

	<b>YALOVA ÜNİVERSİTESİ</b> <b>ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ</b> <b>HİBRİT ELEKTRİK SİSTEMLERİ PROJESİ</b>	
	<b>YALOVA UNIVERSITY</b> <b>ELECTRICAL-ELECTRONICS ENGINEERING</b> <b>HYBRID ELECTRICAL SYSTEMS PROJECT</b>	

**YALOVA İLİNDE ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ KONUTLAR İÇİN POMPAJ  
DEPOLAMALI HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN TEKNO-EKONOMİK ANALİZİ**  
**TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF PUMPED HYDRO STORAGE HYBRID  
ENERGY SYSTEM FOR OFF-GRID RESIDENCES IN YALOVA PROVINCE**

*Faruk SULAR, Alper Yasin ÇILDIR, Derya Deniz PEKBAY*

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

**Özet**

*Bu çalışmada, Yalova ilindeki kırsal ve şebekeden bağımsız konutların elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla Fotovoltaik (PV), rüzgâr ve Pompaj Depolamalı Hidroelektrik (PHS) tabanlı hibrit bir enerji sistemi tasarlanmış ve tekno-ekonomik açıdan analiz edilmiştir. Geleneksel elektrokimyasal bataryaların sınırlı çevrim, yüksek maliyet, ve çevresel etkilerine alternatif olarak, su rezervuarı temelli mekanik bir enerji depolama sistemi önerilmiştir. Sistem, HOMER Pro yazılımı kullanılarak modellenmiş ve optimize edilmiştir. Gündüz saatlerinde yenilenebilir kaynaklardan elde edilen fazla enerji ile su, 20 m düşü yüksekliğine sahip üst rezervuara pompalanmakta; gece saatlerinde ise depolanan potansiyel enerji hidro türbin aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Simülasyon sonuçları, sistemin %100 oranında yenilenebilir enerji sağladığını, Toplam Net Bugünkü Maliyetin (NPC) 676.453 TL ve Seviyelendirilmiş Enerji Maliyetinin (COE) 7,97 TL/kWh olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, küçük ölçekli ve bataryasız hibrit sistemlerde PHS entegrasyonunun teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir bir çözüm olduğunu göstermektedir.*

**Anahtar kelimeler:** HOMER, Yenilenebilir enerji, Hibrit sistem, Pompaj Depolamalı Hidroelektrik, PV panel.

## **Abstract**

*In this study, a hybrid energy system based on photovoltaic (PV), wind, and pumped hydro storage (PHS) was designed and techno-economically analyzed to meet the electricity demand of rural and off-grid residences in Yalova. As an alternative to conventional electrochemical batteries with high investment costs, limited cycle life, and environmental impacts, a water reservoir-based mechanical energy storage approach is proposed. The system was modeled and optimized using HOMER Pro software. During daytime, excess energy generated from renewable sources is used to pump water to an upper reservoir with a head of 20 m, while at night the stored potential energy is converted into electrical energy through a hydro turbine. Simulation results indicate that the system operates with 100% renewable energy, with a Total Net Present Cost (NPC) of 676.453 TL and a Levelized Cost of Energy (COE) of 7.97 TL/kWh. The results demonstrate that PHS integration is a technically and economically feasible solution for small-scale, battery-less hybrid energy systems.*

**Keywords:** HOMER, Renewable energy, Hybrid system, Pumped Hydro Storage, PV panels

## **1.GİRİŞ**

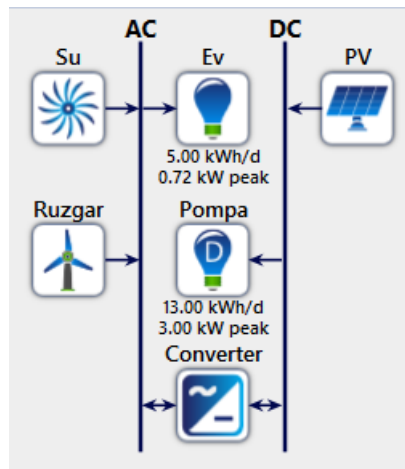
Küresel ölçekte artan enerji talebi ve fosil yakıt rezervlerinin hızla azalması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu hâle getirmiştir. Güneş ve rüzgâr enerjisi, temiz ve sürdürülebilir olmalarına rağmen kesintili olmaları nedeniyle arz güvenliği açısından enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda, konutların elektrik yükü ve farklı enerji ihtiyaçları için sadece yenilenebilir kaynaklara dayalı hibrit sistemlerin tasarımı ve optimizasyonu üzerine yoğunlaşmıştır [1]. Özellikle kırsal kesimlerde veya şebekeden bağımsız (off-grid) çiftlik evlerinde hibrit enerji sistemlerinin uygulanabilirliği hem teknik hem de ekonomik açıdan incelenmiş ve fosil yakıtlı sistemlere göre avantajları ortaya konulmuştur [2, 3].

