



Türkiye’deki Bir Endüstriyel Tesis İçin Şebeke Bağlantılı Hibrit Enerji Sisteminin Homer ile Teknik ve Ekonomik Analizi

Technical and Economic Analysis of a Grid-Connected Hybrid Energy System for an Industrial Facility in Turkey Using HOMER

Berat ATICI , Hamza ÇAKAR 

Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yalova/Merkez
Yalova University Engineering Faculty Electrical and Electronics Engineering, Yalova/Merkez

Özet

Dünya genelinde artan enerji maliyetleri ve karbon emisyonu kısıtlamaları, enerji yoğun sanayi tesislerini alternatif çözüm arayışlarına itmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin önemli sanayi bölgelerinden biri olan Tekirdağ ili Çerkezköy ilçesindeki orta ölçekli bir endüstriyel tesisin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla şebeke bağlantılı (on-grid) bir hibrit enerji sistemi tasarlanmıştır. Çalışmada, tesisin gerçekçi üretim koşulları göz önüne alınarak günlük ortalama 1500 kWh enerji tüketimi ve 214,76 kW tepe yükü baz alınmıştır. HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen tekno-ekonomik analizlerde; Güneş (PV), Rüzgâr ve Şebeke kombinasyonları simüle edilmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre, bölge için en uygun sistem konfigürasyonunun 241 kW gücünde fotovoltaik panel, 7 adet 10 kW'lık rüzgâr türbini ve şebeke bağlantısından oluştuğu belirlenmiştir. Yüksek maliyetli batarya depolama sistemleri yerine şebekenin sanal bir depo olarak kullanıldığı bu sistemde, yıllık enerji ihtiyacının %68,8'i tamamen yenilenebilir kaynaklardan karşılanmaktadır. Ekonomik analizler, önerilen hibrit sistemin Birim Enerji Maliyetini (LCOE) şebeke fiyatı olan \$0,120/kWh seviyesinden \$0,0837/kWh seviyesine düşürdüğünü göstermektedir. Sistemin yatırım geri dönüş süresi 8,4 yıl, yatırım getirisi ise %7,2 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, Çerkezköy bölgesindeki sanayi tesisleri için rüzgâr ve güneş destekli hibrit sistemlerin hem ekonomik hem de çevresel açıdan uygulanabilir olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Hibrit Enerji Sistemleri, HOMER Pro, Güneş Enerjisi, Rüzgâr Enerjisi, Tekno-Ekonomik Analiz.

Abstract

Rising energy costs and strict carbon emission regulations worldwide are driving energy-intensive industrial facilities to seek alternative solutions. In this study, a grid-connected hybrid energy system was designed to meet the electricity demand of a medium-sized industrial facility located in Çerkezköy, Tekirdağ, one of Turkey's major industrial zones. The study is based on a realistic production scenario with a daily average energy consumption of 1500 kWh and a peak load of 214,76 kW. Techno-economic analyses were performed using HOMER Pro software to simulate combinations of Solar (PV), Wind, and Grid. Optimization results indicate that the most feasible system configuration consists of a 241 kW photovoltaic array, seven 10 kW wind turbines, and a grid connection. In this system, where the grid serves as virtual storage instead of high-cost battery systems, 68,8% of the annual energy demand is met entirely by renewable sources. Economic analyses show that the proposed hybrid system reduces the Levelized Cost of Energy (LCOE) from the grid price of \$0,120/kWh to \$0,0837/kWh. The payback period of the system is calculated as 8,4 years, with a Return on Investment (ROI) of 7,2%. These findings demonstrate that wind and solar-supported hybrid systems are both economically and environmentally viable for industrial facilities in the Çerkezköy region.

Keywords: Hybrid Energy Systems, HOMER Pro, Solar Energy, Wind Energy, Techno-Economic Analysis.

1. Giriş

Dünya genelinde artan sanayileşme hızı ve nüfus yoğunluğu, enerji talebinde benzeri görülmemiş bir artışa neden olmaktadır. Günümüzde bu talebin büyük bir kısmı halen fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz) ile karşılanmakta olup, bu durum hem enerji kaynaklarının tükenmesi riskini doğurmakta hem de sera gazı emisyonlarını artırarak küresel iklim değişikliğini tetiklemektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) raporlarına göre, sanayi sektörü küresel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ından sorumludur ve bu oranın yenilenebilir kaynaklarla desteklenmesi sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir [1]. Enerji arz güvenliğini sağlamak ve karbon ayak izini azaltmak amacıyla, güneş ve rüzgâr gibi alternatif enerji kaynaklarına yönelim modern mühendislik çalışmalarının odak noktası haline gelmiştir.

