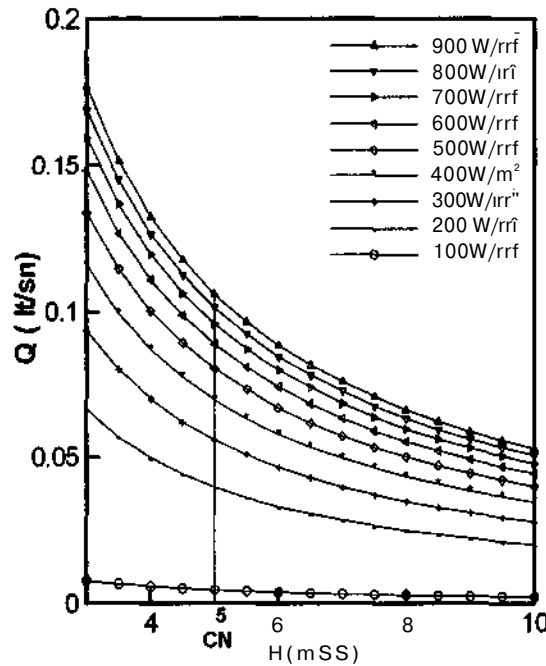
3.2. Pompa Karakteristikleri

PVDS sistemlerinde debi ve pompa yükü arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıdaki gibidir.

$$Q = \frac{I_{py} * \eta_c * \eta_m}{H} \quad (3)$$

Bağıntıdaki H -toplam pompa yükünü, I_{py} -paneller yüzeyine gelen ışınım miktarını, η_c -panellerin panel yüzeyine gelen ışınım seviyesinde sistemin çalışma noktasındaki verimini ve η_m -motor-pompanın mekanik verimini göstermektedir.

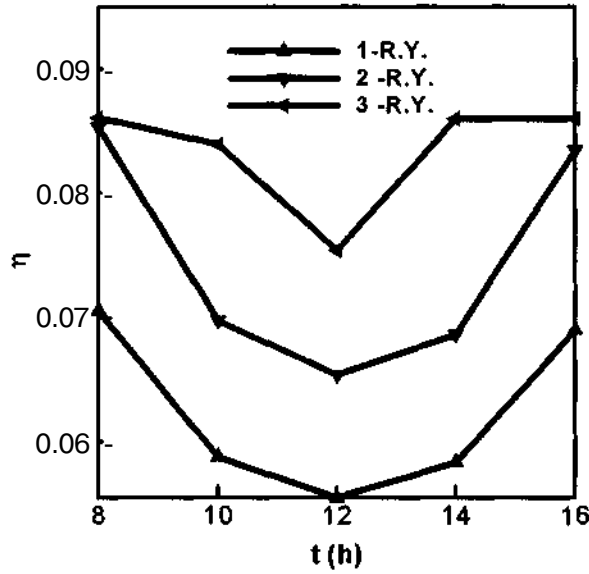
Tipik bir hidrolik sistemde toplam yük statik ve dinamik olmak üzere iki komponent içerir. Statik yük suyun pompalanacağı yükseklik ile su yüzeyi arasındaki dikey uzunluktur. Dinamik yük ise akışkanın sürtünmesinin birer fonksiyonudur. Optimal bir dizaynda tam akış şartlarında dinamik yükün toplam yüke oran % 5-20 arasında değişir. Küçük bir pompa sisteminde statik yük toplam yüke eşit alınabilir (Bkz:[13]). Seçilen sistemde de statik yük dinamik yüke eşit kabul edilerek seçilen sistemin motor-pompa mekanik verimi için ise motor-pompa ikilisi için ortalama değer olarak önerilen 0.25 değeri kullanılmıştır. Sistemin çalışma noktalarındaki verimi de çeşitli simülasyonlar yardımıyla tespit edildi. Denklem (3)'deki parametrelerin saptanmasıyla birlikte seçilen pompanın Q-H karakteristikleri yine simülasyonlar yardımıyla tespit edilerek 298 K nominal çevre sıcaklığı için saptanan karakteristikler ve seçilen sistemin 5 mSS çıkış yükü için bu karakteristikler üzerindeki çalışma noktaları (CN) Şekil 5' deki diyagramda gösterilmiştir.



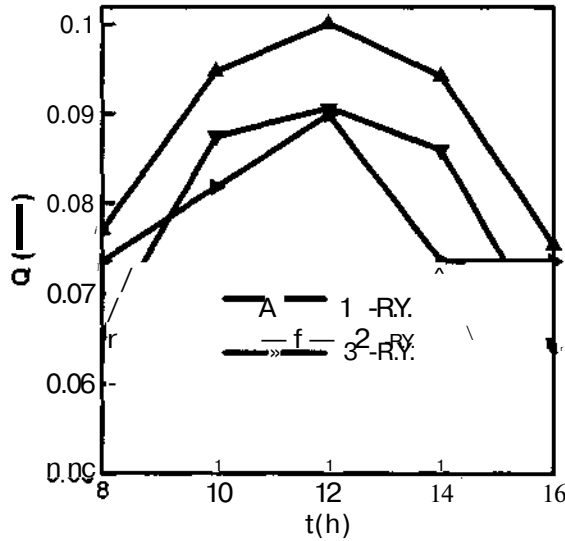
Şekil 5. Seçilen Sistemi Q-H (debi-Yük) Karakteristikleri

4. ANLIK PERFORMANS DEĞİŞİMİNİN SAPTANMASI

Bölgesel referans yüzeyi olan Şanlıurfa'nın mevsimsel olarak değerlendiren üç referans yüzeyinde gün boyunca anlık ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığında yaşanan ve Şekil 2'deki diyagramda gösterilen dinamik sürece karşı, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'deki diyagramlardaki karakteristiklere sahip seçilen sistemin göstereceği tepki bir takım simülasyonlar vasıtasıyla saptandı. Simülasyonlar sonucunda hazırlanan Şekil 6 ve Şekil 7'deki diyagramlardan sırasıyla sistemin veriminde ve 5 mSS pompa çıkış yükünde pompalayabileceği su debisinde gün boyunca görülen dinamik süreç izlenebilir.



Şekil 6. Seçilen Sistemin Veriminin Üç Mevsimsel Referans Düzleminde Gün Boyunca Ki Dinamik Değişimi



Şekil 7. Seçilen Sistemin Pompalayabileceği Su Debisinin Üç Mevsimsel Referans Düzleminde Gün Boyunca Ki Dinamik Değişimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada seçilen bir PVDSP kombinasyonun Şanlıurfa iklim koşullarının değerlendirildiği mevsimsel üç referans düzeyinde; gün boyunca ışıınım şiddeti ve çevre sıcaklığındaki anlık değişimin sistem performansı üzerindeki dinamik etkisi araştırılmıştır. Bu referans düzeyleri aslında ışıınım şiddeti ve çevre sıcaklığı arasında var olan bir doğal ilişkinin bulunması nedeniyle yüksek orta ve düşük anlık ortalama ışıınım şiddetine sahip bölgeler olarak da değerlendirilebilir.

Şekil 6 ve Şekil 7 görüleceği üzere gün içinde özellikle sistem performansında ve sistemi çıktısında büyük değişimler görülmesi dolayısıyla herhangi bir PVDSP uygulamasının, dinamik analiz olmadan yapılacak performans analizi yanlış sonuçlara götürecektir. Ayrıca Şekil 3 ve Şekil 4'deki diyagramlarından anlaşılacağı üzere bu çalışma seçilen PVDSP uygulaması, özellikle düşük ışıınım şiddeti ortalamasına sahip bölgelerde yüksek düzeylerde bir performans düzeyine erişmektedir. Bu durum tamamen sistemin kendine özgü karakteristiklerine bağlı spesifik bir durum olması dolayısıyla özellikle herhangi bir bölge için sistem seçimi yapılırken bölgenin iklimsel koşullarının yıl ve gün boyunca gösterdiği değişimlere karşı sistemin komponentlerinin göstereceği dinamik tepki göz önünde tutulmalıdır. Aksi halde sistem performansı ve ekonomik açıdan varılabilecek iyileştirmelerin çok altında bir seviye kalacağı bu çalışmada yapılan simülasyonlar sonucunda hazırlara diyagramlardan kolayca gözlemlenebilir.

KAYNAKÇA

1. Rosental A.L., Lane C.G., "Solar cells: Their Science, Technology, Applications and Economics", Elsevier Sequoia,, Vol.30, pp. 563, 1991.
2. Yeşilata, B., Aktacir, M.A., " Fotovoltaik Güç Sistemli Su Pompalarının Dizayn Esasların Araştırılması", Mühendis ve Makine, cilt 42, sayı 493, sy 29-34, 2001.
3. Muntasser, M.A. , Bara, M.F., Quadri , H.A. , EL-Tarabelsi, R., La-azebi, I.F., "Photovoltaic Marketing İn Developing Countries", Applied Energy, Vol. 65, pp 67-72, 2000.
4. Al-Karaghoulı, A., Al-Sabounchı., A. M., "A PV Pumping System", Applied Energy, Vol.65, pp. 145-151,2000.
5. Agha K. R., Sbita M. N., "On the Sizing Parameters for Stand-Alone Solar-Energy Systems", Applied Energy, Vol.65, pp. 73-84, 2000.
6. Buresch, M., *Photovoltaic Energy Systems*, McOraw-Hill, New York, 1983
7. Kou Q., "A Method for Estimation the Long- Term Performance of Photovoltaic Pumping System.", Master Thesis, The University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, 1996.
8. Fıratoğlu Z. A., Yeşilata B., "Fotovoltaik Güç Destekli Dalgıç Pompa Sistemlerinde Optimum Dizayn Koşullarının Araştırılması ", Sayı.62, sayfa 59-66, 2001.
9. Duffie, J., Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd edn., Wiley Interscience,, 1991.

10. Duzat R. M., "Analytical and Experimental Investigation of Photovoltaic Pumping Systems", Doctor Thesis, The University of Oldenburg, 2000.
11. Metvally H. M. B., Anis W. R., "Dynamic Performance of Directly Coupled Photovoltaic Water Pumping System Using D. C. Shunt Motor", Energy Convers. Mgml, Vol. 37 No. 9, pp. 1407-1416, 1996.
12. Fıratoğlu Z. A., Yeřiata B., "Maksimum Güç Noktası İzleyicili Fotovoltaik Sistemlerin Optimum Dizayn ve Çalışma Koşullarının Araştırılması", 6-Türk ve Alman Enerji Sempozyumu, 21-24 Haziran 2001.
13. Kou S. A., Klein A., Beckman W., "A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct- Coupled PV Pumping Systems", Solar Energy, Vol. 64, pp.33-40, 1998.

TMMOB Makina Mühendisleri Odası
II. GAP ve Sanayi Kongresi
29-30 Eylül 2001 Diyarbakır

GAP¹ DAKİ YERLEŞİM BİRİMLERİNDE SAĞLIKLI VE EKONOMİK ISINMA

Hüseyin YILDIRIM

MMO Adıyaman Temsilcisi

ÖZET

Isıtmada tüketilen yakıtların yansından fazlası hiç istifade edilmeden atmosfere is ve kurum olarak verilmektedir. Bu sadece enerji kaybı değil önemli oranda hava kirliliğide yapmaktadır. Ayrıca çevreye yayılan kirletici emisyonlar havayla birlikte oluşturdukları asit yağmurlarıyla suyu ve toprağı da kirletmektedir. Kaybedilen enerjinin % 35 ısı yalıtımı, % 25 de uygun yakma tekniğıyle geri kazanılabileceğı gibi hava kirliliğı de % 70 azaltılabilir. Isı yalıtımı ayrı bir konu olduğı için burada ele alınmamıştır. Bu sorunun çözümü ısıtmada kullanılan yakıtın %80 'ni tek başına tüketen katı yakıtlı sobalardadır. Bu yazıda sobalı ısıtmada tespit edilen noksanlıklar ile çözüm önerileri ele alınmıştır.

1. GİRİŞ

Ülkemizde hatalı ısınmadan dolayı yenilenemeyen enerji kaynakları hızla tükenmekte, doğa kirlenmektedir. Toplam enerjinin % 38 ısıtmada tüketilmekte olup ancak bunun sadece % 16'sından istifade edilmekte kalanı havaya savrulmaktadır. Kaybedilen enerji Atatürk Barajı üretiminden daha fazladır. GAP'daki yerleşim birimlerinde ısınmanın durumu ülke genelinden farklı değildir.

Isıtma kazan, kat kaloriferi, kombi, klima ve soba ile yapılmaktadır. Ancak ülke genelinde ve GAP Bölgesinde % 85 sobalı ısıtma tercih edilmektedir. Isınmanın yamsıra, kısmen yemek pişirme ve sıcak su hazırlamada da kullanılmaktadır. Yakılmasında insan faktörünün önemi, gaz zehirlenmesi yapması ve yaygın olarak kullanılması gibi nedenlerden dolayı bu yazıda sadece katı yakıtlı (odun-kömür) sobalar ele alınmıştır.

Isıtmada kullanılan yakıtın % 80'ini tek başına tüketen katı yakıtlı sobalar aşağıda belirtildiğı şekilde yakılmalan halinde soba zehirlenmelerinin tamamı, hava kirliliğinin yarısı önenebilecek, yakıt gideri de 'A oranında azaltılabilecektir.

