



Manisa İlindeki Bir Zeytin İşletmesi İçin Şebeke Bağlantılı PV/Biyokütle Hibrit Enerji Sisteminin Tekno-Ekonomik Analizi

Techno-Economic Analysis of a Grid-Connected PV/Biomass Hybrid Energy System for an Olive Facility in Manisa

Kadir Özbaykuş, Mücahit Dal, Mehmet Bayındır

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

Özet

Enerji maliyetlerindeki artış ve karbon ayak izini silme baskısı, tarımsal sanayi tesislerini kendi enerjilerini üretmeye zorlamaktadır. Ege Bölgesi, hem yüksek güneşlenme süresi hem de zeytin üretiminden kaynaklı biyokütle atıklarıyla hibrit sistemler için ideal bir laboratuvar niteliğindedir. Manisa ili Akhisar ilçesi Medar Mahallesi'ndeki bir zeytin işleme tesisine odaklanılan bu analizde, işletmenin enerji profilini optimize eden şebeke bağlantılı bir model geliştirilmiştir. Tesisin enerji talebi iki fazda incelenmiştir: yıl boyu süren düşük yoğunluklu idari yükler ve sadece hasat sezonunda (Eylül-Aralık) zirve yapan endüstriyel yükler. HOMER Pro ile yürütülen simülasyonlarda, atık pirinayı yakıtı dönüştüren 10 kW kapasiteli biyokütle jeneratörü ile 5 kW gücündeki fotovoltaiik paneller sisteme entegre edilmiştir. Elde edilen veriler, hibrit kurulumun toplam tüketiminin %95,2'sini yenilenebilir kaynaklardan sağladığını kanıtlamaktadır. Ekonomik projeksiyonda Net Bugünkü Maliyet (NPC) -460,76 \$ seviyesinde gerçekleşmiş, Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) ise şebeke satış gelirleri sayesinde -0,00144 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Sistem, 5,97 yıl gibi kısa bir sürede kendini amorti ederek kalan 19 yıllık ömründe işletmeye kâr sağlayan ve karbon salımını sıfırlayan bir yapı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit Enerji Sistemleri, Biyokütle, Pirina, Fotovoltaiik, HOMER Pro, Tekno-Ekonomik Analiz.

Abstract

Rising energy costs and the pressure to erase carbon footprints are forcing agro-industrial facilities to generate their own power. The Aegean Region serves as an ideal laboratory for hybrid systems due to both high solar irradiation and biomass waste from olive production. Focusing on an olive processing facility in Medar Neighborhood, Akhisar district of Manisa, this analysis develops a grid-connected model optimizing the facility's energy profile. The energy demand was analyzed in two phases: year-round low-intensity administrative loads and industrial loads peaking only during the harvest season (September-December). In simulations conducted with HOMER Pro, a 10 kW biomass generator converting waste pomace into fuel and 5 kW photovoltaic panels were integrated into the system. The obtained data prove that the hybrid setup supplies 95.2% of the total consumption from renewable sources. In the economic projection, the Net Present Cost (NPC) materialized at -\$460.76, while the Levelized Cost of Energy (LCOE) was calculated as -\$0.00144/kWh thanks to grid sales revenues. The system amortizes itself in a short period of 5.97 years, offering a structure that generates profit for the facility and neutralizes carbon emissions over its remaining 19-year lifespan.

Keywords: Hybrid Energy Systems, Biomass, Pomace, Photovoltaics, HOMER Pro, Techno-Economic Analysis.

1. GİRİŞ

Modern dünyada enerji arz güvenliği, sadece üretimin sürekliliği için değil, aynı zamanda maliyetlerin kontrol altında tutulması için de kritik bir parametredir. Fosil yakıtlara dayalı tek yönlü enerji besleme modelleri, dalgalı piyasa fiyatları ve emisyon sınırlamaları karşısında sürdürülebilirliğini yitirmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda [5] belirtildiği üzere, küresel enerji trendleri artık tekil kaynak kullanımı yerine, farklı yenilenebilir kaynakların (hibrit) entegrasyonuna evrilmektedir. Türkiye özelinde bakıldığında, güneş enerjisi potansiyeli oldukça yüksektir. Kamu binalarında ve endüstriyel çatılarda yapılan analizlerde [4], doğru fotovoltaiik (PV) tasarımının şebeke bağımlılığını ciddi oranda azalttığı ve enerji verimliliğini artırdığı vurgulanmıştır.