Şebekeden bağımsız sistemlerde enerji depolama amacıyla yaygın olarak Li-Ion ve Kurşun-Asit bataryalar kullanılmaktadır. Ancak bu bataryalar; sınırlı kullanım ömrü, yüksek yenileme maliyetleri ve bertaraf sürecinde ortaya çıkan çevresel riskler nedeniyle uzun vadede sürdürülebilirliği olmayan çözümlerdir. Ayrıca Yalova ili örneğinde olduğu gibi, mimari tasarım ve çatı üzeri kurulum potansiyelleri değerlendirildiğinde, yenilenebilir enerji üretiminin artırılması şehrin yapısı nedeniyle mümkündür [4]. Bu bağlamda, üretilen fazla enerjinin verimli depolanması önemlidir. Bu çalışmada, batarya kullanımını minimize eden veya tamamen ortadan kaldıran, potansiyel enerji prensibine dayalı küçük ölçekli Pompaj Depolamalı Hidroelektrik PHS bir sistem tavsiye edilmiştir. Enerjinin suyun yüksekliğinde depolanması sayesinde çevre dostu, uzun ömürlü ve düşük bakım maliyetli bir enerji depolama

alternatifi sunulmaktadır. Çalışma kapsamında Yalova iklim verileri kullanılarak PV-Rüzgâr-PHS hibrit sistemi HOMER Pro ile simüle edilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

## 2. SİSTEM TANITIMI

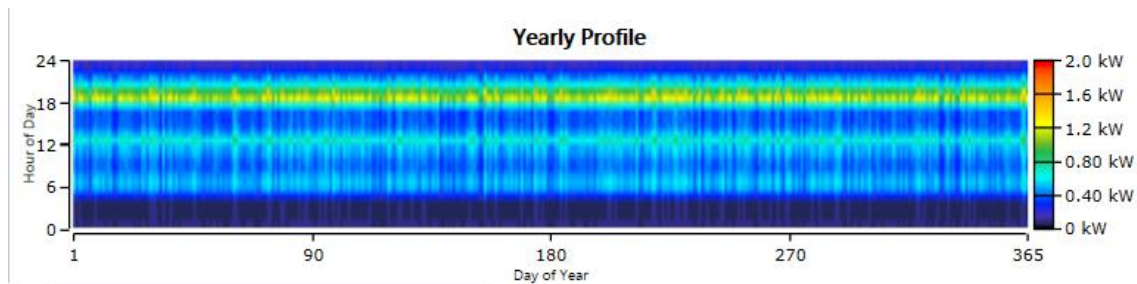
Tasarlanan hibrit enerji sistemi; PV paneller, rüzgâr türbini, pompa-türbin-rezervuar bileşenlerinden oluşan pompaj depolamalı hidroelektrik ünite ve elektrik yükünden oluşmaktadır. Sistem performansı ve ekonomik analizi HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışma alanı olarak Yalova ili seçilmiş olup, bölgenin güneş radyasyonu ve rüzgâr hızı verileri NASA Prediction of Worldwide Energy Resources veri tabanından elde edilmiştir [5].