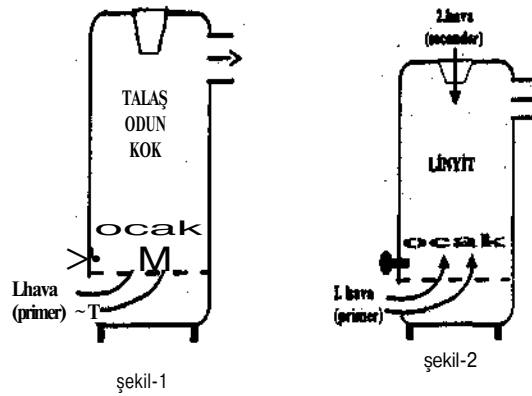
2. SOBA-YAKACAK UYUMU

Sac sobada odun, kovalı sac sobada talaş yakılmalıdır. Talaş başka hiçbir sobada yakılmamalı, odun ise kömürle birlikte az miktarda tutuşturucu olarak kullanılmalıdır. Fazla odun kurum yaparak verimi düşürür. Döküm ızgaralı, tuğlalı, kovalı ve uyuyan sobalarda linyit ve kok yakılabilir. Ancak kok uyuyan sobada linyit ise diğer sobalarda daha verimli yanar. Taş kömürü, döküm tuğla astarlı sobalarda yakılmalıdır. Linyit için büyük hazneli kok için geniş ızgaralı soba tipi tercih edilmelidir. Uyuyan soba, çıkışında hava klapesi bulunan sobadır.

En zararlı emisyon olan asit yağmurlarını yapan kükürdün azaltılması için linyit ve kok'a bir miktar kireç karıştırılmalı veya linyit bir süre yağmur altında tutulmalıdır. Ancak bunlar yakıldığı zaman kuru olmalıdır. Nemli olmaları halinde tutuşuncaya kadar bünyelerindeki yanıcı, uçucu maddelerin bir kısmı yanmadan bacaya giderek verimi düşürür. Sobanın normal ömrü altı, kovanın bir yıldır. TSE'li, ısıtma gücü ayarlanabilen , verimi % 55'ten yüksek en az 4000 kcal/saat kapasiteye haiz veya an az 1 m² ısıtma yüzeyli, II. gaz yolu(dolaştırma bölümlü)olan soba tercih edilmelidir.

3. DOLDURMA - YAKMA

Aşırı doldurma verimi ve emniyeti azaltır. Sobanın tamamı değil 2/3'ü doldurulmalıdır. Alttan ve üstten olmak üzere iki türlü yakılabilir. Ancak üstten yanma tercih edilmelidir. Izgara üzerine konulan kömürlerin üstünde odun tutuşturulur. Benzin, petrol gibi parlayıcı yakıtlar tutuşturmada kullanılmamalıdır. Yanan kömürlerin üstüne kömür atılmamalıdır. Ancak toz kömür azar, azar atılabilir. Zahmetli olmakla birlikte kovalı sobalar üstten yakıldıkları için daha verimlidirler. Kömürün tam yanması için tutuşma sıcaklığı üstünde bir sıcaklık ve yeterli miktarda hava verilmelidir. Aşırı sıcaklık ile eksik hava birleşince kömürün içindeki küller eriyip curuflaşma yaparak ızgara yüzeyini kapatıp yakışı bozar. Izgara kolu hareket ettirilerek küllerin aşağı dökülmesi ve havanın alttan girmesi sağlanmalıdır. Ocağa alınan hava ne yakışı bozacak kadar çok ne de az olmalıdır. Çok olması halinde yanıcı, uçucu maddelerin bir kısmı bacaya gider, az olması halinde ise eksik yanmaya neden olur. Her iki durumda da verim düşer. Gri duman yeterli havanın ve az sıcaklığın siyah duman ise yetersiz hava ve fazla sıcaklığın belirtisidir.



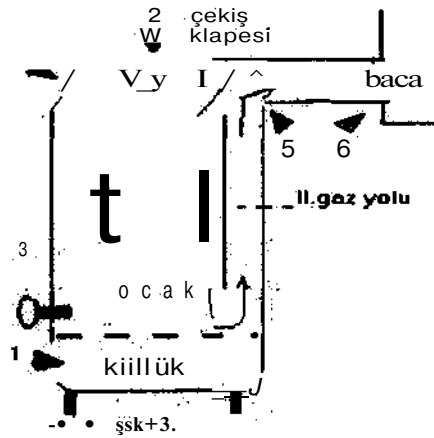
Hava daima alttan (primer) ve sürekli verilmelidir. Şekil-1 Linyit yakılırken ilaveten üstten (seconder) de yeterli miktarda ve sürekli ikinci bir hava verilmelidir (Şekil-2). Yanmanın şiddeti alt (kok) ve üst

(linyit) hava kapağıyla ayarlanmalıdır. II. Gaz yoluna haiz (dolaştırmak) sobalar tutuşmadan sonra üst çekiş klapesi kapatılmalıdır (şekil-3). Yanma kısa bir sürede değil belli bir zaman (2-6 saat) devam etmelidir. Sobada yemek pişirme ve su ısıtma yapılacak ise bu tam tutuşmadan sonraya bırakılmalıdır. Yakıt israfı ve emisyon oluşumu iyi yakışla azaltılabilir. İyi bir yakışın işareti alevin rengi ne çok koyu ve isli, ne de açık olmayıp portakal sarısı rengindedir.

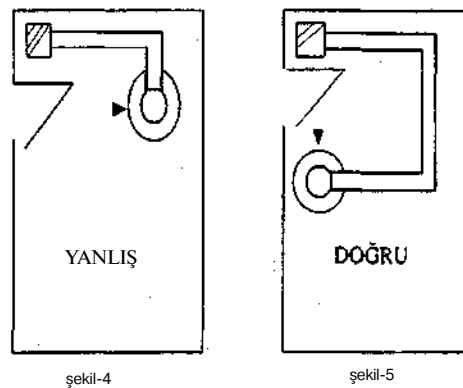
4. MONTAJ

Isıl verimi sağlayan en önemli faktör yanmanın kontrollü yapılmasıdır. Bu da yeterli miktarda havanın uygun yerden sobaya verilmesi ve istem dışı hava girişlerinin önlenmesiyle mümkündür.

Linyit için alttan (1) ve üstten (2) diğer bütün yakacaklar için sadece alttan (1) hava verilmelidir. Kaçak havanın girebileceği 3,4,5 ve 6 noktalarında sızdırmazlık sağlanmalıdır.



Gazların ısısından azami ölçüde yararlanılması ve baca sıcaklığının düşmemesi için gazlar direkt değil, çekışı bozmayacak kadar dolaştırıldıktan sonra bacaya verilmelidir. Şekil-4



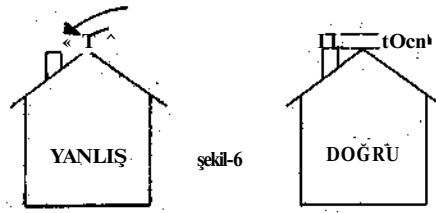
Bunu sağlamak için by-pass sistemi olmayan sobalarda boru uzun, dirsek sayısı az ve bacaya doğru yükselen meyille döşenmelidir. Bu değerler baca kesiti ve yüksekliği ile soba kapasitesine bağlı

olmakla birlikte 4 m'den az boru, 3'ten fazla dirsek kullanılmamalıdır. Şekil-5 Sobanın önü kapıyı tam karşılamamak, bu mümkün değilse biraz çapraz konulmalıdır.

5. BACA

Sobanın bağlandığı baca kesiti ne olursa olsun ikinci bir soba, şofben vb. cihaz bağlanmamak, sızdırmaz olmalı ve yılda en az iki kez kurumlan temizlenmelidir. Soba verimini etkileyen önemli faktörlerden biri de baca çekişidir. Baca kesiti normal çekişi sağlayacak ölçülerde olmalıdır. Gereğinden fazla geniş bacadan yukandan aşağıya soğuk hava inerek çekişi bozar. Baca yuvarlak yapılmalı, dikdörtgen olması halinde ise ölçüleri 2/3 oranında olmalıdır. Baca kesitini veren birkaç formül bulunmakla beraber Faust formülünün $F=Q/20Vh$ şeklinde uygulanması pratikte iyi sonuç vermektedir. (F: baca kesiti cm^2 Q: ısı ihtiyacı kcal/h, h: baca yüksekliği m.)

Baca sacdan, büzden, delikli tuğladan ve bir tuğladan ince yapılmamalı dolu tuğladan örülmelidir. baca dış duvardan geçirilmemeli ve çatı mahyasını en az 60 cm geçmelidir.



Baca çekişi $G=h$ (öd-SO mmss olarak baca içi gazların sıcaklığı ile baca yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Karabaca şönt (aktarmalı) bacadan daha iyi çekiş sağlamaktadır. Fazla yükseklikten dolayı çok artan baca çekişi öndeki hava klapesi kısılarak düşürülmelidir. Baca içi sıcaklığı 200-250 C olmalıdır. Soğuk bacada katran oluşurken, eksik yanmada baca içi kurum bağlar. İçi az miktar ıslı baca temiz bacadan daha verimlidir.

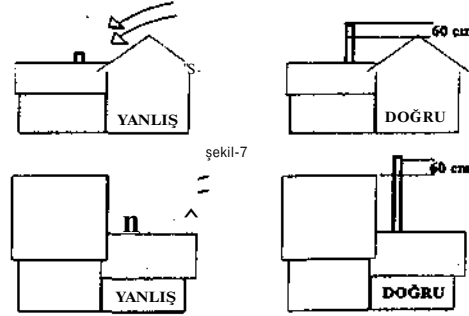
6. EMİSYONLAR

Hava kirliliğinin azaltılması endişesiyle ithal kömür tercih edilmesi yeterli değildir. Kaldırıcı istihdamı azaltması, döviz kaybı ve çözüm arayışlarını önlemesi gibi nedenlerden dolayı zararlıdır. Emisyon oluşumu ancak iyi yakışla azaltılabilir. Sobadan çevreye yayılan emisyonlar (toz, SO_2 , NO vb.) sadece havayı değil, nem ile etkileşerek oluşan asit yağmurlarıyla suyu ve toprağı da kirletmektedir. Emisyonlar, tüketilen yakıtların miktarıyla orantılı olduğu için yüksek verimli sobayla yakıt sarfiyatı dolayısıyla emisyonlar azaltılabilir. Isıl verimde yapılan iyileşme oranından daha fazla miktarlarda yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

7. SOBA ZEHİRLENMELERİ

Zehirlenmelerin sanıldığı gibi yakıtın kalitesi veya sobanın verimiyle ilgili olmayıp tamamen yakma şekli ve bacadan kaynaklanır. En az görülen şekli; soba az havayla yanmakta iken baca çekişi de zayıf ve bu durum uzun süre (2 saat) devam ederse odaya sızan gazlar zehirler. Sık görülen şekli, sobanın

bağlandığı bacaya alt veya üst katlarda ikinci bir soba bağlanmıştır. Zayıf çekiş veya baca tepmesi sonucu diğer sobadaki gazlar by-pass yaparak yanmayan soba üzerinden odaya girerek zehirler. En sık görülen şekli ise özellikle rüzgarlı havalarda hava anaförlerinden dolayı meydana gelen ani basınçla yanlış söner ek eksik yanan gazların odaya sızması sonucu meydana gelir. Zehirlenmelere meydan vermemek için yukarıda belirtildiği gibi sobanın bağlandığı bacaya ikinci bir soba bağlanmamalı ve baca sızdırmaz olmalıdır. Baca mahyadan ve varsa bitişik veya 6 metreden daha yakın binanın çatı mahyasından en az 60 cm yükseğe çıkarılmalıdır. Şekil-7



Baca şapkası hakim rüzgarın hızını kesecek şekilde konulmalıdır. Eksik hava ile yanışa ve zayıf baca çekişine müdahale edilmelidir. Özellikle rüzgarlı havalarda uyuyan soba dahil bütün sobalarda gündüz uyurken, gece, çocuk ve yaşlıların yalnız başlarına oldukları her zaman sobanın içinde tam sönmemiş yakacak bırakılmamalıdır.

8. SONUÇ

Yakıt israfı önemi oranında bilinmediği için toplumda yeteri kadar tartışılmamış dolayısıyla çözümler üretilmemiştir. Sadece soğuk havalarda veya yoğun hava kirliliğinin yaşandığı zamanlarda değil, konu ilgililer tarafından ciddiyetle ele alınıp kalıcı çözümler üretilinceye kadar gündemde tutulmalıdır. İnsan sağlığı ve kaynaklarımızın korunması bakımından çok önemli olan bu konuya başta ilgililer olmak üzere herkes gereken duyarlılığı göstermelidir.

KAYNAKÇA

1. Isıtma-Haval. N. Aybers
2. Bacalar A.K.Dağsöz
3. Hava kir. ve kömür ger. Ali Durmaz
4. Soba Kongresi Eskişehir MMO
5. Enerji Bülteni E.İ.E.

TMMOB Makina Mühendisleri Odası
II. GAP ve Sanayi Kongresi
29-30 Eylül 2001 Diyarbakır

GAP BÖLGESİNDE FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİNİN KULLANIMI

Gülşah ÇAKMAK, Cengiz YILDIZ

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 23279 ELAZIĞ

ÖZET

Yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi, her bölgede bulunması ve temiz olması nedeniyle 21. Yüzyılın enerji kaynağı olarak ön plana çıkmıştır.