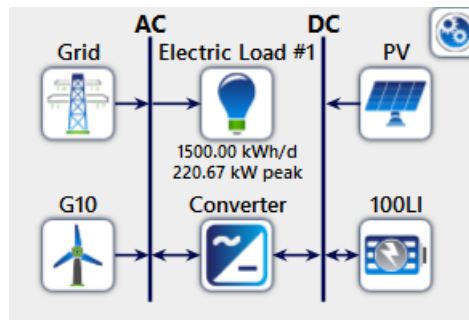
Yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu olmalarına rağmen, doğaları gereği kesintili üretim karakteristiğine sahiptirler. Güneşin sadece gündüz saatlerinde enerji sağlaması veya rüzgâr hızınının değişkenliği, bu kaynakların tek başına güvenilir bir enerji arzı sunmasını zorlaştırmaktadır. Bu problemi aşmak için farklı enerji kaynaklarının (Güneş, Rüzgâr, Şebeke, Batarya vb.) bir arada kullanıldığı hibrit enerji sistemleri geliştirilmiştir. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde, hibrit sistemlerin hem enerji maliyetlerini düşürdüğü hem de emisyonları minimize ettiği görülmektedir. Hibrit enerji sistemlerinin boyutlandırılması ve tekno-ekonomik analizi üzerine yapılan çalışmalarda, HOMER yazılımı, güvenilirliği ve optimizasyon yeteneği sayesinde literatürde en yaygın kullanılan araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır [2,3]. Örneğin Turkdogan [4], konut elektrik yükleri ve yakıt hücreli araçlar için tasarladığı yenilenebilir tabanlı hibrit sistem ile emisyonların sifıra indirilebileceğini ve ekonomik optimizasyonun sağlanabileceğini ortaya koymuştur.

Benzer şekilde, şebeke hattının ulaşmadığı veya maliyetli olduğu bölgelerde hibrit sistemlerin uygulanabilirliği üzerine de kapsamlı araştırmalar mevcuttur. Türkdoğan ve ark [5], 40 hanelik bir topluluğun hem elektrik hem de termal yük ihtiyacını karşılayan şebekeden bağımsız bir sistem tasarlamış ve bunun ekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Kırsal kalkınma bağlamında ise bir çiftlik evinin enerji ihtiyacının hibrit sistemlerle karşılanması üzerine yapılan bir diğer çalışmada, yerel meteorolojik verilerin sistem tasarımındaki kritik rolü vurgulanmıştır [6]. Sadece konutlarda değil, kamu binaları ve büyük ölçekli yapılarda da çatı üzeri fotovoltaik (PV) sistemlerin potansiyeli giderek önem kazanmaktadır. Arslan ve Türkdoğan [7] tarafından yapılan çalışmada, Yalova ilindeki kamu binaları için çatı üzeri PV kurulum potansiyeli incelenmiş ve mimari tasarımın enerji üretimine olan etkisi detaylandırılmıştır.

Mevcut literatür ışığında, bu çalışmanın amacı; Türkiye'nin en önemli sanayi üslerinden biri olan Tekirdağ-Çerkezköy bölgesindeki orta ölçekli bir endüstriyel tesis için şebeke bağlantılı hibrit enerji sisteminin tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmektir. Çalışmada, literatürdeki konut odaklı çalışmaların aksine, gündüz saatlerinde yoğunlaşan ve günlük ortalama 1500 kWh tüketimi olan gerçekçi bir sanayi yük profili ele alınmıştır. HOMER Pro yazılımı kullanılarak Güneş (PV), Rüzgâr ve Şebeke kombinasyonları simüle edilmiş; Net Bugünkü Maliyet ve Birim Enerji Maliyeti açısından en optimum sistem konfigürasyonu belirlenmiştir.

2. Sistem Tanıtımı

Önerilen sistem, temel olarak Tekirdağ ili Çerkezköy ilçesinde yer alan orta ölçekli bir endüstriyel tesisin elektrik yükünü karşılamak üzere tasarlanmıştır. Sistem, şebeke bağlantılı bir yapıda olup, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynakları entegre ederek işletmenin enerji maliyetlerini düşürmeyi ve karbon emisyonlarını minimize etmeyi hedeflemektedir. Şekil 1'de sistemin şematik diyagramı ve enerji akış modeli gösterilmiştir. Sistemin teknik ve ekonomik optimizasyonu, NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilen HOMER Pro (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1 Önerilen şebeke bağlantılı hibrit enerji sisteminin şematik diyagramı

Güneşin parladığı veya rüzgârın estiği anlarda sistem elektrik üretmekte ve bu enerji doğrudan fabrikanın elektrik yükünü beslemektedir. Üretilen yenilenebilir enerjinin anlık tüketimden fazla olduğu durumlarda, ihtiyaç fazlası enerji şebekeye satılarak işletmeye ek gelir sağlanmaktadır. Yenilenebilir kaynakların yetersiz kaldığı durumlarda ise (gece veya rüzgârsız saatlerde), enerji sürekliliğini sağlamak adına eksik kalan güç şebekeden otomatik olarak temin edilmektedir. Bu hibrit yapı, kesintili doğaya sahip yenilenebilir kaynakların dezavantajlarını şebeke desteği ile ortadan kaldırmaktadır.