Ancak tarımsal işletmelerin enerji karakteristiği, standart bina yüklerinden farklıdır. Özellikle hasat dönemlerinde oluşan ani yük artışları, sadece güneş enerjisiyle karşılanamayabilir. Bu noktada optimizasyon teknikleri devreye girmektedir. Hibrit sistemlerin boyutlandırılması üzerine yapılan araştırmalar [6], çoklu kaynak kullanımının (Güneş+Biyokütle gibi) sistem güvenilirliğini artırdığını ifade etmektedir. Kırsal kalkınma odaklı çalışmalar da bu görüşü desteklemektedir. Örneğin, şebekeden bağımsız bir çiftlik evi için yapılan analizde [3], hibrit yapıların teknik olarak uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır. Benzer şekilde, topluluk ölçeğinde yapılan optimizasyon çalışmaları [2], sistem kapasitesi büyüdükçe birim enerji maliyetlerinin düştüğünü göstermektedir.

Zeytinyağı sektörü, "pirina" atığı sayesinde enerji üretimi için büyük bir fırsata sahiptir. Konut ve elektrikli araç yükleri üzerine yapılan optimizasyon çalışmalarında [1], yenilenebilir kaynakların entegrasyonunun fosil yakıt tüketimini minimize ettiği ortaya konmuştur. Bu çalışmada ise literatürdeki [1-4] yaklaşımlar temel alınarak, Manisa/Akhisar'daki bir zeytin tesisinin "mevsimsel yükü" ile "mevsimsel atığı"

birleştirilmiştir. Amaç, hasat döneminde zirve yapan enerji talebini, yine aynı dönemde ortaya çıkan atık pirina ile karşılayarak hem ekonomik hem de çevresel bir optimizasyon sağlamaktır.

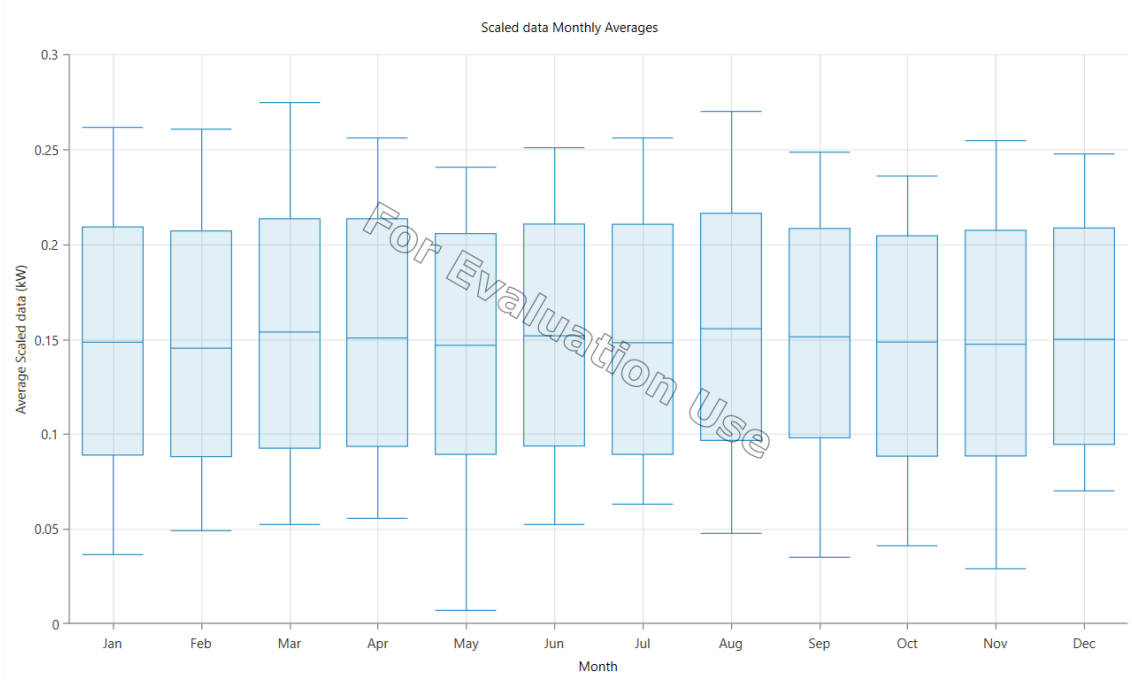
2. SİSTEM TANITIMI

Bu bölümde, proje sahasının özellikleri, işletmenin yük profili ve önerilen hibrit sistemin bileşenleri detaylandırılmıştır.