Türkiye, dünya güneş kuşağı içerisinde yer almakta ve güneş enerjisi açısından GAP bölgesi oldukça zengin bir konumda bulunmaktadır. Bu nedenle Türkiye'de özellikle de GAP Bölgesi'nde güneş enerjisinin sıcak su temininde, ısıtma ve soğutma sistemlerinin çalıştırılmasında ve elektrik enerjisi üretimi gibi sistemlerde kullanılması gerekmektedir. Bunun için güneş enerjisinin ısı veya fotovoltaik toplama yöntemleri ile toplanması sağlanmalıdır. Günümüzde ısı toplama sistemleri yaygınlaşmış olmasına rağmen fotovoltaik toplama sistemleri istenen düzeye ulaşmamıştır.

Yapılan çalışmada alternatif elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan fotovoltaik güneş pillerinin çalışma prensibi, uygulama alanları, verimleri incelenerek, GAP Bölgesi'nde kullanılabilirliği araştırılmış, Doğru ve Alternatif akım ile çalışan meteorolojik ölçüm cihazı ve su pompası için gerekli güneş pili modül gücü belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: GAP, Fotovoltaik, Güneş Enerjisi

1. GİRİŞ

Enerji maliyetlerinin gün geçtikçe artması, mevcut enerji kaynaklarının sınırlı olması ve çevre kirliliğine etkisi nedeniyle alternatif enerji kaynaklarından yararlanılması zorunlu hale gelmiştir. Bu enerji kaynakları rüzgar, güneş enerjisi, nükleer enerji ve jeotermal enerji şeklinde sıralanabilir. Ancak genel olarak güneş, dünyadaki tüm enerjilerin kaynağı olup; rüzgar, gel-git, fosil yakıtlar, hidroelektrik gibi enerji kaynakları güneş kökenlidir.

Türkiye'ye düşen güneş gücü kurulu elektrik santralleri gücünün 5300 katından fazladır. Bu enerji 1995 yılındaki genel enerji tüketiminin 1286 katı, bilinen katı fosil yakıt rezervinin 32 katı ve petrol rezervinin 2200 katıdır.

Günümüzde güneş enerjisi konutlarda, işyerlerinde ve gündelik yaşamın çeşitli alanlarında, endüstride ısı ve elektrik elde edilmesinde, tarımsal teknolojide, kara, deniz ve hava taşıtlarında, iletişim araçlarında radyo, TV, telefon, sinyalizasyon ve otomasyonda ve elektrik sektöründe birincil kaynaklar arasına girmesi ayrıca askeri amaçlarla kullanılması hedeflenmektedir.

Güneş enerjisinin kullanılabilmesi için, öncelikle toplanması gerekir. Toplama işlemi,

1. Isıl (güneş ısı kollektörlerle)
2. Elektriksel (fotovoltaiklerle)

olmak üzere iki değişik yolla ve dolaylı biçimde yapılmaktadır(1,2).

Güneş pilleri güneş ışınlarını doğrudan elektriğe çeviren cihaz olup, ilk güneş pili 1954 yılında L.Pearson, C.S. Fuller ve D.M. Chapin tarafından yapılmıştır. Bugüne kadar güneş pilleri üzerinde çeşitli araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmış olup temel amaç, daha ekonomik ve daha yüksek verimle çalışacak güneş pillerinin planlanması olmuştur. 2000 yılından itibaren dünyada üretilen toplam enerjinin % 30' unun ve elektrik üretiminin % 10' unun güneş pilleriyle elde edileceği tahmin edilmektedir.

Güneş pillerinin diğer enerji üretim sistemlerine göre önemli avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Güneş radyasyonunu elektrik enerjisine çeviren doğrudan enerji dönüştürücüleri içinde en yüksek verime (Laboratuvar şartlarında % 30) sahip olması.
- Oldukça uzun bir ömür(yaklaşık 20-25 yıl).
- Fabrikasyon seri üretim için uygunluk.
- Birim ağırlık başına yüksek çıkış gücü.
- Temiz bir enerji kaynağı olması.
- Daha az sabit yatırım gerektirmesi.

Fotovoltaik güneş pillerinin, yapımlarının kolay, ömürleri uzun, yüksek verim için sıcaklık gerektirmemesi, verdiği enerjiye göre kütesinin küçük olması, artıkları ve çevreye zararının olmaması, kolay taşınması gibi özellikleri nedeniyle kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır.

2. GAP BÖLGESİNDE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

Türkiye güneş enerjisi potansiyeli açısından dünya güneş kuşağı içerisinde yer almakta ve Güney Doğu Anadolu Bölgesi güneş enerjisi potansiyeli açısından en zengin bölge olmaktadır. Türkiye' nin bölgelerine göre yıllık güneşlenme süresi Tablo 1'de verilmiştir. Güney Doğu Anadolu Bölgesi'nde yıllık güneşlenme süresi oldukça yüksek olup, güneş enerjisi bakımından oldukça iyi bir değere sahiptir(3).

Tablo 1. Bölgelere Göre Yıllık Güneşlenme Süresi(h)

BÖLGELER	Yıllık Güneşlenme Süresi(h)
Güney Doğu Anadolu Bölgesi	3016
Akdeniz Bölgesi	2923
Ege Bölgesi	2726
İç Anadolu Bölgesi	2712
Doğu Anadolu bölgesi	2693
Marmara Bölgesi	2528
Karadeniz Bölgesi	1966
TÜRKİYE	2609

Türkiye'nin günlük ortalama güneş ışınımının yıllık ortalaması ise 13.2 Mj/m^2 gün kadar olup, Güney Doğu Anadolu Bölgesi yıllık ortalama güneş ışınım şiddeti 14.3 Mj/m^2 ile ilk sıradadır (Tablo 2). Yıllık ortalama güneş ışınım şiddetinin en düşük değeri ise Karadeniz Bölgesi'nde kaydedilmektedir.

Tablo 2. Bölgelere Göre Yıllık Ortalama Güneş Işınım Şiddeti (Mj/m^2)

BÖLGELER	Yıllık Ortalama Güneş Işınım Şiddeti (Mj/m^2)
Güney Doğu Anadolu Bölgesi	14.3
Akdeniz Bölgesi	13.9
Ege Bölgesi	13.6
İç Anadolu Bölgesi	13.7
Doğu Anadolu Bölgesi	13.4
Marmara Bölgesi	10.9
Karadeniz Bölgesi	10.3
TÜRKİYE	13.2

Aşağıdaki tabloda ise GAP Bölgesi'nde bulunan bazı illerin aylık ortalama güneş ışınım şiddeti verilmektedir. Yaz aylarında bu değer oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Tablodan görüldüğü gibi güneş enerjisi potansiyeli açısından en zengin bölge Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bu bölgede güneş enerjisinden faydalanması enerji kazancı açısından önem taşımaktadır. Ayrıca, bölgede ortalama yağışlı günlerin sayısı diğer bölgelere göre daha az olmakta ve yıllık yağışın % 50'sinden fazlası kış aylarında düşmektedir.

Tablo 3. İllere Göre Aylık Ortalama Tüm Güneş Işınım Şiddeti(Mj/m²gün)

İller	Oc.	Şub.	Mart	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağus.	Eyl.	Ek.	Kas.	Aral.	Ort
Adıyaman	6.7	8.3	11.8	15	19.2	20.3	21.8	19.9	16.1	10.8	8.1	6.2	13.7
Birecik	7.2	8.6	12.3	16	20.8	23.4	22.9	19.9	17.3	9.5	8.2	6.6	14.6
Gaziantep	6.6	9.3	12.9	16.1	19.4	21.7	21.5	20.2	16.3	12	8.5	6.1	14.2
Mardin	7	9.2	12.5	15.5	19.9	22.2	21.9	20.1	16.9	11.8	8.3	6.5	14.3
Siirt	6.7	8.9	12.2	15.3	19.2	21.7	21.8	19.8	16.1	11.3	8	6.2	13.9
Urfa	6.8	9.1	12.5	16	19.7	22	21.8	19.8	16.2	11.7	8.4	6.3	14.2
Diyarbakır	6.6	9.2	12	15.8	19.9	23	22.5	20.5	16.6	10.4	7.9	6.2	14.3

3. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLİ UYGULAMA ALANLARI

Fotovoltaik güneş pillerinin yeryüzünde ve uzayda çeşitli uygulama alanları vardır(4). Önceleri yalnız uzay çalışmalarında kullanılan güneş pilleri daha sonra yeryüzünde kullanılmaya başlanmıştır.

Enerji üretim merkezlerinden uzak olan veya enerji hattı döşenmesinin güç olduğu yerleşim merkezleri için gerekli elektrik enerjisi güneş pilleriyle temin edilebilir. Bu durum güneş pili panelleri ile sağlanır. Bu yolla elde edilen elektrik enerjisi ile televizyon, buzdolabı ve radyo gibi cihazlar çalıştırılabilir.

Fotovoltaik güneş pilleri ilk defa 1956 yılında uzaya gönderilen Vanguard-I uydusunda kullanıldı. 1960 yılındaki 'Apollo projesiyle' uzay çalışmalarında uzaya gönderilecek araçların enerji ihtiyaçlarının güneş pilleriyle sağlanması kararlaştırılmıştır(5).

Bugün, Japonya'da deniz fenerlerinin, A.B.D'de orman gözetleme kulelerinin enerji ihtiyaçları fotovoltaik güneş pilleriyle sağlanmaktadır. Pakistan'da bir çok su pompası tamamen güneş pilleriyle elde edilen enerjiyle çalıştırılmakta ve deniz fenerleri, lojmanların enerji ihtiyacı güneş pilleriyle temin edilmektedir. A.B.D'de Arizona eyaletinde bulunan Schuchuli Kasabası' nın elektrik enerjisi güneş pili santraliyle temin edilmekte ve elde edilen elektrik akümülatörlere depolanarak sürekli kullanımı sağlanmaktadır(6).

Fotovoltaik güneş pili ile çalışan uçak 1979 yılında Larry Mauro tarafından yapılmış ve bu uçak 40 km/saat'lık bir hızla ve 12 m'lik bir yükseklikle uçmuştur. 1985 yılında Avrupa'da güneş pilleriyle çalışan bir otomobil yarışması yapılmıştır. Avustralya'da ve İsrail'de deneme amaçlı otomobiller çalıştırılmıştır.

Ayrıca günümüzde fotovoltaik güneş pilleri

- Fotoğraf makinalarında,
- Transistorlu amplifikasyon devrelerinde,
- Yangın alarmı sistemlerinin çalıştırılmasında
- Sokak ve vitrin lambalarının yakılmasında
- Yangın ihbarında
- Küçük otomobillerin çalıştırılmasında kullanılmaktadır.

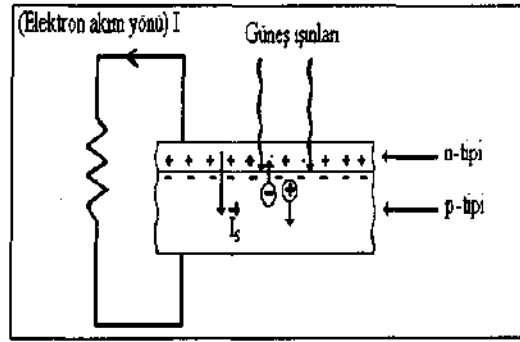
4. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Fotovoltaik güneş pilleri üzerine gelen ışık enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken kristaldir.

Basit olarak bir güneş pili bir yarı iletken üzerinde n ve p tipi bölgeler oluşturularak yapılabilir. Oluşturulan bu p ve n tipi bölgelerinin kavşak kesiminde doğal olarak bir elektrik alanı meydana gelir. Güneş ışınları ile kavşakta ve kavşağa yakın yerlerde elektron-hol çiftleri oluşur.

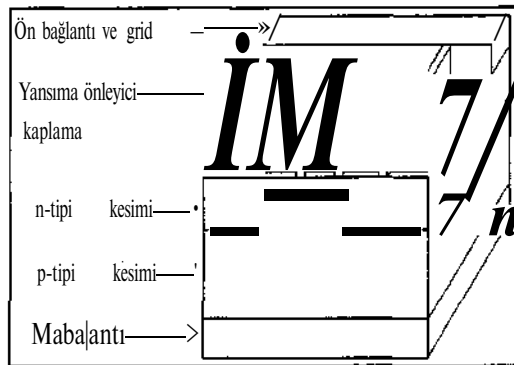
Serbest elektronların, elektron-hol çiftinin oluşabilmesi için enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji ışık fotonlarından sağlanabilir. Akım şiddeti, kavşağa birim zamanda gelen foton sayısı dolayısıyla ışık şiddetiyle orantılıdır.

Kavşaktaki elektrik alanı sayesinde elektronlar n bölgesine hollerde p bölgesine geçerler. Böylece, başlangıçta nötr olan n ve p bölgeleri sırasıyla negatif ve pozitif yüklenmiş gibi olur. Pilin dış devre bağlantısının yapılmasıyla bu yükler akarak elektrik akımı oluşur (7,8). Bu şekilde elde edilen doğru akıma fotovoltaik akımı, olaya da fotovoltaik olay denir (Şekil 1).