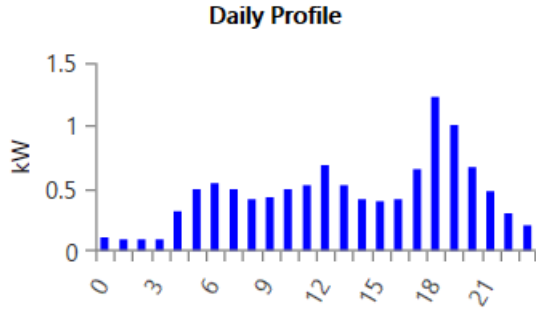
Şekil 2: Hibrit sistem modeli

### 2.1. Yük Profili

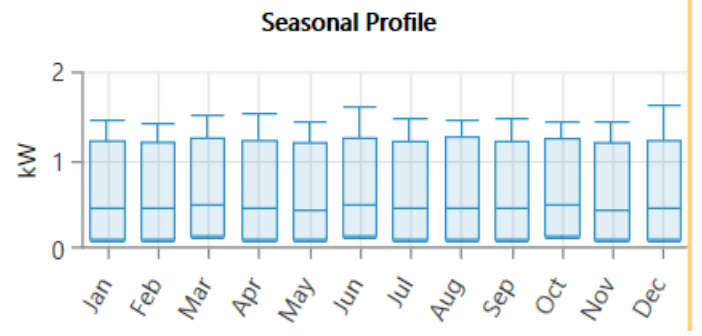
Sistem, günlük ortalama 8 kWh elektrik tüketimine ve yaklaşık 0,99 kW tepe gücüne sahip , şebekeden bağımsız müstakil bir konut için tasarlanmıştır. Aydınlatma, buzdolabı ve temel ev aletleri gibi kritik yüklerin kesintisiz beslenmesi hedeflenmiş olup enerjinin sürekliliği planlanmıştır. Su pompası ise sistemde ertelenebilir yük olarak modellenmiş olup, yalnızca güneş ve rüzgâr enerjisinin fazla olduğu zaman dilimlerinde çalışarak su rezervuarını doldurmaktadır.



Şekil 1: Yılın Bir Günü Yük Profiline Çalışma Eğrisi



Şekil 3: Günlük Ortalama Elektrik Enerji Tüketim Profili

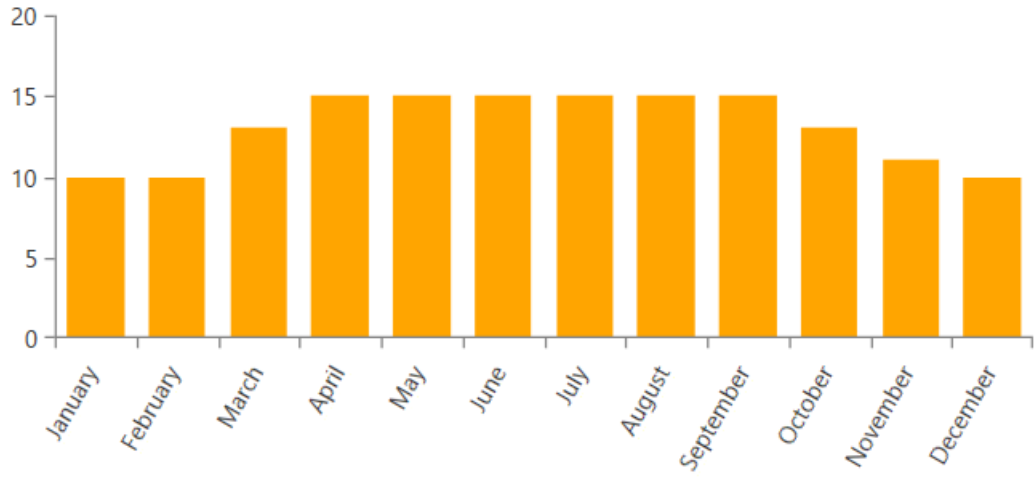


Şekil 4 : Yıllık Ortalama Elektrik Enerji Tüketim Profili

## 2.2. Pompaj Depolamalı Sistem Tasarımı

Batarya yerine su döngüsüne dayalı depolama yaklaşımının fizibilitesi aşağıdaki tasarım parametreleri dikkate alınarak kurgulanmıştır:

- **Net Düşü Yüksekliği (Head):** 20 m
- **Günlük Su Hacmi:** Yaklaşık 120 – 150m<sup>3</sup>
- **Depolama Kapasitesi:** 15 kWh (Elektriksel karşılık)
- **Türbin İşletmesi:** Gündüz pompalanan su, gece boyunca yaklaşık 14 saatlik periyotta türbinden geçirilerek 330 W sabit baz yükü karşılamaktadır.