Sistem, Türkiye'nin önemli sanayi bölgelerinden biri olan Çerkezköy'de, yaklaşık 41,28°K ve 28,00°D koordinatlarında konumlandırılmıştır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin başarısı, kurulum sahasındaki doğal kaynakların potansiyeline doğrudan bağlıdır. Bu çalışma için bölgenin yıllık güneş radyasyonu, rüzgâr hızı ve sıcaklık verileri NASA Surface Meteorology and Solar Energy Database [8] üzerinden alınmıştır. Tablo 1, bu verilerin aylık ortalamalarını özetlemektedir. Veriler incelendiğinde, güneş radyasyonunun yaz aylarında zirve yaptığı, rüzgâr hızının ise kış aylarında daha etkin olduğu görülmektedir; bu durum iki kaynağın birbirini tamamlayıcı bir karakteristikte olduğunu göstermektedir.

Ay	Güneş Radyasyonu (kWh/m ² /gün)	Rüzgâr Hızı (m/s)	Sıcaklık (°C)
Ocak	1,84	6,2	4,5
Şubat	2,55	6,4	5,2
Mart	3,68	5,9	7,8
Nisan	4,92	5,1	12,1
Mayıs	6,15	4,5	16,8
Haziran	6,98	4,2	21,5
Temmuz	7,12	4,8	23,9
Ağustos	6,25	4,9	23,6
Eylül	4,88	5,3	19,4
Ekim	3,15	5,6	15,2
Kasım	2,05	6,1	10,5
Aralık	1,58	6,5	7,5
Yıllık Ort.	4,26	7,5	8,5

Tablo 1. Çalışma bölgesi için NASA veri tabanından alınan aylık ortalama meteorolojik veriler.