2.1. Proje Sahası ve Elektrik Yük Profili

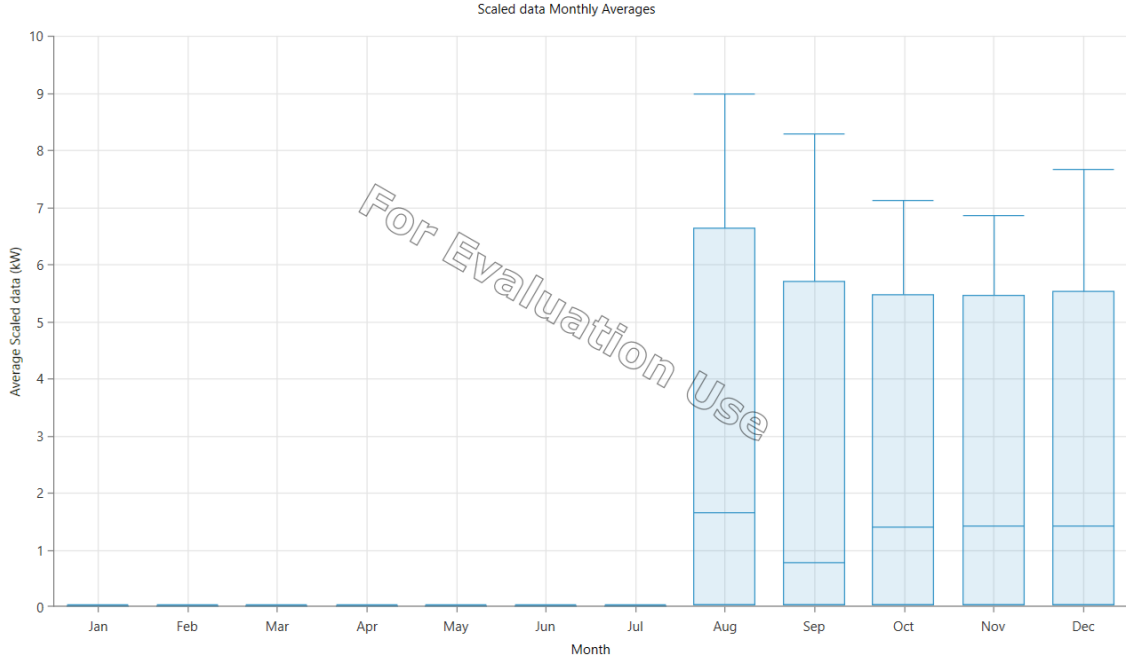
Proje, zeytin üretiminin yoğun olduğu Manisa ili Akhisar ilçesi Medar Mahallesi lokasyonunda kurgulanmıştır. İşletmenin enerji tüketim davranışı, üretim sezonuna bağlı olarak iki farklı karakteristikte modellenmiştir.

1. **Sabit Yük (Load 1):** Tesisin idari bölümleri, çevre aydınlatması ve güvenlik sistemleri gibi yıl boyunca kesintisiz enerji tüketen birimlerini kapsamaktadır. Bu yük profili, düşük güçlü ancak süreklilik arz eden bir yapıdadır. Günlük ortalama tüketim 3,60 kWh, tepe yük ise 0,27 kW seviyesindedir.



Şekil 1. İşletmenin sabit yüklerinin (Load 1) aylık değişimi.