Şekil 5: Su Pompasının Aylık Çalışma Profili

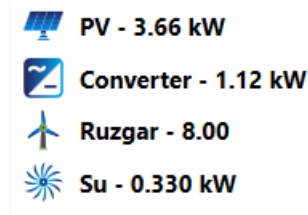
### 2.3. Optimize Edilmiş Sistem Mimarisi

HOMER Pro ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, Yalova ilindeki çalışma sahası için teknik ve ekonomik açıdan en uygun sistem konfigürasyonu belirlenmiştir. Önerilen sistem; 3.66 kW gücünde PV panel, 8.00 kW gücünde rüzgâr türbini, 0.33 kW nominal güce sahip hidroelektrik türbin ve 1.12 kW kapasiteli konvertörden oluşmaktadır. Sistemde kullanılan bileşenlerin kapasite ve maliyet detayları *Tablo 1*'de sunulmuştur.

Architecture				Cost				PV		Ruzgar			Converter		Su
PV (kW)	Ruzgar	Su (kW)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (€)	COE (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Capital Cost (€)	Production (kWh/yr)	Capital Cost (€)	Production (kWh/yr)	O&M Cost (€)	Rectifier Mean Output (kW)	Mean Output (kW)
3.66	8	0.330	1.12	CC	€676,453	€7.97	€1,340	€659,126	118,790	6,236	440,000	10,152	40.0	0.210	0.485

*Tablo 1: Optimize edilen hibrit sistem bileşenleri ve maliyet özeti.*

Sistemin ekonomik analizinde NPC **676.453 TL**, COE ise **7,97 TL/kWh** olarak hesaplanmıştır. Yıllık işletme maliyeti (Operating Cost) 1.340 TL seviyesindedir. İlk yatırım maliyetinin büyük kısmını rüzgâr türbini ve PV paneller oluştururken, işletme maliyetlerinin düşüklüğü sistemin uzun vadeli fizibilitesini artırmaktadır.



*Şekil 6: Optimize Edilen Hibrit Sistem Bileşenleri*

### 2.4. Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Bileşenleri

- **PV Paneller:** Sistemin ana enerji kaynağı olan PV Paneller kış aylarındaki düşük ışınım koşulları göz önünde bulundurularak toplam 3.66 kW kurulu güce sahip olacak şekilde seçilmiştir.
- **Rüzgâr Türbini:** Güneş üretiminin düşük olduğu bulutlu günlerde ve gece saatlerinde sistemi desteklemek amacıyla 8 kW kurulu gücünde rüzgâr türbini sisteme eklenmiştir.
- **Konvertör:** DC ve AC baralar arasındaki enerji akışını sağlamak için 1.12 kW kapasiteli bir konvertör kullanılmıştır.

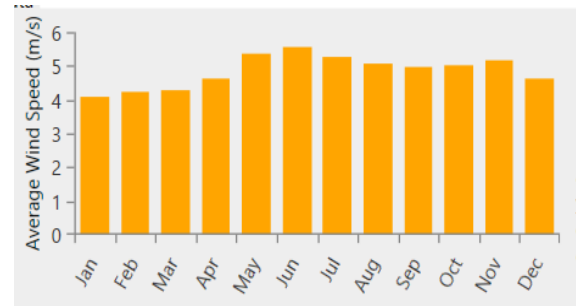
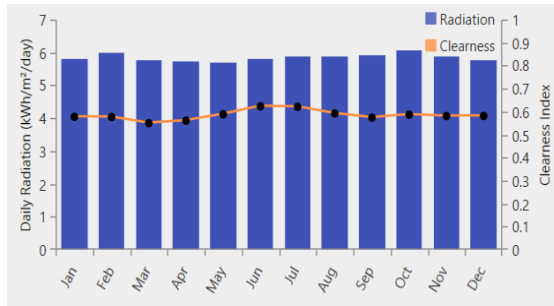
### 3. ANALİZ VE YÖNTEM

Sistemin boyutlandırılmasında Yük Takibi (Load Following) stratejisi benimsenmiştir. Pompaj depolamalı sistemin matematiksel modellemesinde suyun potansiyel enerjisi (Eşitlik 1) ve türbin çıkış gücü (Eşitlik 2) temel alınmıştır.

$$E_{pot} = \frac{m \cdot g \cdot h}{3.6 \times 10^6} \quad (1)$$

$$P_{out} = \rho \cdot g \cdot h_{net} \cdot Q \cdot \eta_{turbine} \quad (2)$$

Burada  $m$  su kütlesini (kg),  $g$  yerçekimi ivmesini ( $9.81m/s^2$ )  $h$  yüksekliği (m),  $\rho$  suyun yoğunluğunu,  $Q$  debiyi ( $m^3/s$ ) ve  $\eta$  verimi ifade etmektedir. Sistemin 14 saatlik gece periyodunda ihtiyaç duyduğu 330 W sürekli güç çıkışını sağlamak amacıyla, 20 m net düşü yüksekliği ve %70 türbin verimi varsayımları altında gerekli türbin tasarım debisi yaklaşık 2.4 L/s olarak hesaplanmış ve simülasyon parametrelerine entegre edilmiştir. Pompa yükü ise, kayıplar ve verim faktörleri göz önüne alınarak günlük 13-15 kWh ertelenebilir yük olarak tanımlanmıştır.