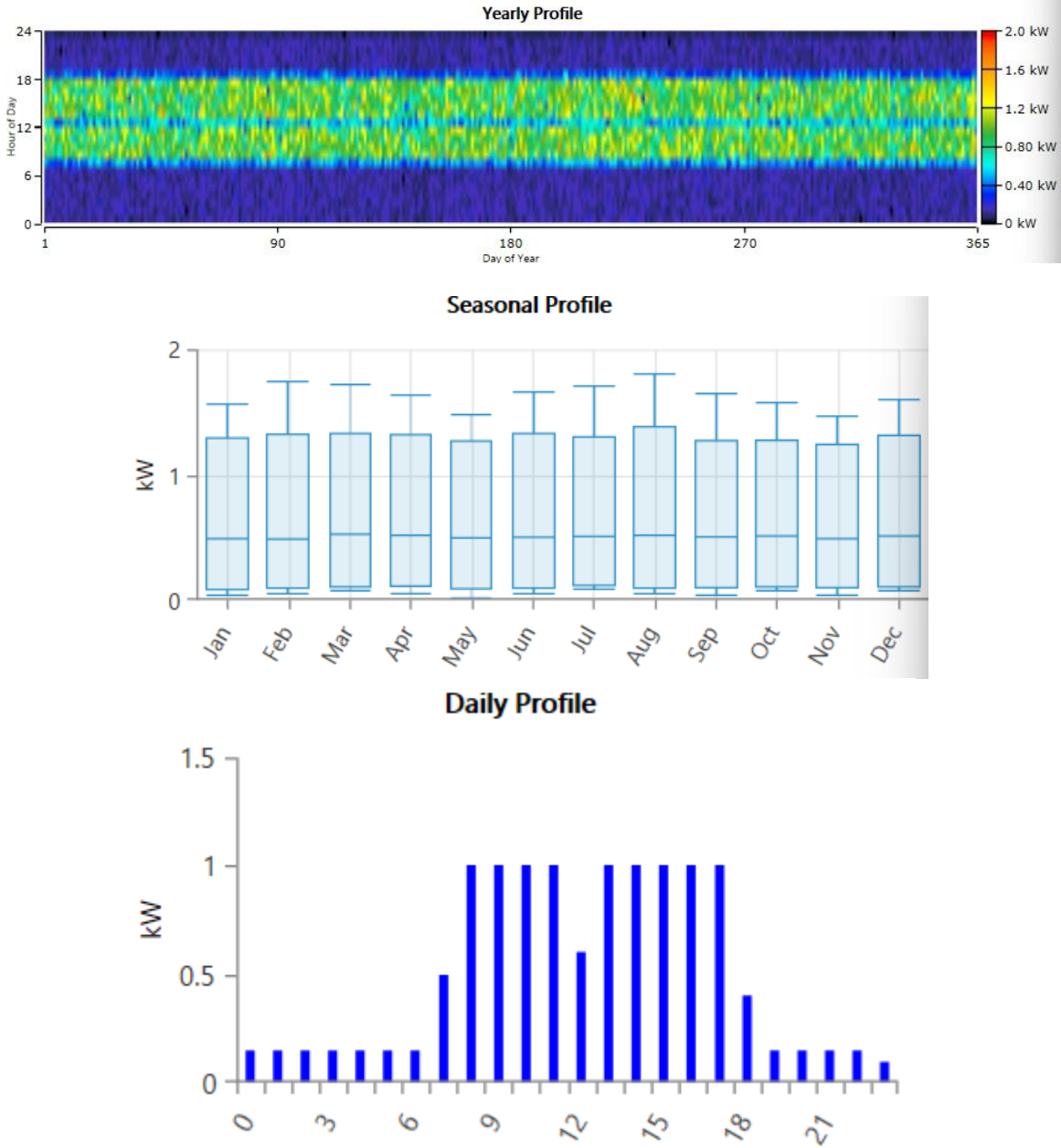
2.1. Yük Profili

Enerji sistemlerinin optimum tasarımı, yük profilinin doğru ve gerçekçi bir şekilde modellenmesine doğrudan bağlıdır. Yanlış bir yük analizi, sistemin ya gereğinden büyük (yüksek maliyetli) ya da ihtiyacı karşılayamayacak kadar küçük (yetersiz) tasarlanmasına neden olabilir. Bu çalışmada, Çerkezköy Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren orta ölçekli bir endüstriyel tesisin elektrik tüketim karakteristiği ele alınmıştır. Tesisin elektrik yük verileri HOMER Pro yazılımına entegre edilirken, gerçekçi bir sanayi senaryosu oluşturulmuştur. Tesisin günlük ortalama enerji tüketimi 1500 kWh olarak belirlenmiştir. Mesai saatleri içerisindeki (08:00 – 18:00) yoğun makine kullanımı ve motor kalkış akımları nedeniyle, sistemin anlık Tepe Yüğü 214,76 kW seviyesine ulaşmaktadır. Yük faktörü ise 0,29 olarak hesaplanmıştır.

Günlük Profil: Tesis, tek vardiya esaslı çalışmaktadır. Gece saatlerinde (23:00- 07:00) üretim durduğu için enerji tüketimi sadece güvenlik sistemleri, sunucular ve bekleme modundaki cihazlardan kaynaklı "baz yük" seviyesindedir. Saat 08:00 itibarıyla mesainin başlamasıyla tüketim hızla artmakta, gün boyu yüksek seviyede seyretmekte ve 18:00'deki paydos ile tekrar düşüşe geçmektedir.

Mevsimsel Profil: Konut tipi yüklerde görülen ısıtma/soğutma kaynaklı mevsimsel dalgalanmaların aksine, bu endüstriyel tesiste üretim yıl boyu devam ettiği için aylar arasında dramatik tüketim farkları gözlemlenmemiştir (Şekil 2).

Bu yük profilinin en önemli avantajı, enerji talebinin en yüksek olduğu saatlerin, güneş enerjisi üretiminin de en verimli olduğu öğle saatleri ile çakışmasıdır. Bu durum, üretilen güneş enerjisinin depolamaya ihtiyaç duyulmadan anlık olarak tüketilmesine olanak sağlamakta ve sistem verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 2 Endüstriyel tesisin saatlik, mevsimsel ve yıllık elektrik yük profili (Günlük ortalama: 1500 kWh).

2.2. Fotovoltaik (PV) Paneller

Çerkezköy bölgesinin güneş enerjisi potansiyelinden maksimum düzeyde faydalanmak amacıyla, sistemde "Generic Flat Plate" tipi polikristal fotovoltaik paneller kullanılmıştır. Bu paneller, özellikle sanayi tesisinin gündüz saatlerinde oluşan yüksek enerji talebini karşılamada birincil kaynak olarak görev yapmaktadır. Panellerin güç çıkışı, bölgenin anlık güneş radyasyonu ve ortam sıcaklığına bağlı olarak HOMER tarafından simüle edilmiştir. Simülasyonda, panellerin optimum verimle çalışabilmesi için eğim açısı, proje sahasının enlem derecesine karşılık gelen $41,28^\circ$ olarak sabitlenmiştir. Yansıma

kayıplarını minimize etmek adına zemin yansıtma oranı %20 olarak kabul edilmiştir. Sıcaklık artışının panel verimi üzerindeki negatif etkisini modellemek amacıyla güç sıcaklık katsayısı $-0,5 \% / ^\circ\text{C}$ olarak sisteme girilmiştir. Bu değer, Tablo 1'de verilen yaz aylarındaki yüksek sıcaklık değerlerinde panel çıkış gücünün ne kadar düşeceğini hesaplamada kritik bir rol oynamaktadır.