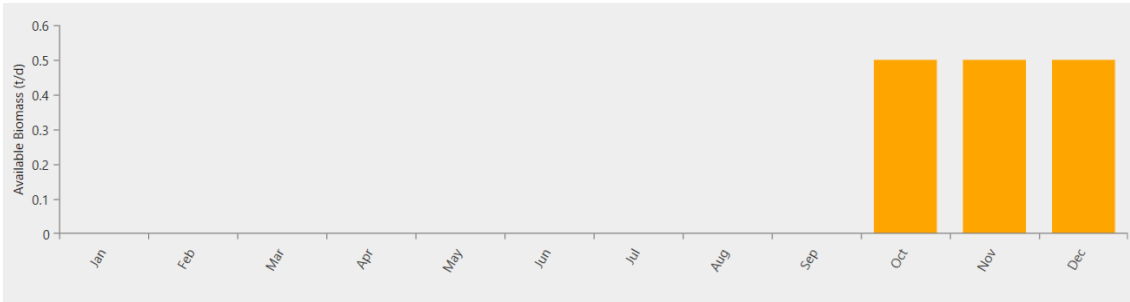
2. **Mevsimsel Yük (Load 2):** Zeytin hasadı ve sıkım işlemlerinin yapıldığı kampanya dönemini (Ağustos-Aralık) kapsamaktadır. Bu dönemde pres makineleri, konveyörler ve ısıtma sistemleri devreye girdiği için enerji talebi dramatik şekilde artmaktadır. Sadece yılın son 5 ayında aktif olan bu yükün günlük ortalama tüketimi 13,28 kWh'e, anlık güç talebi ise 9,00 kW'a ulaşmaktadır.



Şekil 2. Hasat sezonuna bağlı endüstriyel yüklerin (Load 2) aylık değişimi.

2.2. Biyokütle Kaynağı

Sistemde kullanılan jeneratör, fosil yakıt yerine işletme atığı olan pirina (olive pomace) kullanacak şekilde tanımlanmıştır. Pirinanın alt ısıl değeri 16,60 MJ/kg ve karbon içeriği %48 olarak alınmıştır. Yakıtın bulunabilirliği, hasat sezonu ile uyumlu olarak sadece Ekim, Kasım ve Aralık ayları ile sınırlandırılmıştır (Şekil 3).



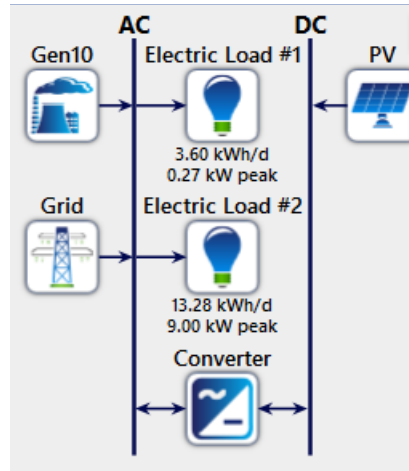
Şekil 3. Biyokütle (pirina) kaynağının aylık uygunluk durumu.

2.3. Sistem Bileşenleri

Önerilen mikro şebeke mimarisi; enerji üretiminde PV paneller ve biyokütle jeneratörü, enerji yönetimde ise çift yönlü dönüştürücü ve şebeke bağlantısından oluşmaktadır. Bileşenlerin teknik ve maliyet parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Bileşen	Parametre	Değer	Birim
PV Panel	Tipi	Generic Flat Plate	-
	Sermaye Maliyeti	1.050	\$/kW
	Yenileme Maliyeti	800	\$/kW
	İşletme Ömrü	25	Yıl
Jeneratör	Yakıt Tipi	Biyokütle (Pirina)	-
	Kapasite	10	kW
	Sermaye Maliyeti	5.000	\$
	Yakıt Alt Isıl Değeri	16,6	MJ/kg
Şebeke (Grid)	Tarife Türü	Basit Tarife	-
	Elektrik Alış Fiyatı	0,081	\$/kWh
	Elektrik Satış Fiyatı	0,045	\$/kWh
Converter	Verimlilik	95	%
	Ömür	15	Yıl

Tablo 1. Simülasyonda kullanılan sistem bileşenlerinin teknik ve ekonomik parametreleri.



Şekil 4. Tasarlanan şebeke bağlantılı hibrit sistemin şeması.