Şekil 1. Bir Tek Kristal Silisyum Güneş Pili'nin Çalışması

Güneş pillerinin seri (yüksek gerilim elde etme) veya paralel (yüksek akım elde etme) bağlanmasıyla istenen amaca uygun güç elde edilir. Şekil 2'de bir güneş pili'nin yapısının şematik olarak gösterimi verilmektedir.

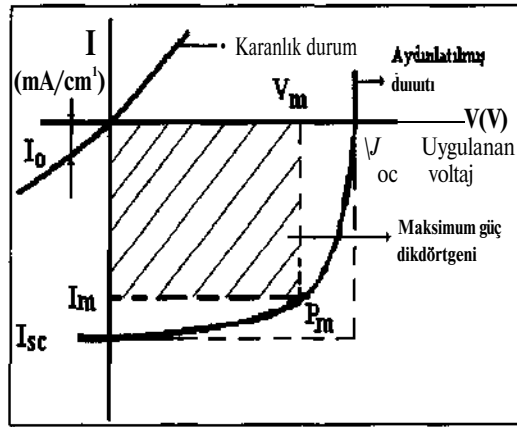


Şekil 2. Bir Güneş Pili Yapısının Şematik Gösterimi

p ve n tipi yan iletkenler bir düzlem üzerinde birleştirilmesi durumunda p tipi maddeler dışarıdan elektron kabul etmeye ve n tipi maddeler ise dışarıya elektron vermeye daha yatkındır. Yeterli miktarda bir ışın demeti p-n bitişimi üzerine düştüğü zaman bir yük hareketi meydana gelir. Foton absorblanması ile meydana gelen yük taşıyıcılar çoğunlukta olduğu bölgelere doğru sürüklenip bitişim düzeyinde bir I_s akımı oluşturur. Böylece, p bölgesi (+), n bölgesi (-) yüklenir. Burada I_s akımı bitişimi düz yönde kutuplar ve bundan dolayı p'den n bölgesine doğru I akımı geçer. Eğer p-n bitişimi bir yük üzerinden dış çevre bağlantısı yapılırsa I_s akımının bir kısmı dış çevreden akar ki bu durumda p-n bitişimi ışığı elektrik enerjisine çevirmiş olur. Elektrige dönüştürülemeyen enerji ise ısı enerjisine dönüşür.

5. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLİNDE VERİM ANALİZİ

Güneş pilinin verimi onun kalitesini belirtmesi açısından önemli olup, veriminin tayin edilebilmesi için akım voltaj karakteristiğinden faydalanılır. Elde edilen eğri yardımıyla pilin açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akımı I_{sc} gibi çıkış parametreleri belirlenir(Şekil 3). Bir güneş pilinin açık devre gerilimi, pilden geçen akımın sıfır olması durumunda pil uçlarından ölçülen gerilimdir. Pilin kısa devre akımı ise sıfır gerilimde ve aydınlatma altında pilden geçen akımdır. Bu akım gelen ışığın şiddetine bağlıdır. I-V eğrisi üzerinde değişik noktalarda I-V çarpımlarının hesaplanması ve bu çarpımın maksimum olduğu noktanın belirlenmesi ile maksimum güç noktası P_m bulunur. Bu noktanın tespit edilmesinden sonra akım-gerilim eksenleri üzerindeki izdüşüm değerleri pilin maksimum gücüne karşılık gelen akım I_m ve gerilim V_m değerleridir.



Şekil 3. Bir Güneş Pilinin Karakteristik I-V Eğrisi ve Parametreleri

Fotovoltaik bir güneş pilinin maksimum çıkış güç yoğunluğu onun akım-voltaj karakteristik eğrisi içerisinde kalan en büyük alanlı dikdörtgene karşılık gelir. Fotovoltaik bir güneş pilinin çıkış güç yoğunluğu P_m , R_m yük direnci üzerindeki V_m gerilimi ve bu yük direncinden geçen I_m akım yoğunluğu çarpımı ile verilir.

Bu durumda pilden elde edilebilecek maksimum güç

$$P_{im} = I_m \cdot V_m$$

(D)

bağıntısından bulunur. Fotovoltaik bir güneş pilinin çevrim verimi η , pilin çıkış güç yoğunluğunun pil üzerine gelen ışınların güç yoğunluğuna oranı olarak verilir. Buna göre, pilin ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmedeki maksimum çevrim verimi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\eta = P_{\text{m}} / P_{\text{in}} = (V_{\text{m}} \cdot I_{\text{m}}) / P_{\text{in}} \quad (2)$$

$$\eta = P_{\text{m}} / P_{\text{in}} = (V_{\text{m}} \cdot I_{\text{m}}) / P_{\text{in}} \quad (3)$$

Ölçülebilen niceliklere bağlı olarak ise verim ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\eta = FF \cdot [(V_{\text{oc}} \cdot I_{\text{sc}}) / (P_{\text{in}} \cdot 100)] \quad (4)$$

Burada FF dolum çarpanı (Filling factor) olarak tanımlanır. Filling faktörü (Fil) pilin maksimum çıkış gücünün V_{m} ve I_{m} çarpımının V_{oc} I_{sc} çarpımına oranı olup,

$$FF = \frac{V_{\text{m}} \cdot I_{\text{m}}}{V_{\text{oc}} \cdot I_{\text{sc}}} \quad (5)$$

ifadesi yardımıyla tayin edilir. Fil faktörü güneş pilinin iç seri direncinden kaynaklanır. Seri direncin büyüklüğü FF' i küçültür. Fil faktörünün değerinin daima 1' e yakın olması istenir. İdeal bir güneş pili için FF 1'e eşittir. FF' in yüksek olması güneş pili veriminin yüksek olduğunu gösterir. P_{m} ise pil üzerine gelen güneş enerjisi gücünü ifade etmektedir.

Fotovoltaik güneş pillerinin, güneş enerjisini elektrik enerjisine çevrim verimi, diğer enerji çevrim sistemlerine göre daha düşük olup, verimin düşük olması ise doğal ve teknolojik etkenlerden kaynaklanmaktadır.

Doğal Etkenler:

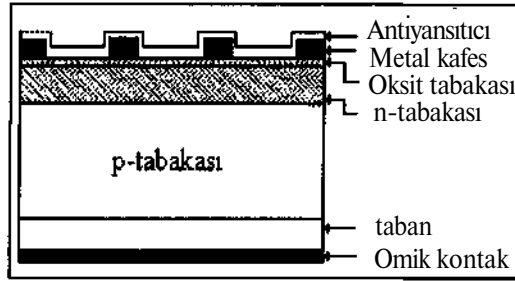
1. Tam olmayan absorpsiyon
2. Foton enerjisinin tamamının kullanılmaması
3. Gerilim etkeni
4. Eğri etkeni

Teknolojik Etkenler:

1. Güneş pilinin iç seri direncinden ileri gelen kayıplar
2. Fotovoltaik güneş pili üzerindeki yansıma kayıpları
3. Toplama kayıpları

Doğal ve teknolojik etkenlerin fotovoltaik güneş pillerin verimlerini olumsuz yönde etkilemesini önlemek için aşağıdaki tedbirler alınmaktadır.

1. Yansıtma kaybını önlemek için antiyansıtıcı maddeler kullanmak (Şekil 4).
2. Güneş ışınlarından geniş spektrumda yararlanmak için, çok katlı fotohücreler üretmek.
3. Güneş ışığını bir mercekle odaklamak.
4. Güneş ışınlarının dalga boyunun artmasını sağlamak.
5. Seri direncin minimum olmasını sağlamak.
6. Malzeme saflığını arttırmak



Şekil 4. Güneş Pili'nin Ön Yüzeyine Kaplanan Antiyanıtıcının Şematik Olarak Gösterimi

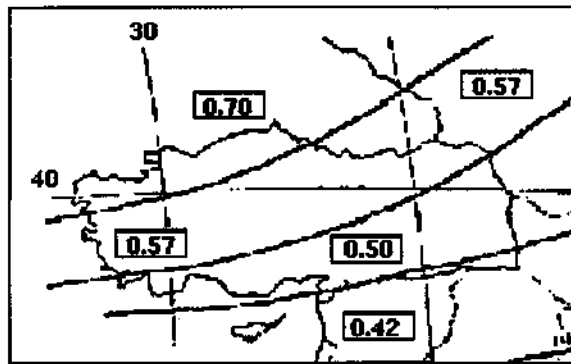
6. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLİ MODÜL SEÇİMİ VE ÖRNEK UYGULAMA

Bir fotovoltaik enerji üretim sistemi kurulurken göz önüne alınması gereken tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir.

1. Yerel güneşlenme miktarı
2. Yerel sıcaklık ve bunun değişimi
3. Enerji depolama ünitesinin kapasitesi
4. Sistem kayıpları (Kirlenmeler, iletim kayıpları, akümülatör veya depolama ünitesi kayıpları, korozyon kayıpları)
5. Diğer güç sistem kayıpları (Çevirici ve kıyıcı kayıpları (Yük çarpanı olarak 1.3 alınır)).

Pratik olarak güneş pili güç seçimi için;

1. Yükün ihtiyaç duyduğu güç belirlenir.
2. Yük besleme gerilimi AC ise çeviricinin kayıp katsayısı (ideal tasarım için yaklaşık 1.3) belirlenir.
3. Güç süreklilik çarpanı bulunur.
4. 1,2,3' de bulunan değerler çarpılır ve gerekli güç Wh/gün olarak bulunur.
5. Güneşlenme katsayısını gösteren harita yardımıyla pillerin yerleştirileceği bölgenin güneşlenme katsayısı bulunur (Şekil 5).
6. 4' de bulunan değer ile 5' de bulunan değer çarpılarak seçilen bölge ve yük için gerekli güneş gücü (W) bulunur. Elde edilen güce göre güneş pili modül miktarı seçilir



Şekil 5. Türkiye İçin Güneşlenme Katsayıları

Örnek uygulama için Doğru akım ile çalışan bir meteorolojik ölçüm cihazı ve Alternatif akım ile çalışan su pompası göz önüne alınmıştır. Su pompasının Diyarbakır, Mardin, Ankara ve İstanbul" da işletmeye alınması durumu için güneş pili gücü aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

1,5A - 12VDC çalışma akımı ve voltajı ile çalışan ölçüm cihazının çalışma süresinin de dikkate alınmasıyla Diyarbakır için günlük güneş pili gücü,,

$$\text{Günlük güç} = 1,5A \cdot 12V \cdot 8h/\text{gün} = 144 \text{ Wh/gün}$$

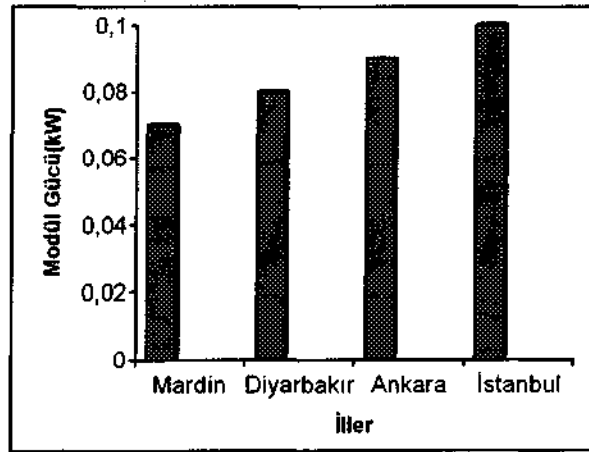
olarak bulunur. Şekil 5 yardımıyla Diyarbakır için güneşlenme katsayısının dikkate alınmasıyla, gerekli güneş pili gücü aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$\text{Güneş pili gücü} = \text{Günlük güç} \cdot \text{Güneşlenme katsayısı}$$

$$\text{Güneş pili gücü} = 144 \cdot 0,5$$

$$\text{Güneş pili gücü} = 72 \text{ W}$$

olarak bulunur. Aynı işlemler diğer iller için de yapılmış ve elde edilen değerler Şekil 6' da gösterilmiştir. Ayrıca ölçüm cihazı ve su pompası için modül gücü Tablo 4'de açıklanmıştır.



Şekil 6. Ölçme Cihazı İçin Gerekli Modül Gücünün İllere Göre Değişimi

Alternatif akım için ise, 2,5A-220 VAC çalışma akımı ve voltajı ile Diyarbakır çalışan su pompası için güneş pili gücü çevirici kayıp katsayısının da dikkate alınmasıyla gerekli güneş pili gücü,

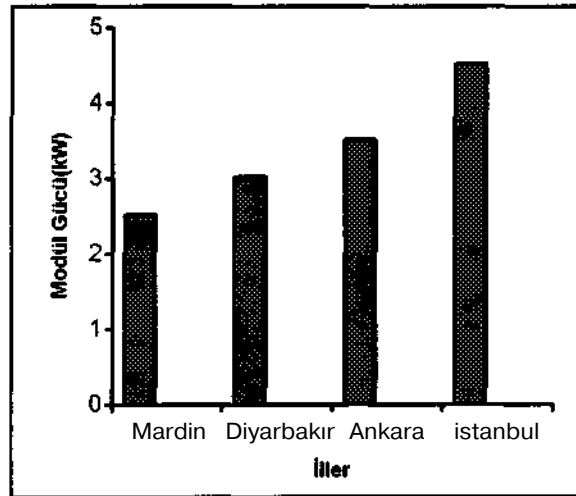
$$\text{Günlük güç} = 2,5 \text{ A} \cdot 220 \text{ V} \cdot 8 \text{ h/gün} \cdot 1,3 = 5720 \text{ Wh/gün}$$

$$\text{Güneş pili gücü} = 5720 \cdot 0,5 = 2860 \text{ W}$$

şeklinde bulunur. Şekil 7' de mevcut iller için su pompasına ait gerekli güneş pili gücü gösterilmiştir.