Ekonomik analizlerde, güncel piyasa koşulları ve teknolojideki gelişmeler göz önüne alınarak PV panellerin birim sermaye ve değişim maliyetleri \$800/kW olarak belirlenmiştir. Tozlanma, kablo kayıpları ve gölgelenme gibi faktörleri hesaba katan "Azaltma Faktörü" %80 seviyesinde tutulmuş olup, panellerin kullanım ömrü sistem ömrüyle eşdeğer olacak şekilde 25 yıl olarak tanımlanmıştır.

2.3. Rüzgâr Türbini

Güneş enerjisi sistemlerinin en büyük dezavantajı olan gece saatlerinde ve kapalı havalarda üretim yapamama durumu, rüzgâr enerjisi entegrasyonu ile aşılmıştır. Çerkezköy bölgesi, özellikle kış aylarında ve güneşin yetersiz olduğu zaman dilimlerinde sahip olduğu rüzgâr potansiyeli ile hibrit sistemler için elverişli bir konumdadır. Bu çalışmada, enerji arz güvenliğini artırmak ve şebekeden çekilen pahalı enerjiyi minimize etmek amacıyla sisteme rüzgâr türbinleri dahil edilmiştir.

Yapılan optimizasyon analizleri sonucunda, sistemin ihtiyacına en uygun çözümün Generic 10 kW kapasiteli yatay eksenli rüzgâr türbinleri olduğu belirlenmiştir. Simülasyon, sistemin optimum çalışması için bu türbinlerden toplam 7 adet (Toplam 70 kW) kurulmasını öngörmüştür. Türbinlerin göbek yüksekliği, bölgedeki rüzgâr verimliliğini maksimize etmek adına 24 metre olarak ayarlanmıştır.

HOMER simülasyonunda kullanılan rüzgâr türbinlerinin teknik ve ekonomik parametreleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Her bir türbinin ilk yatırım maliyeti \$15.000, değişim maliyeti \$15.000 ve yıllık işletme-bakım maliyeti ise \$500/yıl olarak belirlenmiştir. Türbinlerin teknik ömrü 20 yıl olup, proje ömrü (25 yıl) içerisinde bir kez yenileme gerektireceği hesaplamalara dahil edilmiştir. Türbinlerin güç üretim eğrisi, 4 m/s rüzgâr hızında devreye girecek ve rüzgâr hızı arttıkça kübik bir artış gösterecek şekilde modellenmiştir.

Bileşen	Parametre	Değer / Birim
PV Panel	Tipi	Generic Flat Plate
	Sermaye Maliyeti	\$800 / kW
	Değişim Maliyeti	\$800 / kW
	Ömür	25 Yıl
Rüzgâr Türbini	Model	Generic 10 kW (G10)
	Adet Gücü	10 kW
	Sermaye Maliyeti	\$15,000 / adet
	İşletme Bakım	\$500 / yıl
	Ömür	20 Yıl
Konvertör	Verim	%95
	Sermaye Maliyeti	\$300 / kW

Şebeke	Elektrik Alış Fiyatı	\$0,12 / kWh
	Elektrik Satış Fiyatı	\$0,05 / kWh

Tablo 2. Hibrit sistem bileşenlerinin teknik ve ekonomik parametreleri.

2.4. Güç Konvertörü

Fotovoltaik panellerin ürettiği elektrik Doğru Akım (DC) formundayken, endüstriyel tesisin yükleri ve şebeke altyapısı Alternatif Akım (AC) ile çalışmaktadır. Enerji formları arasındaki bu uyumsuzluğu gidermek ve sistem bileşenleri arasındaki güç akışını yönetmek için sisteme çift yönlü bir güç konvertörü entegre edilmiştir. Konvertör, DC gücü AC güce dönüştürerek (inverter modu) yükü beslemekte veya üretim fazlası enerjiyi şebekeye aktarmaktadır.