3. ANALİZ VE YÖNTEM

Sistemin optimizasyonunda, yenilenebilir enerji sistemlerinin modellenmesinde endüstri standardı olan HOMER Pro yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, girilen meteorolojik veriler ile yük profilini eşleştirerek binlerce olasılık arasından en düşük maliyetli konfigürasyonu belirler [7].

3.1. PV Panel Güç Çıkışı

Fotovoltaik panellerin ürettiği güç (P_{PV}), güneş radyasyonu ve hücre sıcaklığına bağlı olarak aşağıdaki denklem (1) ile hesaplanmaktadır[6]:

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

Burada; Y_{PV} PV dizisinin anma kapasitesini (kW), f_{PV} PV derating faktörünü (kirlilik, kablo kayıpları vb.), G_T anlık güneş radyasyonunu, $G_{T,STC}$ standart test koşullarındaki radyasyonu (1 kW/m²), α_P güç sıcaklık katsayısını ve T_c hücre sıcaklığını ifade eder.

3.2. Ekonomik Analiz Yöntemi

Sistemin ekonomik fizibilitesini belirleyen en temel parametre Net Bugünkü Maliyet (NPC) değeridir. HOMER, tüm sistem konfigürasyonlarını NPC değerine göre sıralar [7]. Toplam NPC aşağıdaki denklem (2) ile hesaplanır:

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{proj})} \quad (2)$$

Bu denklemde $C_{(ann,tot)}$ toplam yıllık maliyeti, CRF sermaye geri kazanım faktörünü, i faiz oranını ve R_{proj} proje ömrünü (25 yıl) göstermektedir. Sermaye geri kazanım faktörü (CRF) ise denklem (3)'te verildiği gibidir :

$$CRF(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

Son olarak, üretilen birim elektriğin maliyetini karşılaştırmak için kullanılan Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) denklem (4) ile bulunur:

$$LCOE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim} + E_{def} + E_{grid,sales}} \quad (4)$$

Burada paydadaki terimler sırasıyla; birincil yükü (E_{prim}), ertelenebilir yükü ve (E_{def}) şebekeye satılan toplam enerjiyi $E_{(grid,sales)}$ temsil eder. Bu çalışmada amaç, LCOE ve NPC değerlerini minimize ederken yenilenebilir enerji oranını maksimize etmektir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, HOMER Pro tarafından gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları; ekonomik, teknik ve çevresel boyutlarıyla ele alınmıştır.

4.1. Optimizasyon Sonuçları ve Ekonomik Analiz

Tablo 2'de görülen optimizasyon sonuçlarına göre, kazanan sistemin NPC değeri -460,76 \$'dır. Bu negatif değer, sistemin bir gider kalemi değil, gelir kapısı olduğunu gösterir.

LCOE değeri -0,00144 \$ olarak gerçekleşmiş, yatırımın geri dönüş süresi ise 5,97 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu veriler, benzer hibrit sistem optimizasyon çalışmalarıyla [1, 2] karşılaştırıldığında oldukça yüksek bir kârlılık oranına işaret etmektedir.

Architecture					Cost				System		Project Economics		Gen10			
PV (kW)	Gen10 (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)	CAPEX (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (tons/yr)	IRR (%)	Simple Payback (yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (tons)	O&M Cost (\$/yr)
5.00	10.0	999,999	5.00	CC	\$2,618	\$0,00658	-\$706.42	\$11,750	95.2	20.5	17	6.0	2,208	22,080	20.5	66.2
5.00		999,999	5.00	CC	\$9,341	\$0,0619	\$200,39	\$6,750	62.0	0						

Tablo 2. HOMER Pro optimizasyon sonuçları ve kazanan sistem mimarisi.

Önerilen hibrit sistemin detaylı ekonomik performansı Tablo 3'te ve Tablo 4'te verilmiştir. Sistemin NPC değeri -460,76 \$ olarak hesaplanmıştır. Negatif NPC değeri, sistemin ömrü boyunca harcadığından daha fazla gelir (elektrik satışı ile) elde ettiğini göstermektedir.