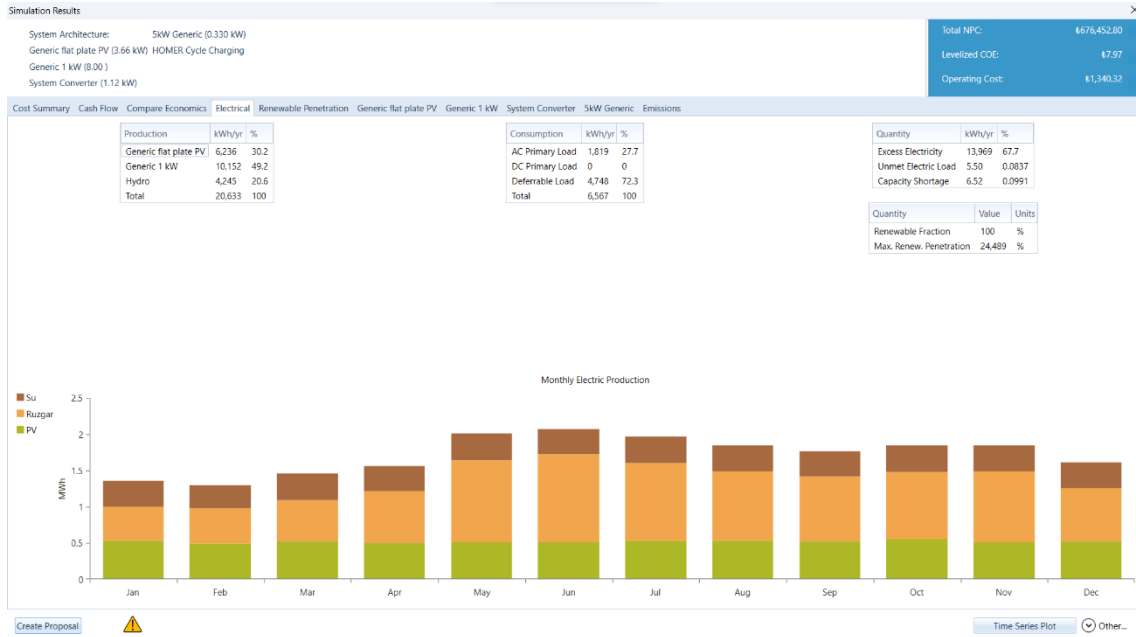


### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 4.1. Elektriksel Üretim ve Tüketim Analizi

Tasarlanan hibrit sistemin yıllık toplam elektrik üretimi 20.633 kWh olarak gerçekleşmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretime katkı oranları incelendiğinde; rüzgâr enerjisi 10.152 kWh/yıl (%49,2) ile en büyük paya sahipken, bunu 6.236 kWh/yıl (%30,2) ile güneş enerjisi ve 4.245 kWh/yıl (%20,6) ile hidroelektrik enerji takip etmektedir. Sistemin %100 yenilenebilir enerji ile çalıştığı doğrulanmıştır.

Tüketim tarafında ise; konutun AC birincil yükü yıllık 1.819 kWh (%27,7) iken, suyu yukarı basmak için pompada harcanan enerji (Defferable Load) 4.748 kWh (%72,3) olarak gerçekleşmiştir. Şebekeden bağımsız sistemlerde arz güvenliğini sağlamak ve kış aylarındaki en kötü senaryolara hazırlıklı olmak amacıyla sistem kapasitesi geniş tutulmuştur; bu durum yıllık 13.969 kWh (%67,7) oranında bir fazlalık enerji oluşumuna neden olmuştur. Bu fazla enerji, elektrikli araç şarjı veya ek ısıtma yükleri için kullanılabilir potansiyele sahiptir.