Sistemin güvenilirliği açısından kritik bir role sahip olan konvertörün verimliliği, her iki yöndeki dönüşüm için (DC-AC ve AC-DC) %95 olarak kabul edilmiştir. Ekonomik analizlerde konvertörün sermaye maliyeti ve değişim maliyeti \$300/kW olarak sisteme girilmiş, kullanım ömrü ise 15 yıl olarak belirlenmiştir.

HOMER Pro ile yapılan optimizasyon sonucunda, tesisin 214,76 kW'lık tepe yükü ve PV/Rüzgâr üretim dengesi göz önüne alındığında, sistemin kararlı çalışabilmesi için 144 kW kapasiteli bir konvertörün en uygun çözüm olduğu tespit edilmiştir.

2.5. Şebeke Bağlantısı

Önerilen sistemde yüksek yatırım maliyetine sahip batarya grupları yerine, şebeke hattının kendisi bir enerji depolama birimi gibi kullanılmıştır. "On-Grid" (Şebeke Bağlantılı) topolojisi sayesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının (Güneş ve Rüzgâr) talebi karşılayamadığı anlarda enerji kesintisi riski ortadan kaldırılmış ve sistemin güvenilirliği %100 seviyesine çıkarılmıştır.

HOMER simülasyonunda şebeke, "sonsuz kapasiteli bara" olarak modellenmiştir. Enerji yönetimi stratejisi şu prensibe dayanmaktadır:

- **Öz Tüketim:** Üretilen yeşil enerji öncelikle fabrikanın anlık yükünü karşılar.
- **Satış:** Üretimin tüketimden fazla olduğu durumlarda, fazlalık enerji şebekeye satılarak gelir elde edilir.
- **Satın Alma:** Üretimin yetersiz olduğu durumlarda eksik kısım şebekeden tamamlanır.

Ekonomik analizlerde, Türkiye'deki sanayi tarifeleri referans alınarak şebekeden elektrik alış birim fiyatı \$0,12/kWh, şebekeye satış fiyatı ise \$0,05/kWh olarak tanımlanmıştır. Bu strateji, sistemin ilk yatırım maliyetini düşürürken, işletmenin enerji faturasını minimize etmesini sağlamıştır.

3. Analiz ve Yöntem

Bu çalışmada, önerilen hibrit enerji sisteminin tekno-ekonomik analizi için HOMER Pro yazılımı kullanılmıştır. Sistemdeki güneş panelleri ve rüzgâr türbinlerinin güç çıkışları ile sistemin ekonomik parametreleri (NPC, COE), aşağıda detaylandırılan temel matematiksel modeller kullanılarak hesaplanmıştır.

3.1. Fotovoltaik Güç Hesabı

Fotovoltaik (PV) panellerden elde edilen güç çıkışı, güneş radyasyonu ve hücre sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. HOMER, PV panelin güç çıkışını hesaplamak için denklem (1)'i kullanır.

$$P_{PV} = Y_{PV} F_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_P (T_C - T_{C,STC})] \quad (1)$$

Burada:

- Y_{PV} : STC altındaki nominal panel gücü (kW)
- F_{PV} : PV kayıp faktörü (derating factor) (%)
- G_T : PV yüzeyine düşen anlık güneş radyasyonu (kW/m²)
- $G_{T,STC}$: STC altındaki referans radyasyon (kW/m²)
- α_P : Güç sıcaklık katsayısı (%/°C)
- T_C : Anlık hücre sıcaklığı (°C)
- $T_{C,STC}$: STC altındaki hücre sıcaklığıdır (25 °C)

3.2. Rüzgâr Gücü Hesabı

Rüzgâr türbininin üreteceği güç, rüzgâr hızına doğrudan bağlıdır. Ancak meteorolojik veriler genellikle belirli bir yükseklikteki rüzgâr hızını verir. Türbinin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızını hesaplamak için denklem (2) kullanılır.

$$V_{hub} = V_{anem} \frac{\ln(H_{hub}/H_0)}{\ln(H_{anem}/H_0)} \quad (2)$$

Burada;

- V_{hub} : Türbin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
- V_{anem} : Anemometre yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
- H_{hub} : Rüzgar türbinin göbek yüksekliği (m)
- H_{anem} : Anemometre yüksekliği (m)
- H_0 : Yüzey pürüzlülük uzunluğudur (m)

3.3. Ekonomik Analiz Denklemleri

Sistemin ekonomik fizibilitesini belirlemek için Net Bugünkü Maliyet (NPC) ve Birim Enerji Maliyeti (COE) parametreleri hesaplanmıştır. Yıllıklandırılmış toplam maliyet sermaye Geri Kazanım Faktörü (CRF) ve NPC kullanılarak denklem (3) ile bulunur.

$$AnnC = CRF(i, n) \times NPC \quad (3)$$

Burada CRF, faiz oranı (i) ve proje ömrüne (n) bağlı olarak denklem (4) ile hesaplanır.

$$CRF(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4)$$

Ekonomik analizde kullanılan reel faiz oranı (i), nominal faiz oranı (i') ve enflasyon oranı (f) dikkate alınarak denklem (5) ile elde edilir.