- **LCOE:** -0,00144 \$/kWh
- **Geri Ödeme Süresi:** 5,97 yıl
- **Yatırım Getirisi (ROI):** %15,7

Cost Summary

	Base Case	Lowest Cost System
NPC ?	\$6,483	-\$460.76
Initial Capital	\$0.00	\$5,000
O&M ?	\$501.52/yr	-\$422.41/yr
LCOE ?	\$0.0814/kWh	-\$0.00144/kWh

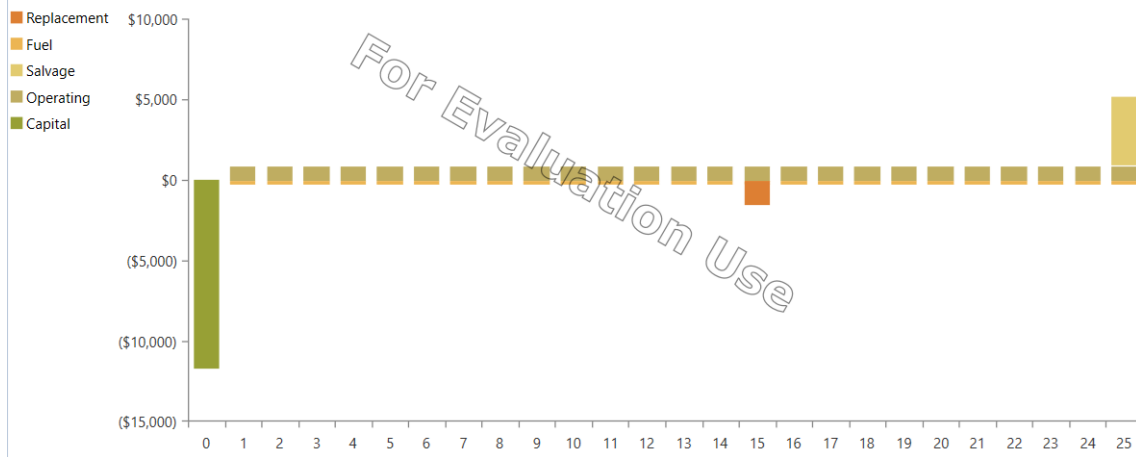
Tablo 3. Baz senaryo ile önerilen sistemin maliyet karşılaştırması.

	Architecture				Cost	
	PV (kW)	Gen10 (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)	NPC (\$)	CAPEX (\$)
Base system	5.00		999,999	5.00	\$9,341	\$6,750
Proposed system	5.00	10.0	999,999	5.00	\$2,618	\$11,750

Metric	Value
Present worth (\$)	\$6,723
Annual worth (\$/yr)	\$520
Return on investment (%)	15.7
Internal rate of return (%)	16.7
Simple payback (yr)	5.97
Discounted payback (yr)	7.58

Tablo 4. Projenin yatırım geri dönüşü ve ekonomik metrikleri.

Sistemin finansal sürdürülebilirliğini gösteren kümülatif nakit akışı Şekil 5'te sunulmuştur. Grafikte görüldüğü üzere, ilk yatırım maliyeti (Capital) 0. yılda gerçekleşmekte, ancak işletme süresince yakıt maliyetinin olmaması (atık kullanımı) ve şebekeye satış gelirleri sayesinde nakit akışı hızla pozitif yönde ilerlemektedir. Grafik eğrisinin yukarı yönlü hareketi, sistemin kârlılığını görsel olarak doğrulamaktadır.