Tablo 4. Meteorolojik Ölçüm Cihazı ve Su Pompası İçin Modül Gücü Tespiti

Yük Tipi	Tesis yeri	Çalışma akımı ve voltajı	Çalışma süresi (h)	Çevirici faktörü	Günlük güç (Wh/gün)	Güneşlenme katsayısı	Güneş pili gücü (W)	Seçilen Modül gücü (kW)
Meteorolojik ölçüm cihazı	Mardin	1,5A-12VDC	8	-	1,5*12*8	0,42	61	0,07
Meteorolojik ölçüm cihazı	Diyarbakır	1,5A-12VDC	8	-	1,5*12*8	0,50	72	0,08
Meteorolojik ölçüm cihazı	Ankara	1,5A-12VDC	8	-	1,5*12*8	0,57	82	0,09
Meteorolojik ölçüm cihazı	istanbul	1,5A-12VDC	8	-	1,5*12*8	0,70	100	0,1
Su pompası	Mardin	2,5A-220VAC	8	1,3	2,5*8*220*1,3	0,42	2402	2,5
Su pompası	Diyarbakır	2,5A-220VAC	8	1,3	2,5*8*220*1,3	0,50	2860	3
Su pompası	Ankara	2,5A-220VAC	8	1,3	2,5*8*220*1,3	0,57	3260	3,5
Su pompası	istanbul	2,5A-220VAC	8	1,3	2,5*8*220*1,3	0,70	4004	4,5

**Şekil 7.** Seçilen Su Pompası İçin Gerekli Modül Gücünün İllere Göre Değişimi

Grafiklerden ve tablodan görüldüğü gibi ölçüm cihazı için seçilen modül gücü Mardin, Diyarbakır, Ankara ve İstanbul şehirleri için sırasıyla 0,07, 0,08, 0,09, 0,1 kW ve su pompası modül güçleri ise 2,5, 3, 3,5, 4,5 kW olarak seçilmiştir. Her iki yük tipi için gerekli enerji ihtiyacının GAP Bölgesi'nde diğer bölgelere göre daha düşük modül gücü ile karşılanabileceği görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Güneş enerjisi bakımından ülkemizin en zengin bölgesi olan GAP Bölgesi'nde güneş enerjisi üzerine yapılan çalışmaların artırılması enerji ekonomisi açısından önem taşımaktadır. Bu bölgede günlük ve yıllık güneşlenme sürelerinin fazla olması, özellikle elektrik enerjisi üretiminde fotovoltaik güneş pillerinin kullanımının ön plana çıkarılmasını gerektirmektedir.

Güneş pilleri sisteminin modüle olması nedeniyle istenilen düzeyde güç elde edilmekte ve modüllerin çeşitli kombinasyonlarda bir araya getirilerek istenilen gerilim ve istenilen akım temin edilebilir olması bu sistemlerin yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Yapılan modül gücü seçiminde doğru akım ve alternatif akım için modül güçleri tespit edilmiş olup, her iki yük tipi için de güneş enerjisi potansiyeli zengin olan GAP bölgesi'nde gerekli güneş pili modül gücünün diğer bölgelere göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Bu nedenle GAP bölgesinde fotovoltaik güneş pillerinin tarımda ve endüstride kullanılması için çeşitli çalışmalar yapılmalıdır. Özellikle elektrik iletiminin zor ve masraflı olduğu bölgelerde fotovoltaik güneş pillerinin su pompalarının çalıştırılmasında ve aydınlatmada kullanılması sağlanmalıdır. Böylece güneş pillerinin kullanılmasıyla güneş enerjisi destekli elektrik üretimi işlevsel hale getirilerek, enerji ekonomisi sağlanacak ve çevre kirliliğini azaltmada katkıda bulunacaktır.

Enerji götürülmesi veya enerjinin sürekliliğinin sağlanması bakımından ekonomik olmayan bölgeler için güneş pili modüllerinin bir an önce kullanıma sunulması gerekmektedir. Fotovoltaik güneş pillerinin yapımının kolay, ömürlerinin uzun, verdiği enerjiye göre kütesinin küçük, çevreye zararının olmaması gibi özellikleriyle kullanım alanını gün geçtikçe artıracığı umulmaktadır.

Fotovoltaik güneş pillerin gelecekte, dünya elektrik üretiminin önemli bir bölümünü oluşturacakları tahmin edilmektedir. Özellikle enerji kaynaklarının azalması, fotovoltaik güneş piline etki eden doğal ve teknolojik etkenlerin iyileştirilerek, verimin yükseltilmesi ve güneş pili imalat maliyetinin gittikçe düşmesi güneş pillerinin enerji üretimine bir alternatif olma durumunu ortaya çıkarmaktadır.

8. KAYNAKÇA

1. G. Atagündüz, "Güneş Enerjisi Temelleri ve Uygulamaları" Ege Üniversitesi, 1987.
2. J.A. Duffie and W.A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processes" John Wiley, 1974.
3. C.Yıldız, Y. Biçer, T. Yıldız, "Gap Bölgesi Güneş Enerji Potansiyeli ve Değerlendirilmesi" TMMOB Makina Mühendisleri Odası GAP ve Sanayi Kongresi, 1999s.269-277
4. H . Gür, "Güneş Işığında Elektrik Üretimi", Bilim ve Teknik Dergisi, Tübitak, Cilt 24, 1991 s.279.
5. M. Oral, "Güneş Pilleri" Ege Üniversitesi, 1979.
6. T.Konakhoğlu, EİE. Bülteni cilt 7, 1986 s. 122-123.
7. M. Taylor, "Photovoltaics", Ashare Journal, October, 1986.
8. A. Heller, " Electrochemical Solar Cells" Solar Energy, Vol. 29, No. 2, 1982, 153-162.

TMMOB Makina Mühendisleri Odası
II. GAP ve Sanayi Kongresi
29-30 Eylül 2001 Diyarbakır

ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE ALTERNATİF YAKIT UYGULAMALARININ ÇEVRE AÇISINDAN İNCELENMESİ

M. EminAKAY, Veli ÇELİK, İbrahim UZUN

Kırıkkale Üniversitesi- Mühendislik Fakültesi, 71450 Kırıkkale.
Tel: 318 - 357 24 71-75, Faks: 318-357 24 76, E-mail: vcelik@kku.edu.tr eminakay@yahoo.com

ÖZET

Yaklaşık 200 yıldır devam eden Sanayileşme-Kentleşme süreci ile hızlanan "Çevre tahribatı" hem insanın, hem de diğer canlıların hayatını tehdit etmektedir. Diğer yandan yüksek enerji değeri, kolay kullanım, fiyat ve nakliye avantajları ile atıkların azlığı gibi üstünlüklerle bu sürece damgasını vuran fosil yakıtlar, temel endüstriyel ve toplumsal girdi olarak önemini devam ettirmektedir. Günümüzde ise, yakıtlar azalmakta, ekonomikliğin yanında, çevre dostu yakıt arayışı ağırlığını hissettirmektedir.

Anahtar Sözcükler: Endüstriyel tesis, Fuel-Oil, Doğalgaz, LPG, Çevresel etki

Bu çalışmada; ülkemizdeki endüstriyel tesislerde 80'li yıllardan itibaren kullanılan enerji kaynaklarındaki değişim ve sebepleri araştırılmıştır. Bir örnek uygulama olarak, Fuel-Oil ile çalışan bir sanayi tesisinin, LPG'ye dönüşüm sonrası durumunun teknik ve ekonomik incelemesi yapılmış, doğalgaz yakıtına geçiş şartları incelenmiş, gelecekte ülkede uygulanması gereken enerji düzenlemeleri hakkında öneriler sıralanmıştır.

GİRİŞ

Kirletici aşağıdaki gibi sınıflandırılırlar [1]:

- a. Kükürlü maddeler,
- b. Uçucu parçacıklar,
- c. Azotlu maddeler,
- d. Organik maddeler,
- e. Karbon monoksit,
- f. Halojenler
- g. Radyoaktif maddeler

Hava Kirliliği konusunda da kullanılan bazı temel terimler vardır. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır [2]:

- a. Kirleticiler : Su buharı dışında havada bulunan her cins maddedir.
- b. Emisyon : Bir kaynağın çıkış şartlarında havaya atılan; katı, sıvı ve gaz kirleticilerin tamamı olup, değerleri gaz ve buhar için; mg/m^3 veya emisyon debisi cinsinden de; g/h ve kg/h olarak verilir.
- c. İmisyon : Kirleticilerin etkili oldukları yerlerin yakınındaki konsantrasyonlardır. Genellikle yeryüzünün veya bitki yüzeylerinin 1,5 m üzerinden ölçülür.
- d. İncisyon : Atmosferde çok veya az kalın bir tabaka içindeki normal olarak sıcaklığın yukarıya doğru azalmasının aksine, sıcaklık artması halidir (Sıcaklık terselmesi).
- e. Kum : 76 mikrondan büyük SiO_2 orijinli parçacıklardır.
- f. Toz : 76 mikrondan küçük katı parçacıklardır.
- g. Tütsü : 0,0001-10 mikron arasındaki sıvı parçacıklardır.
- h. Sis : Görüntüyü engelleyecek derecede yoğun sıvı parçacıklardır.
- i. Duman : Uçan kül ve/veya eksik yanma ürünleri olup, sıvı veya katı biçimde bulunabilirler.
- j. İs : Eksik yanma ile ortaya çıkan yanmamış karbonun toplanmasıyla oluşan zerreciklerdir.
- k. Aerosol: Havada süspansiyon halinde bulunan parçacıklardır.

Endüstriyel tesisler üretimleri için enerji kullanırlar. Bu enerji üretimin önemli girdileri olup, enerjinin pahalıya mal olması, ürünün de fiyatını arttıracaktır. Son yıllarda sanayi tesisleri arasında Fuel-Oil tesislerinden LPG'ye dönüşüm hızlandığı gözlenmektedir. Yakıtın fiyatının getirdiği cazibeden başka, depolama, nakliye, yakma kolaylıkları, dönüşümün mevcut sisteme kolayca uyması gibi faktörler de LPG'ye dönüşümde etkili olmaktadır. Bu dönüşümde bir önemli nokta da, temiz yakıt kullanmaktan doğan "daha temiz baca emisyonlarıdır".

Endüstride kullanılan yakıtlar; katı, sıvı ve gaz yakıtlar olmak üzere üç çeşittir. Endüstride başlıca katı yakıt kömürdür. Kömürler linyit, taşkömürü, preslenmiş ve kok olarak piyasaya arz edilir. Kömürler aşağıdaki yöntemlerle yakılmaktadır [3]:

- Akışkan yatakta yakma,
- Toz kömürü püskürtme,
- Briketleme,
- Kömür-Su karışımı şeklinde yakma.

Sıvı yakıt sistemleri 6 numaralı Fuel-Oil kullanılmaktadır. Kalın olan yakıtın daha iyi yakılabilmesi için; ön ısıtma, su buharı ile pülverize etme ve parçalama yöntemleri kullanılmaktadır. Yakıtın brülörlerde yakılması için, yakma havası da ısıtılmaktadır[4].

Doğalgaz ve LPG gaz yakıtlar kategorisine girmektedir. Basit kimyasal yapıları sebebiyle kolayca havayla kolayca karışmakta ve yakılmaktadır. Doğalgazın ülkede yaygınlaşması ve LPG'nin de sanayi tesislerinde dökme gaz olarak artan talebi dikkati çekmektedir.

LPG'nin motor yakıtı olarak kullanılması için TSE tarafından hazırlanan TS 2178 Sıvılaştırılmış Petrol Gazları Standardına göre; LPG'nin çeşitleri ve özellikleri tespit edilmiştir. Buna göre LPG; Ticari Propan, Ticari Bütan, Ticari Propan-Bütan Karışımı ve Özel Hizmet Propanı olarak 4 çeşittir ve bu ürünlerin bazı özellikleri Tablo 1 'de verilmiştir.

Tablo 1. TS 2178'e Göre Sıvılaştırılmış Petrol Gazlarının Bazı Özellikleri [5].

Özellikler	Ticari Propan	Ticari Bütan	Ticari P - B Kaşımı	Özel Hizmet Propanı
Buhar Basıncı, (En yüksek - kPa)				
20 °C	930	103	Genel değer 1430	950
40 °C	1550	285		1550
45 °C	1720	345		1720
55 °C	2070	462		2070
Bütan veya daha ağır molekülü ürün, en çok (%)	2.5			2.5
Pentan veya daha ağır molekülü ürün, en çok (%)	—	2.0	2.0	—
Propilen miktarı % hacimce, en çok	—	—	—	5.0
Sıvı LPG'nin bir metre küpünün kütlesi (15.6 °C de), kg	509	582	—	509
Tutuşma Sıcaklığı (Havada) °C	493 - 549	482 - 538	—	493 - 549
Kükürt, (mg / kg) kütlece, en çok	185	140	140	123

Bu tablodan da anlaşılacağı gibi, ticari propan yüksek uçuculuk, ticari bütan ise düşük uçuculuk istenen yerlerde kullanılmaktadır. Bütan-Propan kaşımı da ortak özellikler istenen şartlarda kullanım alanı bulmaktadır.