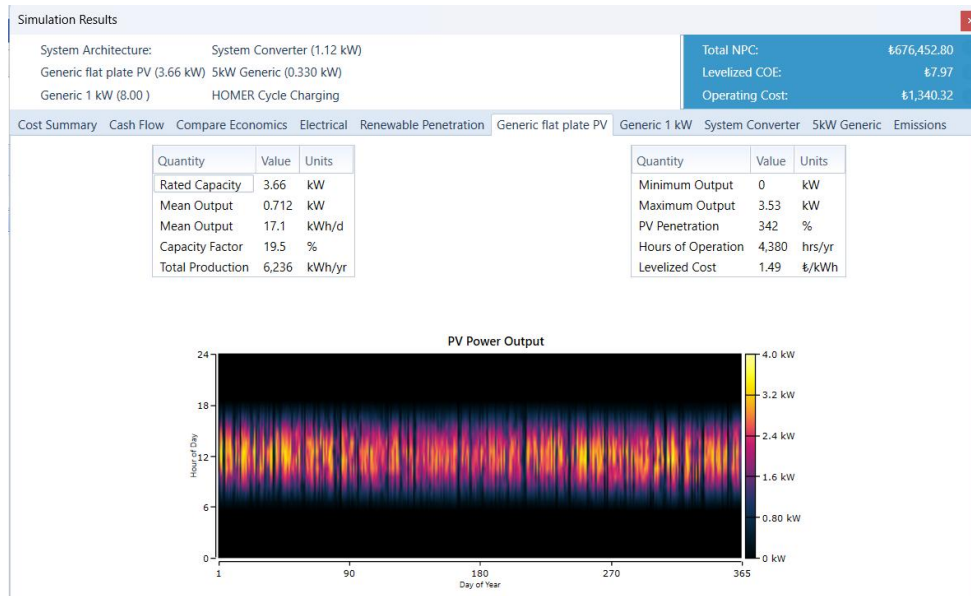


Şekil 6: Aylık elektrik üretim potansiyeli ve kaynaklara göre dağılımı.

## 4.2. Bileşen Bazlı Performans Analizi

### 4.2.1. Fotovoltaik (PV) Sistem Performansı

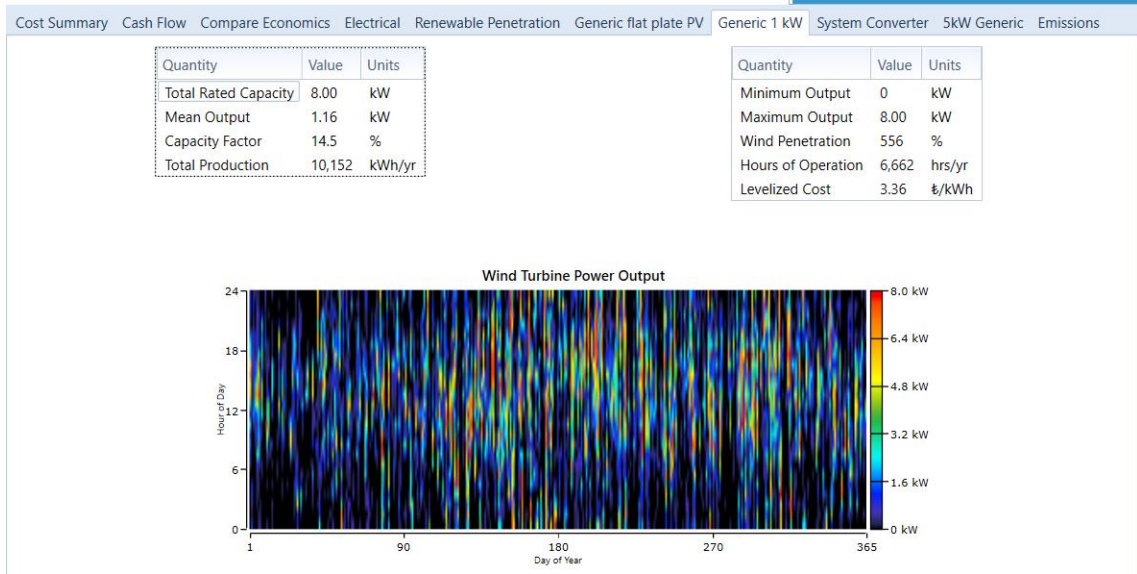
Sistemde kullanılan 3.66 kW kurulu güce sahip PV panellerin yıllık ortalama güç çıkışı 0,712 kW olarak hesaplanmıştır. Panellerin kapasite faktörü %19,5 olup, günde ortalama 17,1 kWh enerji üretmektedir. Şekil 7’de görülen PV güç çıkışı grafiği, üretimin sadece gündüz saatlerinde (06:00 – 18:00) yoğunlaştığını ve mevsimsel olarak yaz aylarında arttığını doğrulamaktadır.