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (5)$$

Son olarak, sistemin ekonomik karşılaştırmasında en önemli parametre olan Birim Enerji Maliyeti (COE), yıllık toplam maliyetin yıllık hizmet edilen toplam yüke (E_{served}) bölünmesiyle denklem (6)'daki gibi hesaplanır.

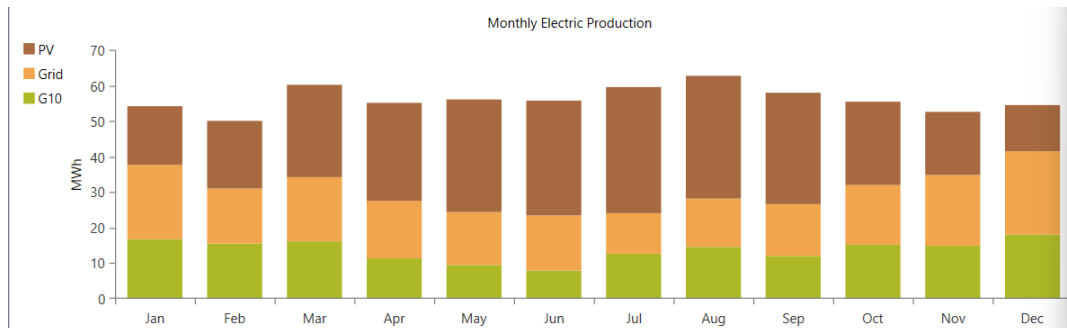
$$COE = \frac{AnnC}{E_{served}} \quad (6)$$

4. Sonuçlar ve tartışma

HOMER Pro, hibrit enerji sistemi için binlerce farklı konfigürasyonu simüle etmiş ve bu seçenekleri Net Bugünkü Maliyet (NPC) değerine göre küçükten büyüğe doğru sıralamıştır. Yapılan optimizasyon sonucunda, Çerkezköy'deki endüstriyel tesisin yük profili ve meteorolojik verileri için teknik ve ekonomik açıdan en uygun sistem mimarisinin PV-Rüzgâr-Şebeke (Grid) kombinasyonu olduğu belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre "Kazanan Sistem" 241 kW gücünde Fotovoltaik (PV) panel dizisi, 7 adet (toplam 70 kW) Rüzgâr Türbini, 144 kW kapasiteli konvertör ve Şebeke bağlantısından oluşmaktadır. Batarya (Li-Ion) maliyetlerinin yüksek olması ve şebekenin güvenilir bir depolama birimi gibi davranması sebebiyle, optimizasyon algoritması batarya kullanımını ekonomik bulmamış ve sistemden çıkarmıştır. Sistemin ekonomik verileri incelendiğinde, önerilen hibrit yapının toplam Net Bugünkü Maliyeti (NPC) \$696,176 olarak hesaplanmıştır. Sistemin ilk kurulum maliyeti \$340,913 seviyesindedir. En kritik parametre olan Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti ise \$0,0837/kWh olarak gerçekleşmiştir.

Sistemin ekonomik başarısını değerlendirmek için mevcut durum Sadece Şebeke ile kıyaslama yapılmıştır. Hiçbir yenilenebilir enerji kaynağının olmadığı, sadece şebekeden enerji satın alınan senaryoda NPC \$849,338 ve enerji birim maliyeti \$0,120/kWh'tır. Dolayısıyla önerilen hibrit sistem, işletmeye proje ömrü boyunca ciddi bir tasarruf sağlamaktadır. Yatırımın Geri Dönüş Süresi 8,4 yıl ve Yatırımın Getirisi %7,2 olarak hesaplanmıştır.

4.2. Enerji Üretim Dağılımı



Şekil 3 Hibrit sistemin kaynaklara göre aylık elektrik üretim dağılımı (Yeşil: Rüzgâr, Kahverengi: Güneş, Sarı: Şebeke)

Önerilen sistemin yıllık toplam elektrik üretimi 674,399 kWh/yıl olarak gerçekleşmiştir. Bu üretimin kaynaklara göre dağılımı ve yüzdelik oranları Şekil 3'te detaylı olarak gösterilmiştir.

- Fotovoltaik Paneller (Kahverengi): Yıllık 308,771 kWh üretim ile toplam enerjinin %45,8'ini karşılamaktadır.
- Rüzgâr Türbinleri (Yeşil): Yıllık 164,765 kWh üretim ile sisteme %24,4 oranında katkı sağlamaktadır.
- Şebeke Alımı (Sarı): Yıllık 200,862 kWh ile toplam ihtiyacın %29,8'i şebekeden temin edilmektedir.