Katı, sıvı ve gaz yakıtları mukayese etmek için Tablo 2 kullanılmıştır.

2. SANAYİ TESİSLERİNDE ÇEVRECİ YAKLAŞIMLAR

2.1. Yakıtların Çevresel Etkileri ve Yakma Sistemlerini Düzenleyen Kurallar

Yakıtlar yanma sonucunda çevreyi kirletici emisyonlar, katı ve sıvı maddeler çıkarırlar, endüstriyel tesiste buna benzer kirleticiler üretmektedir. Bu yüzden Yakma sistemlerinin çevresel etkileri ile ilgili kurallar konulmuştur. Bu kurallar; Milletlerarası Antlaşma ve Sözleşmeler ile Millî Mevzuat başlıkları altında incelenebilir.

Tablo 2. Çeşitli Yakıtların Karşılaştırılması [6].

Yakıt Cinsi	Kömür (linyit)	Fuel-Oil (No-6j)	LPG (dökme)
Nakliye	Masraflı	Kolay	Kolay
Depolama	Açıkta veya kapalı alanda	Depo halinde	Özel basınçlı kaptı
Yakma Şartları	Hazırlık, yakma ve izleme sistemi gerektirir.	Ön ısıtma, su buharı ile pülverize etme ve yakma havası kullanma.	Kolay ve basit.
Emisyonlar (g kirletici/kg yakıt)	Referans [7]		
PM	100,00	15,57	0,0031
Kükürt oksitler	50,00	31,30	0,149
Karbon monoksit	20,00	0,26	0,0031
Hidro karbonlar	3,00	0,26	0,00
Azot oksitler	4,00	9,08	0,908
Aldehitler	0,0025	0,20	0,078
Isıl Değer (kcal/ kg)	~ 6.340	9.200	11.200
Yanma verimi (%)	35	82	90

2.1.1. Milletlerarası Antlaşma ve Sözleşmeler

Türkiye Cumhuriyeti hükümetleri, Hava Kalitesi ile ilgili bazı milletlerarası sözleşme ve mutabakat metinlerini imzalamışlar ve bunlara uyacaklarını taahhüt etmişlerdir. Bu sözleşmelerin çalışmamızla ilgili bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Helsinki Kükürt oksitler Protokolü (1985)
- Sofya Azot oksitler Protokolü (1988)
- Oslo Kükürt oksitler Protokolü (1994)
- Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi - UNFCCC
- Uzun Menzilli Sınırlar Ötesi Hava Kirlenmesi Sözleşmesi
- Ozon Tabakasının Korunmasına Dair Viyana Sözleşmesi

2.1.2. Milli Mevzuat

Türkiye'nin milli mevzuatı, Anayasadaki ilgili maddeden başlayarak, ilgili kanunlar, Tüzükler, Yönetmelikler ve Standartlardan oluşmaktadır.

a) Anayasa

1982 Anayasasında çevre korunmasına dönük açık bir hüküm 56. Maddede şöyle yer almıştır:

"Herkes, sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkına sahiptir. Çevreyi geliştirmek, çevre sağlığını korumak ve çevre kirlenmesini önlemek Devletin ve vatandaşların görevidir.

Devlet, herkesin hayatını, beden ve ruh sağlığın içinde sürdürmesini sağlamak, insan ve madde gücünde tasarruf ve verimini arttırarak, işbirliğini gerçekleştirmek amacıyla sağlık kuruluşlarını tek elden planlayıp hizmet vermesini düzenler, vb..." [8].

b) Kanunlar ve Kanun Hükmünde Kararnameler

1983 yılında yürürlüğe giren 2872 sayılı Çevre Kanunu, Anayasanın 56. Maddesine istinaden çıkarılmış olup, 1984, 1989, 1990, 1991 tarihli Kanun Hükmünde Kararnamelerle ve 4.6.1986.ve 3.3.1988.tarihli kanunlarla değişikliklere uğramıştır. Bu kanun ilk olarak, "Çevre korunması", "Ekolojik denge", "Çevre kirliliği", "Kirlenen öder" ve "Alıcı ortam" gibi tanımlarda bulunmuştur. Hava Kirliliği ve kalitesini ilgilendiren kanuni dayanaklar şöyle sıralanabilir:

- 2872 sayılı Çevre Kanunu
- 443 Sayılı Çevre Bakanlığının Kuruluş ve Görevleri Hakkında KHK

c) Yönetmelikler

Hava Kirliliği ve kalitesini ilgilendiren yönetmelikler aşağıda sıralanmıştır:

- Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği
- Çevre Bakanlığı Mahalli Çevre Kurulları Çalışma Esas ve Usulleri Yönetmeliği
- Çevre Bakanlığı Yüksek Çevre Kurulu İle Çevre Teknik Komitesi Çalışma Esaslarına İlişkin Yönetmelik

- Zararlı Kimyasal Madde ve Ürünlerinin Kontrolü Yönetmeliği
- Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği
- Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik
- Çevresel Etki Değerlendirmesi - ÇED Yönetmeliği (1993)

d) Türk Standartları

TSE diğer konularda olduğu gibi hava ile de ilgili standartlaştırma çalışmaları yapmıştır. Bu Standartlar TSE katalogunda 13 numaralı "Çevre ve Sağlık Koruma, Güvenlik" ana başlığı altında toplanmıştır. Alt başlıkla ise sırayla;

- 13.020 başlığı Çevre koruma,
- 13.030 başlığı Katı atıklar,
- 13.040 başlığı Hava Kalitesi,
- 13.060 başlığı Su kalitesini

kapsayan standartları incelemektedir. 13.040 başlığı ile incelenen Hava Kalitesi standartları; bir ana başlık detayı ve beş alt başlıktan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla aşağıda verilmiştir:

- 13.040 Hava Kalitesi - 7 Standart
- 13.040.10 Genel kavramlar- 2 Standart
- 13.040.20 Çevre havası- 11 Standart
- 13.040.30 İşyeri havası- 2 Standart
- 13.040.40 Sabit kaynaklı emisyonlar
- 13.040.50 Taşıma araçları emisyonlar (10 Standart)

3. FUEL-OİL KULLANIMI VE ÇEVRE ETKİLERİ

3.1. Fuel-Oil Kullanımında Kayıplar

Sıvı yakıtların yakılmasında bazı mahzurlar öne çıkmaktadır. Bunların en önemlisi is teşekkülüdür. Yetersiz hava ile yakılan sıvı yakıtlarda oluşan is; 40-50 C ve 4-5 H atomundan oluşan bir is doğurmaktadır. Bu is molekülleri birleşerek, baca veya egzozdan kurum olarak çıkarlar [9]. İsi önlemek için alınacak tedbirler şöyle sıralanabilir:

- Yakıtta su ilavesi yapmak,
- Fazla yakma havası kullanmak,
- Yakıtta metalik katkıları ilave etmek,

3.2. Fuel-Oil Kullanımı ve Kirletici Emisyonlar

Sıvı yakıtların yanması sonucunda bazı çevre kirleticiler oluşur. Bunların bir kısmı yakıtın birleşiminde mevcut olup, diğerleri ise yanma şartlarına bağlıdır. Bu çalışmada incelenen yakıt olan 6 No. Fuel-Oil için bileşimde bulunan başlıca kirletici olan kükürt; % 3 - 4 oranındadır ve yanma sonunda kükürt dioksit oluşturur [10].

Sıvı yakıt kullanan endüstriyel tesislerde eksik yanma ve kısmi eksik yanma şartları sebebiyle de yanmış gazlar içinde; CO, H₂, CO₂, H₂O, SO₂ ve N₂ bulunmaktadır [11]

4. NG - LPG DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ VE ÇEVRE ETKİLERİ

4.1. Endüstriyel LPG Dönüşüm Sistemleri

Dökme LPG kullanan tesislerde; Donanımının tamamı kurucu gaz şirketi tarafından sağlanmakta ve tesis işleticiye kiralanmaktadır. Sistem ~ 1000 DM aylık kira ile kurulmakta ve sözleşmeye göre; ilk yıl muaf olmak üzere, 500 ton/yıl tüketim taahhüdü istenmekte, bundan az tüketim için, beher ton başına 30 DM ücret alınmaktadır[12].

4.1.1. Sistemin Yapısı ve Çalışması

Sistem bir toprak üstü LPG deposuna sahiptir. Bu deponun sıvı girişi mavi borulu ve 3 bar basınçlıdır. Denge faz hattı ise; gaz fazı için olup, sarı renktedir. Depo üzerinde duş tertibatı ve tanktaki sıvı yüzdesini gösteren Rotogage aleti vardır. Soğuk havalardaki ilk çalışmalar için; depo üzerinde san hattan propan alınmaktadır. Depodan alınan yakıt kapalı bir mahaldeki Buharlaştırma tanklarına gelmekte, burada ikili Basınç ve Sıcaklık Duyargalan ile sürekli ölçüme tabi tutulmaktadır. Tav fırınına giden gaza sıcak sulu "Refakat hattı" eşlik ettirilerek, soğuk havalarda yakıtın donmasına mani olunmaktadır [12].

4.1.2. Dönüşüm Sistemlerinin İncelenmesi

Tablo 3'de farklı sanayi tesisinde bulunan LPG' ye dönüşüm uygulaması verilmiştir.

4.2. Çevre Etkilerinin İncelenmesi

1989 yılında vilayet olan Kırıkkale'nin Hava Kirliliğine ait SO₂ ve PM ölçümleri 1990 yılından beri bütün yıl boyunca yarı otomatik cihazlarla Sağlık İl Müdürlüğüne yapılmaktadır. Bu ölçümler sonucunda, kentin SO₂ kirliliğine maruz kaldığı görülmüştür. Detaylı inceleme için Kırıkkale'nin 1989-1997 yılları Kış Dönemi kükürt dioksit ve duman değerleri Tablo-4'de verilmiştir. SO₂ değerleri incelendiğinde şunlar gözlenmiştir:

Tablo 3. Dönüşüm Yapan İşletmelerin Özellikleri

İŞLETME	ÇELBOR AŞ	ASÇELSAN AŞ	PIRİNÇSAN AŞ
Kullanma Yeri	Hadde öncesi LPG finni	Tav finni (dövme öncesi)	Tav finni (fişkırtma öncesi)
Kapasite	1.200.000 kcal/h	6.300.000 kcal/h	Kcal/h
Dönüşüm	Fuel-Oil → LPG'ye	Fuel-Oil — LPG'ye	Fuel-Oil -> LPG'ye
Amaç	Çevre koruma, Enerji tasarrufu ve Finn hacmini küçültmek	Enerji tasarrufu ve işletme kolaylığı	Enerji tasarrufu ve işletme kolaylığı
Yıllık sarfiyat	1 kg boru haddelemek için 0,5 kg Fuel-Oil yerine 0,1 kg LPG kullanılıyor.	LPG'li sistem % 14 daha az enerji maliyeti ile çalışmaktadır.	LPG'li sistemde % 10 enerji tasarrufu
LPG Dönüşüm Sistemi	Selnikel + Raysel	Selnikel + Raysel	Selnikel + Raysel
Tank Kapasitesi	115 m ³	115 m ³	35 m ³

- a) 1990-91 sezonu hariç, Yıllık ortalamalar diğer dönemlerde sınır değerler 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ün üzerindedir.
 b) Ortalama SO_2 değeri 237 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dür.
 c) En yüksek kükürt dioksit 1989-90 yılı kışında görülmüştür.
 d) 1994-95 yılından itibaren SO_2 değerlerinde düşüş vardır.

Duman Kirliliği incelendiğinde ise, görülen durum şudur:

- a) Ortalama PM değeri 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dür.
 b) En yüksek duman 1993-4 yılı kışında görülmüştür.
 c) Yıllık ortalamalar; UVS değer olan 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ü geçmemiştir.

Edinilen son bilgilere göre, kentin 2000 yılı SO_2 ortalaması 87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve PM ortalaması da 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak ölçülmüştür. Diğer yandan 2001 yılı Ocak-Şubat ayları SO_2 ortalaması 142 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve PM ortalaması da 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olmuştur.

Tablo 4. 1989-1997 Yılları Kış Dönemi (Ekim-Mart) SO_2 ve Duman Değerleri [13]

ÖLÇÜM	1989-90	1990-91	1991-92	1992-93	1993-94	Sınır Değeri (UVS)
SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	354	225	204	241	304	150
PM($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	106	100	64	79	109	200
ÖLÇÜM	1994-95	1995-96	1996-97	1997-98	1998-99	Sınır Değeri (UVS)
SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	211	184	145	58	96	150
PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	71	45	33	40	26	200

Bu sonuçlar Kırıkkale'de kış tipi SO_2 kirliliği olduğunu göstermektedir. Bu kirliliğe sanayi tesislerinin de katkısı olacağı açıktır.