Şekil 7: PV Panellerin Yıllık Güç Çıkış Yoğunluk Grafiği.

#### 4.2.2. Rüzgâr Türbini Performansı

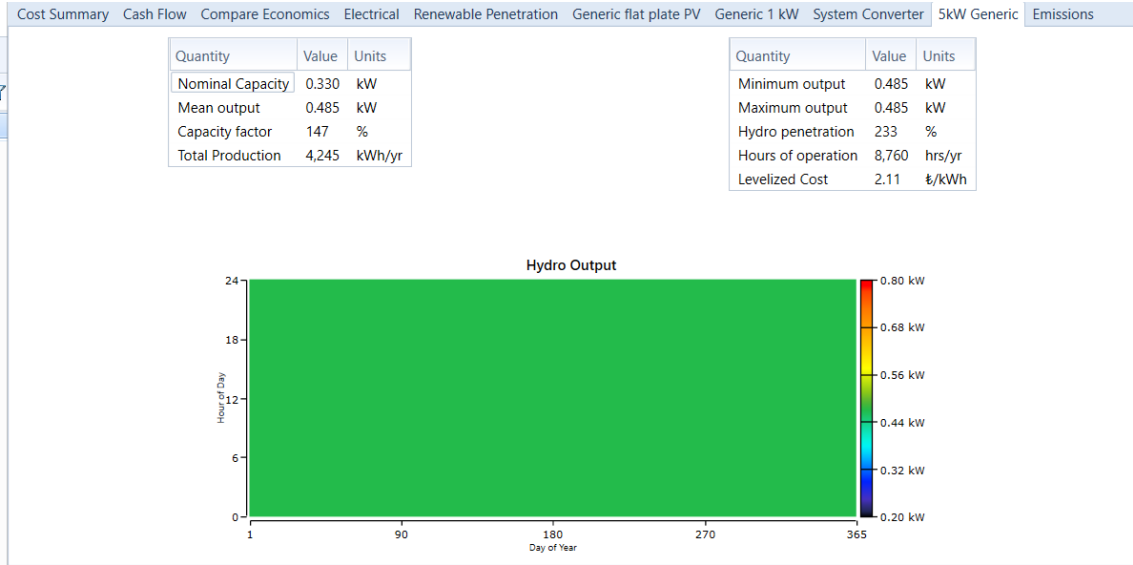
Sistemin ana enerji sağlayıcısı olan 8 kW'lık rüzgâr türbini, %14,5 kapasite faktörü ile çalışmaktadır. Ortalama güç çıkışı 1,16 kW seviyesindedir. Şekil 8'deki güç çıkış grafiği incelendiğinde, rüzgârın günün her saatinde düzensiz ancak sürekli bir üretim sağladığı, bu sayede güneşin olmadığı gece saatlerinde de sistemi desteklediği görülmektedir. Rüzgârın stokastik yapısı, PHS düzenleyici etkisine duyulan ihtiyacı artırmaktadır.



Şekil 8: Rüzgâr Türbini Güç Çıkış Profili.