Şekil 3'teki aylık üretim grafiği incelendiğinde, yenilenebilir kaynakların birbirini tamamlayıcı etkisi net bir şekilde görülmektedir. Güneş enerjisi üretimi (kahverengi sütunlar), güneşlenme süresinin uzun olduğu Mayıs-Ağustos ayları arasında zirve yaparken; rüzgâr enerjisi (yeşil sütunlar) kış aylarında ve güneşin olmadığı dönemlerde baz yükü desteklemektedir. Sonuç olarak sistem, tesisin enerji ihtiyacının %68,8'ini tamamen yenilenebilir kaynaklardan karşılayarak karbon emisyonlarını minimize etmiştir.

5. Sonuç

Bu çalışmada, Türkiye'nin yoğun sanayi bölgelerinden biri olan Tekirdağ-Çerkezköy'deki orta ölçekli bir endüstriyel tesisin elektrik ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanan şebeke bağlantılı hibrit enerji sisteminin tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, artan enerji maliyetlerini düşürmek ve karbon emisyonlarını azaltarak sürdürülebilir bir üretim modeli oluşturmaktır. Bu doğrultuda, bölgenin meteorolojik verileri ve tesisin günlük 1500 kWh'lik gerçekçi yük profili HOMER Pro yazılımı ile simüle edilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, tesis için teknik ve ekonomik açıdan en uygun sistemin Fotovoltaik (PV)- Rüzgâr- Şebeke kombinasyonu olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmiştir:

1. **Sistem Mimarisi:** Optimum sistem; 241 kW PV, 70 kW Rüzgâr ve 144 kW Konvertörden oluşmaktadır. Batarya yerine şebekenin sanal depo olarak kullanılması maliyeti minimize etmiştir.
2. **Yenilenebilir Enerji:** Sistem, tesisin yıllık enerji ihtiyacının %68,8'ini tamamen yenilenebilir kaynaklardan karşılamaktadır.
3. **Ekonomik Tasarruf:** Birim enerji maliyeti, şebeke fiyatı olan \$0,120/kWh'ten \$0,0837/kWh seviyesine düşürülmüş ve işletmeye %30 oranında tasarruf sağlanmıştır.
4. **Yatırımın Geri Dönüşü:** \$340,913 ilk yatırım maliyetine sahip sistemin geri dönüş süresi 8,4 yıl, yatırım getirisi ise %7,2 olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, Çerkezköy bölgesindeki sanayi tesisleri için rüzgâr ve güneş enerjisi destekli hibrit sistemlerin, batarya maliyetine katlanmadan da uygulanabilir ve karlı olduğu kanıtlanmıştır. Bu çalışma, sanayide "Yeşil Dönüşüm" hedeflerine ulaşmak isteyen işletmeler için hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir yol haritası sunmaktadır.

Kaynaklar

- [1].IEA. "World Energy Outlook 2022." International Energy Agency, Paris (2022). <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
- [2].Bahramara, Shamsodin, M. P. Moghaddam, and M. R. Haghifam. "Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (2016): 609-620.
- [3].Sinha, Sunanda, and S. S. Chandel. "Review of software tools for hybrid renewable energy systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014): 192-205.
- [4].Turkdogan, Sunay. "Design and optimization of a solely renewable based hybrid energy system for residential electrical load and fuel cell electric vehicle." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 24.2 (2021): 397-404.
- [5].Türkdoğan, Sunay, Muhammet Talha Mercan, and Tuğçe Çatal. "Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri kullanılarak 40 hanelik bir topluluğun elektrik ve termal yük ihtiyacının karşılanması: Teknik ve ekonomik analizleri." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 18 (2020): 476-485.
- [6].Türkdoğan, Sunay, Serkan Dilber, and Barış Çam. "Hibrit Enerji Sistemlerinin Şebekeden Bağımsız Bir Çiftlik Evinde Uygulanabilirliğinin Ekonomik ve Teknik Açıdan İncelenmesi." *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 3.2 (2018): 52-65.
- [7].Arslan, Furkan, and Sunay Türkdoğan. "Kamu binalarında çatı üzeri fotovoltaik panel kurulum potansiyelinin belirlenmesi ve enerji üretim artışı için mimari tasarımın ele alınması: Yalova ili örneği." *Journal of Innovative Engineering and Natural Science* 2.2 (2022): 76-94.
- [8].Stackhouse, Paul W., et al. "The NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) project." *Bulletin of the American Meteorological Society* 85 (2004).