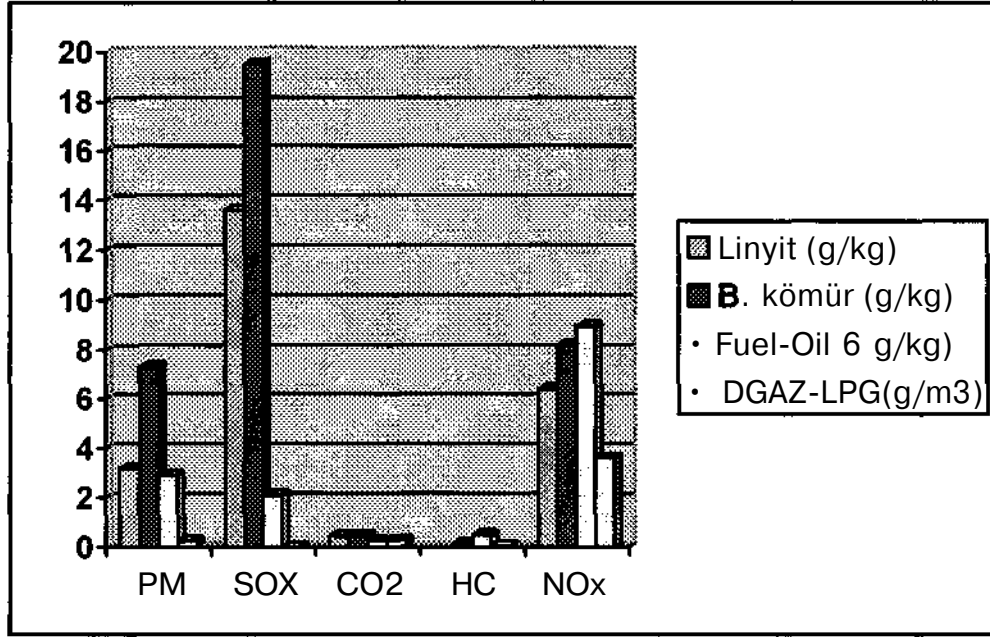
Diğer yandan sanayi tesisinin yaktığı yakıt cinsi, ortama deşarj edeceği kirletici emisyonlarının oranı açısından da önemlidir. Bu açıdan sanayi tesisinin ve yakıtın cinsine göre Emisyon Faktörlerine - EF Tablo-5'e göz atmakta fayda vardır. Tablo 5'de verilen emisyonlar hem 6 No. Fuel-Oil, hem de LPG için incelendiğinde; PM, SO_x , CO, HC NO_x açısından LPG'nin 6 No. Fuel-Oil'e göre "Çevre dostu" yakıt olduğu açıktır.

Tablo 5. Sabit Kaynakların Emisyon Faktörleri [14]

YAKIT CİNSİ	PM	SO_x	CO	HC	NO_x
KÖMÜR	(g/kg)	(f/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)
LİNYİT (Pülverize)	3,2 A	13,6 S	0,45	<0,45	6,4
BİTÜMLÜ KÖMÜR (Genel)	7,3 A	19,5 S	0,45	0,14	8,2
FUEL-OİL (No-6)	2,9	2,1 S	0,25	0,50	8,96
GAZ YAKITLAR	(R/ m^3)	(S/ m^3)	(g/ m^3)	(g/ m^3)	(g/ m^3)
DOĞALGAZ VE LPG	0,24	0,01	0,272	0,048	3,6

S : Yakıttaki kükürt yüzdesi, A : Yakıttaki kül yüzdesi

Bu Emisyon Faktörlerine göre yakıtların kirletici emisyonları Şekil 1 'de görülmektedir.



Şekil 1. Endüstriyel Tesislerde Kullanılan Yakıtların Emisyon Karşılaştırmaları

5. SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

Çevresel etkileri nedeniyle endüstriyel tesislerde NG ve LPG kullanımının zamanla artacağı görülmektedir. Yapılan çalışmada, Fuel-Oil ile bu gaz yakıtları kullanan endüstriyel tesislere ait yanma ürünleri karşılaştırılması yapıldığında aşağıdaki hususlar göze çarpmaktadır:

- PM açısından Emisyon % 3 oranında azalmaktadır.
- SO_x açısından Emisyon % 0,5 oranında azalmaktadır.
- CO açısından Emisyon % 109 oranında artmaktadır.
- HC açısından Emisyon 96 oranında azalmaktadır.
- NO_x açısından Emisyon 40 oranında azalmaktadır.

Buradan da anlaşılacağı gibi doğalgaz ve LPG karbon monoksit emisyonları dışında, diğer emisyonlar için 6 No. Fuel-Oil'den daha iyi emisyonlar vermektedir. Yani daha çevre dostu yanma sonuçlarına sahiptir.

6. KAYNAKÇA

- M. Tırıs ve ark, "Hava Kirliliği-Kaynakları ve Kontrolü", TÜBİTAK-MAM Yayını, Gebze, 1993.
- O. Borat, "Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği", SEGEM Yayını, Ankara, 1983.
- R. Yavuz, S. Küçükbayrak, "Kömür", O. Kural, (Editör), İstanbul, 1998. s. 434-439.
- Archie W., Culp, "Principles Of Energy Conversion", McGraw-Hill Book Co. International Edition, Singapore, 1991.
- TS 2178, "Sıvılaştırılmış Petrol Gazları", TSE, Nisan 1991.

6. N. Uçarsu, "Aşçelsan AŞ Yakıt Ekonomisi ve Sarfiyatı Dokümanları", MKE- Aşçelsan AŞ, Kırıkkale, 2000.
7. O. Borat, İ. Kadı, D. Çelik, "Hava Kirlenmesinde Motorlu Taşıtların Rolü", İstanbul First International Automotive Industry And Environment Conference And Exhibition. May 26-27, İstanbul, 1995.
8. G. Egeli, "Çevre Mezuatina Genel Bir Bakış", MMO Çevre ve Enerji Kongresi, 5-7 Haziran 1997, s. 207-223.
9. O. Borat ve ark. "Yanma (Aerotermokimya) Bilgisi", Teknik Eğitim Vakfı Yayınları-2, İstanbul/Ankara/Bursa, 1992
10. TÜPRAŞ, "Türkiye Petrol Rafinerileri AŞ Product Specifications, Fuel-Oil", İzmit, 1996.
11. O. Borat ve ark. "*Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği*", pp 9-10, İstanbul/Ankara/Bursa, (1992).
12. İpragaz ve Bizimgaz AŞ dokümanları, 1997.
13. M. E. Akay, "Kırıkkale'de Hava Kirliliği; Sebepler ve Çözümler", 6. Uluslararası Yanma Sempozyumu, 19-21 Temmuz, İstanbul, 1999.
14. M. Karaca, F. Ertürk, "Kömür Kaynaklı Hava Kirliliğinin Modellenmesi", "Kömür", O. Kural, (Editör), İstanbul, 1998. s. 639-650.

TMMOB Makina Mühendisleri Odası
II. GAP ve Sanayi Kongresi
29-30 Eylül 2001 Diyarbakır

RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN EKONOMİSİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Cem ONAT, Suat CANBAZOĞLU

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, MALATYA
Tel: 0 422 341 00 10 conat@inonu.edu.tr, [scanbazoglu\(5\)@inonu.edu.tr](mailto:scanbazoglu(5)@inonu.edu.tr)

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi, artık diğer enerji üretim kaynakları ile rekabet edebilen küresel bir güç üretim endüstrisi haline gelmiştir. Rüzgar enerjisi çevrim sistemlerine olan ilgi ve yatırımlar bütün dünya bazında gittikçe artış göstermektedir. Ülkemizde de bu konudaki, gerek bilimsel çalışmalara ve gerekse ticari faaliyetlere her geçen gün bir yenisi eklenmektedir. Bu çalışmamızda ekonomisi gün geçtikçe iyileşen rüzgar türbinlerinin maliyetlerine etki eden faktörler irdelenmiş olup, etüt ve analizi iyi yapılarak, rüzgar potansiyeli iyi olan yörelere kurulacak rüzgar türbinlerinin birçok ekonomik fayda sağlayacağı ortaya konmuştur.

1. GİRİŞ

Amerika'daki en büyük türbin üreticisinden biri olan Enron Rüzgar Şirketinin başkanı Kenneth C. Karas, rüzgar türbin büyüklüklerindeki artışın 1981'den bugüne maliyetleri önemli ölçüde azalttığını belirtmiştir. 1981 yılında yılda 45000 kWh enerji üreten 25 kW güç kapasiteli bir rüzgar türbininin maliyeti 2600 \$/kW iken, bugünün tipik rüzgar türbini olan 750kW kapasiteli rüzgar türbini 800 \$/kW yatırım maliyeti ile yılda 2.5 milyon kWh enerji üretebilmektedir.

Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğinin bir raporuna göre rüzgar türbinlerinin fiyatı 1981-1991 yılları arasında 3 misli azalmıştır. Washington'daki Yenilenebilir Enerji Politikaları Projesi bulgularına göre ise 1997 yılında 1000 \$/kW olan rüzgar türbinlerinin yatırım maliyetleri 2006 yılında 600 \$/kWa düşecektir.

22 Nisan 1999 tarihinde Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği tarafından yapılan basın açıklamasında dünya rüzgar kapasitesinin 10 000 MW'ı aştığı ve 2000'li yıllarda dünyada bu temiz enerji teknolojisinin giderek daha yaygın olarak kullanılmaya başlandığı duyurulmuştur.

Kapasitelerinin 10 000 MW'ı aştığı demek, 10 milyar dolar değerinde rüzgar türbininin satıldığı anlamına gelmektedir. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğinin iki yıl önceki hedefi Avrupa için 2010

yılında 40 000 MW, 2020 yılında ise 100000 MW rüzgar güç santral kapasitesini tesis etmektir. Ancak bu hedefin şimdi daha çok aşılacağı görülüyor.

Rüzgar enerjisinin en önemli çevresel yararı konvansiyonel elektrik üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında hava kirleticileri ve sera gazları emisyonları olmamasıdır.

Rüzgar enerjisi gelecekteki pazar başarısı için en önemli kriter olan ekonomik maliyette kararlı ve hızlı bir gelişme göstermektedir. 1990'lı yılların başında Pasifle Gas&Electric ve Electric Power Research Institute tarafından yapılan ve rüzgar enerjisinin en ucuz elektrik üretim kaynağı olacağına ilişkin uzun vadeli öngörüler artık hayal olmayıp gerçekleştirilmek üzeredir.

Kaliforniya Enerji Komisyonu, çeşitli enerji seçeneklerinin maliyetlerini ve pazara hazırlıklarını incelemektedir. Tablo 1'de temel yakıt tiplerinin maliyetleri rüzgar enerjisi maliyetleri ile karşılaştırılmaktadır [1].

Tablo 1. Rüzgar ve Diğer Enerji Kaynaklarının Karşılaştırmalı Maliyetleri

Yakıt	Maliyet (cent/kWh)
Kömür	4.8-5.5
Gaz	3.94.4
Hidrolik	5.1-11.3
Biomass	5.8-11.6
Nükleer	11.1-14.5
Rüzgar	4.0-6.0

2. SİSTEM MALİYETİ

Rüzgar türbinleri tarafından üretilen enerjinin maliyetini belirlemede, göz önüne alınması gereken en önemli faktörler, tesisin ilk maliyeti ve yıllık olarak üretilen enerjinin miktarıdır.

Ekonomiklik açısından incelendiğinde, diğer teknolojilerle üretilen enerjinin birim maliyeti ve satış fiyatı da önem kazanmaktadır. Ticari amaçla rüzgar türbini tesis etmek isteyenlerin değerlendirmesi gereken konular şunlardır.

a) İlk kuruluş maliyeti

- Alış fiyatı
- Nakliye
- Tesis maliyeti
- İthal vergisi tutarı
- Tesisin kapladığı alana ilişkin maliyet

b) Elektrik enerjisi üretimi

- Rüzgar türbininin verimi
- Rüzgar türbininin tipi ve büyüklüğü
- Rüzgar rejiminde görülen yıllık değişimler

- c) Sistem tarafından üretilen enerjinin satış fiyatı ile diğer teknolojilerle üretilen enerjinin satış fiyatlarının karşılaştırılması
- d) İşletme ve bakım masrafları
- e) Yasal mevzuat
- f) Enflasyon
- g) Amortisman [2]

3. YILLIK ENERJİ ÜRETİMİ

Rüzgar türbininin tesisinin planlandığı yörede, Δt_i zaman aralıklarında V_{ri} rüzgar hızlarının olması durumunda, tesis edilecek rüzgar türbininin üreteceği enerji için;

$$E = \eta_{kay} \cdot C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot n \cdot R^3 \cdot \sum_{i=1}^k \Delta t_i \cdot V_{ri}^3 \quad (\text{kWh/yıl}) \quad (1)$$

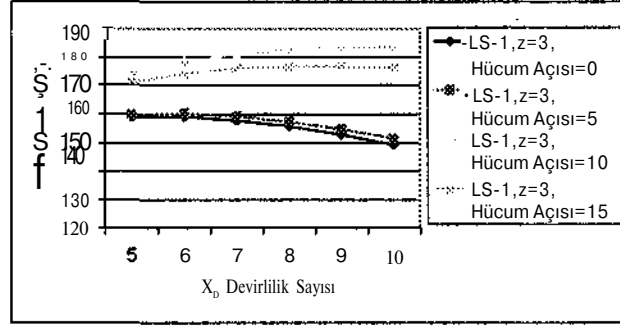
bağıntısı geçerlidir. Enerji eldesi hesabı yapılırken o yörede rüzgar hızının hangi aralıkta ne kadar süre estiği çok önemlidir. Bu formülde C_p güç katsayısını, ρ havanın yoğunluğunu, R pervane yarıçapını simgelemekte ($R=20$ m) ve r_{kay} ise; mil yataklarındaki sürtünme kayıplarını (örneğin 0.996), dış kutusundaki kayıpları (örneğin 0.972), elektrik jeneratöründeki kayıpları (örneğin 0.972) ve çeşitli elektrik-elektronik kayıpları (örneğin 0.94) içeren bir katsayı olup, bu kayıpların hepsinin çarpımına eşit olan bir genel (toplam) katsayıdır. Rüzgar türbini pervanesi üzerinde yaptığımız bu çalışmada, $\eta_{kay}=0.9$ olarak hesaba katılmıştır [3],

C_p güç katsayısı; dizayn devirlilik sayısı (k), hücum açısı (α), kanat sayısı (z) ve kanat profil tipine bağlı olarak değişen ve bütün olarak bir rüzgar türbinini karakterize edebilen bir katsayıdır.