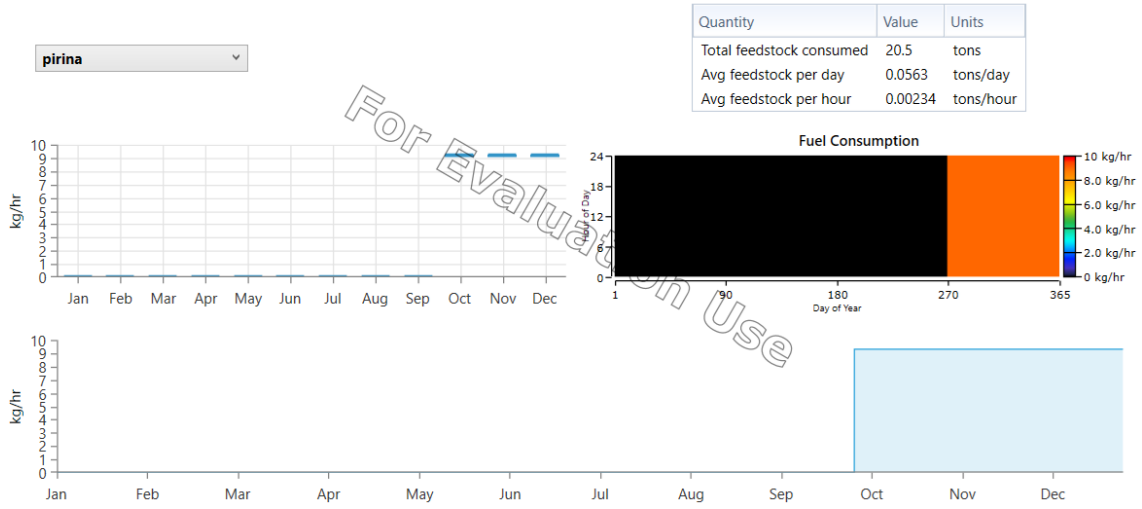


Şekil 5. Proje ömrü boyunca kümülatif nakit akışı değişimi.

4.2. Teknik Performans Bulguları

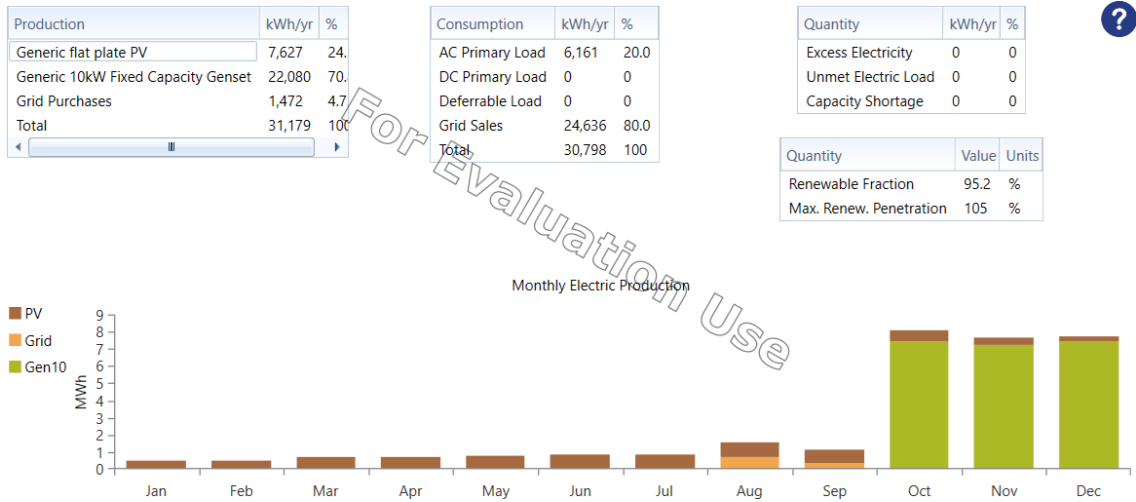
Teknik analizde öncelikle jeneratörün yakıt tüketim davranışı incelenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, işletmenin atık yönetimi stratejisine uygun olarak, sadece hasat sezonu olan Ekim, Kasım ve Aralık aylarında yakıt tüketimi gerçekleşmiştir. Bu aylarda ortalama

yakıt tüketimi saatlik 2.3 kg seviyelerinde seyretmektedir. Diğer aylarda yakıt tüketimi sıfırdır.



Şekil 6. Jeneratörün aylara göre yakıt tüketim durumu.

Sistemin yıllık toplam elektrik üretimi 30.798 kWh olarak gerçekleşmiş olup, bunun %70,8'i biyokütle jeneratöründen, %24,5'i PV sisteminden sağlanmıştır (Şekil 7). Yenilenebilir enerji oranı %95,2 seviyesindedir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, üretilen enerjinin büyük kısmı şebekeye satılmaktadır.