#### 4.2.3. Hidroelektrik Türbin ve Depolama Performansı

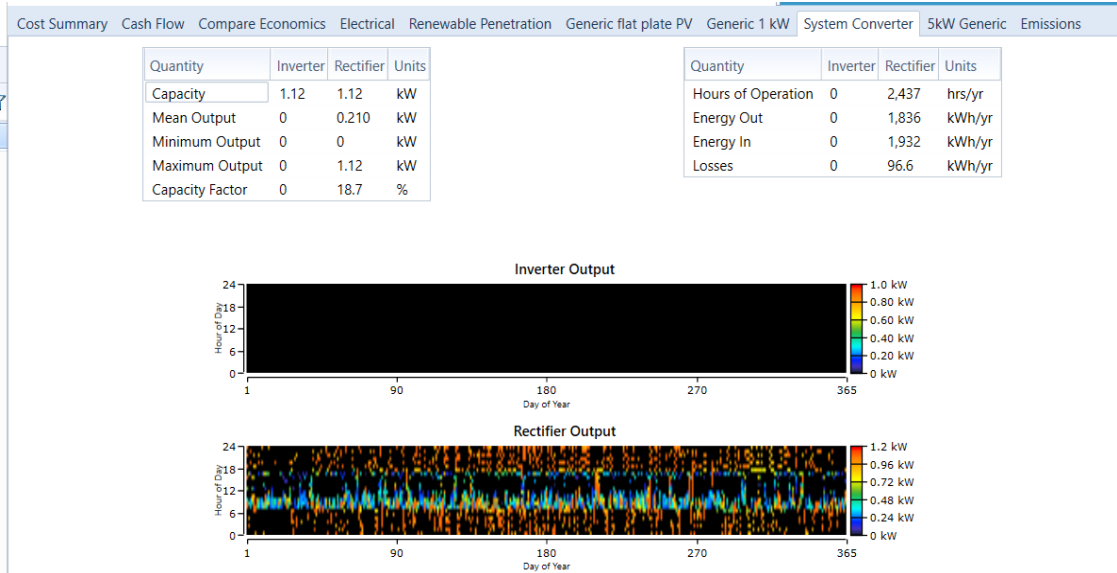
Sistemin en kritik bileşeni olan hidroelektrik ünite, batarya görevi görerek sistemin kararlılığını sağlamaktadır. Şekil 9'da sunulan hidroelektrik üretim grafiğindeki kesintisiz yeşil blok, türbinin yıl boyunca ve günün her saatinde, özellikle gece deşarj periyotlarında, sürekli ve kararlı bir güç sağladığını göstermektedir. Türbinin yıllık toplam üretimi 4.245 kWh olup, kapasite faktörü %147 gibi teorik bir değerde görülmektedir; bu durum türbinin nominal kapasitesinin üzerinde anlık yükleri de karşılayabildiğini veya sürekli çalıştığını işaret eder. Suyun potansiyel enerjisi, sistemin baz yük santrali gibi davranmasına olanak tanımıştır.



Şekil 9: Hidroelektrik türbinin yıllık güç çıkış sürekliliği.

#### 4.2.4. Konvertör Analizi

Sistemde kullanılan 1.12 kW kapasiteli konvertör, özellikle AC ve DC baralar arasındaki enerji akışını yönetmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre (Şekil 10), konvertör ağırlıklı olarak Doğrultucu modunda çalışarak, AC barada üretilen enerjinin DC baradaki yükleri veya pompa kontrolünü beslemesi yönünde işlem yapmıştır. Yıllık 1.932 kWh enerji girişi ve 1.836 kWh enerji çıkışı ile %95 verimle çalıştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 10: Konvertör çalışma profili.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, Yalova ilinde şebekeden bağımsız bir konut için PHS tasarlanmıştır. Analizler, 20 metre düşü yüksekliği ve yaklaşık  $150m^3$  su rezervuarının, kimyasal bataryalara ihtiyaç duymadan evin temel gece yükünü karşılayabildiğini göstermiştir. PV ve Rüzgâr kombinasyonu, suyun pompalanması için gerekli enerjiyi %100 yenilenebilir kaynaklardan sağlamıştır. Önerilen sistem, çevresel etkisi düşük, uzun ömürlü ve atık batarya sorunu oluşturmayan sürdürülebilir bir çözüm olarak literatüre katkı sağlamaktadır.

### Kaynaklar

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Türkdoğan, Sunay, Serkan Dilber, and Barış Çam. "Hibrit Enerji Sistemlerinin Şebekeden Bağımsız Bir Çiftlik Evinde Uygulanabilirliğinin Ekonomik ve Teknik Açından İncelenmesi." *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 3.2 (2018): 52-65.
- [4] 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.
- [5] NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. (2025). Erişim adresi: <https://power.larc.nasa.gov/>
- [6] Güven, A.F, Mete M.K (2021). Balıkesir İli Erdek İlçesi İçin Bağımsız Hibrit Enerji Sistemini Fizibilite Çalışması Ve Ekonomik Analizi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(4), 1063-1076.
- [7] Tunçez, F.D., ve Soylu, S. (2022). Konya İlinin Toplanabilir Bitkisel Artık Ve Hayvansal Atık Kaynaklı Metan Potansiyeli. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi*, 11(2):112-127.