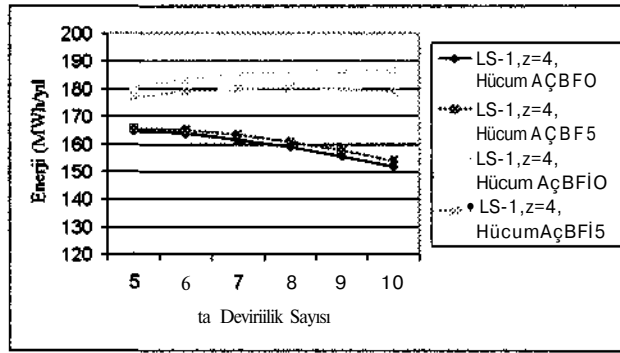
Tablo 2'de verilen Malatya ili için senelik rüzgar hızı değerleri [4] ve bunlara ait esme süreleri verilerine göre, önce belirli dizayn seçeneklerine göre değişim gösteren C_p güç katsayısı hesaplanarak ve denklem 1 kullanılarak, NACA 4415 ve LS-1 profiline sahip kanatların birçok dizayn seçeneğinde yapılan hesaplamalardan en iyi sonuçları veren seçenekler şekil 1 ve şekil 2'de verilmiştir[5].

Tablo 2. Malatya İli için Rüzgar Hızı Değerleri ve Esmeye Süreleri

Δt_i	1534	4100	1900	598	316
H=10m	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
H=42m	0.736	2.210	3.683	5.156	6.629
Δt_i	184	97	33	10	5
H=10m	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
H=42m	8.103	9.576	11.049	12.522	13.996



Şekil 1. Üç Kanatlı LS-1 Profilinden Bir Yılda Elde Edilebilecek Enerji Miktarının Dizayn Devirlilik Sayısına ve Hücüm Açısı ile Değişimi



Şekil 2. Dört Kanatlı LS-1 Profilinden Bir Yılda Elde Edilebilecek Enerji Miktarının Dizayn Devirlilik Sayısına ve Hücüm Açısı ile Değişimi

Şekil 1 ve şekil 2'den de anlaşılacağı gibi Malatya ili şartlarında, yerden 42 m yükseklikte ve R=20 m yarıçapındaki söz konusu dizayn seçeneğindeki rotordan maksimum enerji elde edilmektedir. En fazla enerji üretimini sağlayan bu dizayn seçeneğinde, yılda yaklaşık olarak 184 000 kWh enerji üretilebilir [5],

4. BİRİM ENERJİ MALİYETİ

C kapitali geri kazanma faktörü, Ü üretim maliyeti (TL), I servis, bakım ve sigorta giderleri (%), i faiz oranı (%), n amortisman süresi (yıl), C_T rüzgar türbininin toplam kuruluş maliyeti (TL) ve E yıllık üretilen enerji miktarı (kWh) olmak üzere;

$$C = \frac{i \cdot 1}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

$$u = \frac{C_T - (C+I)}{E} \quad (\text{TL/kWh}) \quad (3)$$

formülleri geçerlidir.

Rüzgar türbininin toplam kuruluş maliyeti; rüzgar türbinini taşıma ve dikme, kurma, trafo ve şebekeye bağlantı giderlerinden oluşmaktadır [6].

5. ÇEVREYE UYUM

Rüzgar enerjisi çevresel kirlilik yaratmayan bir enerji kaynağı olmasına rağmen çevrim sistemlerinin çok yaygın bir şekilde kullanılması halinde aşağıda sıralanan bozucu etkilere sebep olabilir [6].

- Çevre görünümünü bozması,
- Metal kanat kullanımı halinde FM ve TV sinyallerini bozması,
- İklim değişikliğine sebep olabilmesi,
- Toprak işgali.

6. EKONOMİKLİK

Rüzgar türbini-jeneratör grubunun dizaynı ve çalışma tarzı ne olursa olsun, en önemli parametre rüzgar-elektrik enerjisi dönüşüm sisteminin ekonomikliğidir. Yıllık ortalama enerji üretim faktörü (kapasite faktörü) k , bir yıl içinde üretilen enerjinin (E), tesisten elde edilebilecek maksimum enerjiye (P_r =tesis gücü) olan oranına eşittir.

$$k = \frac{E}{8760 \cdot P_r} \quad (4)$$

Rüzgar hızının sabit olmaması sebebi ile k değeri 1'den küçüktür ve genellikle 0.1-0.5 değerleri arasındadır, k 'nın yüksek değerli olması üretilen enerjinin maliyetinin düşük olmasını sağlar.

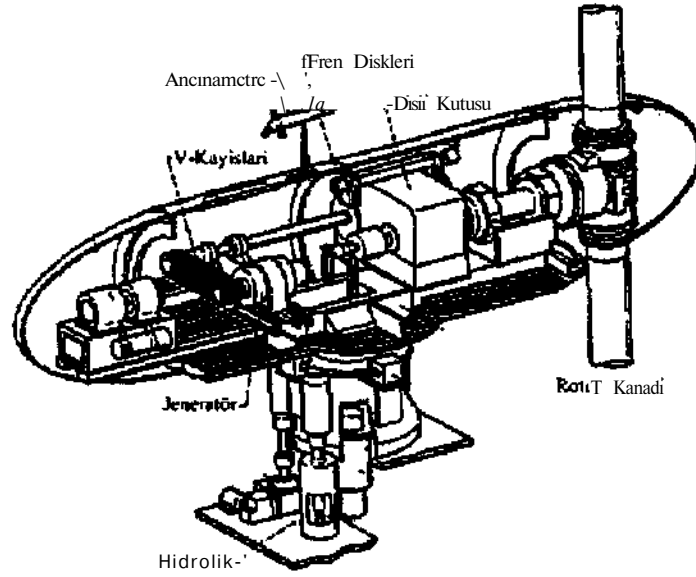
C_{oe} enerjinin maliyeti, A_c yıllık sabit fiyat ve O_m çalışma ve bakım masraflarını ifade etmek üzere enerjinin maliyetinin formülü;

$$C_{oe} = \frac{A_c + O_m}{E} \quad (\text{T L / k W h}) \quad (5)$$

olarak verilir.

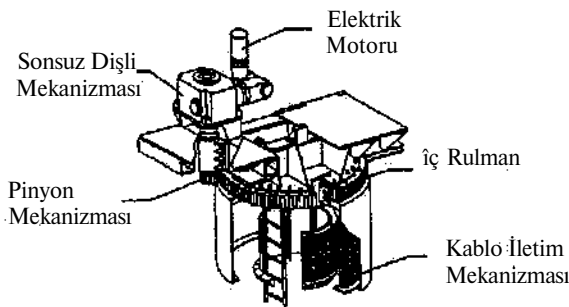
Yıllık sabit fiyat, tasan ve dizayn harcamalarından, sermayenin amortismanından, vergilerden ve sigorta giderlerinden oluşmaktadır. Yatırım sermayesinin %10-20'si yıllık masraflar olarak alınır ama vergilerdeki yükselmeler ve alçalmalar maliyete büyük ölçüde etki eder.

Bir rüzgar türbininde enerji maliyeti (C_{oe}), rüzgar türbininin kuruluş maliyetine bağlıdır. Rüzgar türbininin enerji üretkenliği ve diğer faktörler, yıldan yıla maliyetlerin değişmesine sebep olur. Şekil 3'de gösterilen tipik bir rüzgar türbininin genel olarak maliyeti aşağıdaki kısımlardan meydana gelir.

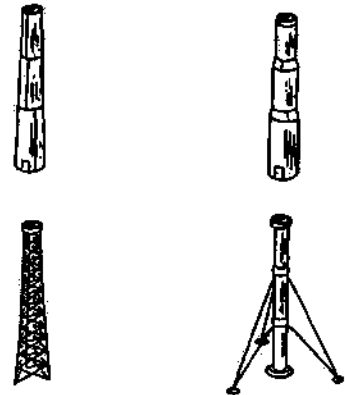


Şekil 3. Rüzgar Türbini Kesiti

- Rotor maliyeti; büyük ölçüde kanat sayısı ve rotor yarıçapı ile değişir.
- Konumlandırma mekanizması maliyeti; şekil 4'de gösterildiği gibi rotoru rüzgara yönelten mekanizmayı oluşturan elemanların hepsinin maliyetini kapsamaktadır.
- Transmisyon maliyeti.
- Jeneratör ve güç takımları maliyeti.
- Fren sistemi maliyeti.
- Esneme kontrol sistemi maliyeti.
- Kule ve temel maliyeti; şekil 5'de gösterildiği gibi çeşitli tipte inşa edilebilen kulelerin maliyeti büyük ölçüde yüksekliklerine bağlıdır [7],



Şekil 4. Konumlandırma Mekanizması



Şekil 5. Çeşitli Kule Tipleri

7. SONUÇ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının ulusal politika ile paralellik arz etmesi ve bu enerji türünün vergilerden etkilenmemesi sebebiyle ve fosil kökenli yakıtların fiyatlarındaki yükselme rüzgar enerjisine olan ilgiyi gün geçtikçe arttırmaktadır. Rüzgar enerjisi alanında dünyanın geçirmiş olduğu tecrübelerden faydalanarak ülkemizde de bu sistemlerin uygulamaları yaygınlaştırılmalıdır. Ülke şartlarımıza uygun rüzgar makinalarının imalatı yoluna gidilmeli veya ithal edilerek pilot projeler desteklenmeli ve projeler çerçevesinde araştırma-geliştirme çalışmaları birlikte yürütülmelidir. Bütün bunlar yapılmadan önce, rüzgar türbinlerinin amortisman sürelerini azaltacak en büyük faktör olan yıllık enerji üretiminin maksimum olacağı yörelerin belirlenmesi için güvenilir ölçüm yapabilecek ölçüm istasyonlarının kurulması gerekmektedir.

Sonuç olarak rüzgar türbininin ekonomikliği büyük ölçüde ilk kuruluş maliyetine ve söz konusu rüzgar türbininden elde edilebilen yıllık enerji miktarına bağlıdır. İlk kuruluş maliyetinde önemli yer teşkil eden rotor maliyeti, kanat sayısına ve rotor yarıçapına, kule ve temel maliyeti de, kule yüksekliğine bağımlı olarak değişmektedir. Ancak dikkat edilirse bu iki kıymet aynı zamanda yıllık enerji üretimi miktarına da direkt olarak etki etmektedir. Bunun içindir ki dizayn araştırmasında en fazla enerji üretimi şekil 1 ve şekil 2'nin karşılaştırılmasından anlaşılacağı gibi dört kanatlı rüzgar türbinlerinden sağlanacağı sonucu ortaya çıkmasına rağmen uygulamada genellikle üç kanatlı rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Bunun sebebi yukarıda da belirtildiği gibi dört kanatlı rüzgar türbinlerinin ilk kuruluş ve işletme maliyetinin üç kanatlı rüzgar türbinlerine göre daha fazla olmasına rağmen ve elde edilebilen enerji miktarları arasındaki farkın %2'yi geçmeyecek mertebelerden az olmasıdır.

8. KAYNAKÇA

1. **YILDIRIM H.**, Neden rüzgar enerjisi?, Dünya enerji, 7 Mayıs 2001, 16-19.
2. **DEHNİ B.**, Rüzgar gücünden yararlanmada Türkiye rüzgar gücü potansiyeli ve rüzgar türbinlerinin teorik çalışma esasları, Yüksek lisans tezi, YTÜ Türkiye, 1985.
3. **ÖZDAMAR A.**, Rüzgar türbini pervanesi dizaynı üzerine bir araştırma, Güneş günü sempozyumu 99, Kayseri, 25-27 Haziran 1999, 151-160.
4. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Verileri, 1999.
5. **ONAT C.**, Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Türkiye, 2001.
6. **ÇÖTEN A.**, Rüzgar Enerjisi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Türkiye, 1989.
7. **AVOLLONE A.**, Marks's Standart Handbook For Mechanical Engineers, Theodore Baumeister (Associate Editör), Eighth Edition.