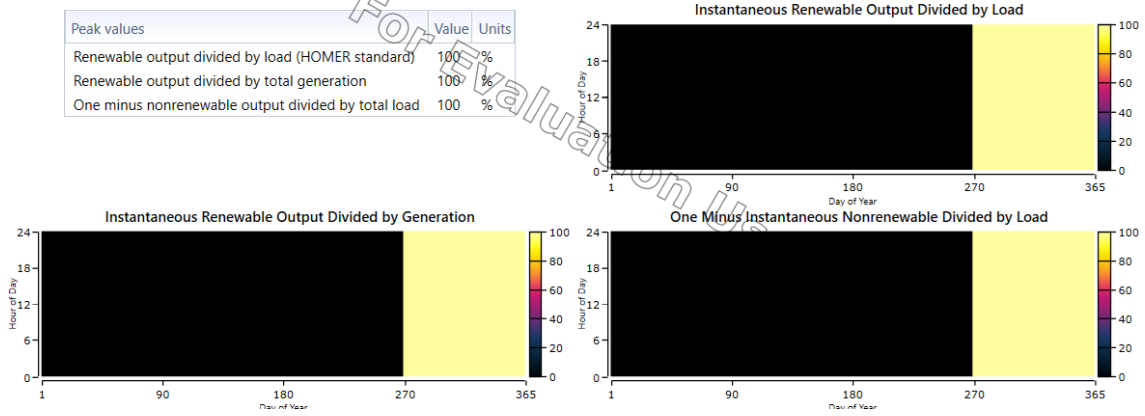


Şekil 7. Elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı.

Capacity-based metrics	Value	Units
Nominal renewable capacity divided by total nominal capacity	100	%
Usable renewable capacity divided by total capacity	0	%

Energy-based metrics	Value	Units
Total renewable production divided by load	89.0	%
Total renewable production divided by generation	89.0	%
One minus total nonrenewable production divided by load	11.0	%

Peak values	Value	Units
Renewable output divided by load (HOMER standard)	100	%
Renewable output divided by total generation	100	%
One minus nonrenewable output divided by total load	100	%



Şekil 8. Yenilenebilir enerji penetrasyon oranları.

4.3. Çevresel Bulgular

Fosil yakıt ikamesi ve temiz enerji üretimi sayesinde sistemin çevresel etkisi oldukça olumludur. Tablo 5'te belirtildiği üzere, sistem yılda 10.025 kg CO₂ emisyonunu önlemektedir.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	-10,025	kg/yr
Carbon Monoxide	0.406	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0.0148	kg/yr
Particulate Matter	0.0246	kg/yr
Sulfur Dioxide	-43.6	kg/yr
Nitrogen Oxides	-20.9	kg/yr

Tablo 5. Sistemin yıllık emisyon değerleri.

5. SONUÇ

Manisa/Akhisar'daki zeytin işletmesi için tasarlanan bu hibrit sistem, atık pirinanın enerjiye dönüştürülmesi ve güneş enerjisi entegrasyonu ile sürdürülebilir bir model sunmaktadır. Analizler, sistemin 5,97 yılda kendini amorti ettiğini, %95,2 oranında yenilenebilir enerji kullandığını ve karbon negatif bir işletme yapısı sağladığını kanıtlamıştır. Özellikle hasat dönemindeki yüksek enerji talebinin (Load 2), yine aynı dönemde ortaya çıkan biyokütle kaynağı ile karşılanması, projenin tekno-ekonomik başarısının temelini oluşturmuştur.

6. KAYNAKLAR

- [1] Turkdogan, S. (2021). "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), 397-404.
- [2] Türkdoğan, S., Mercan, M. T., & Çatal, T. (2020). "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), 476-485.
- [3] Türkdoğan, S., Dilber, S., & Çam, B. (2018). "Hibrit Enerji Sistemlerinin Şebekeden Bağımsız Bir Çiftlik Evinde Uygulanabilirliğinin Ekonomik ve Teknik Açından İncelenmesi." *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 52-65.
- [4] Arslan, F., & Türkdoğan, S. (2022). "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), 76-94.
- [5] Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Abdelkareem, M. A. (2021). "Fuel cell application in the automotive industry and future perspective." *Energy*, 214, 118955.
- [6] Sinha, S., & Chandel, S. S. (2015). "Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 755-769.
- [7] Lilienthal, P., Lambert, T., & Gilman, P. (2004). "Computer modeling of renewable power systems." *Encyclopedia of Energy*, 1, 633-647.