



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

Küresel enerji piyasalarındaki dalgalanmalar ve karbon emisyonlarını düşürme zorunluluğu, enerji yoğun tarımsal işletmeleri alternatif çözüm arayışlarına itmektedir. Türkiye, özellikle Ege Bölgesi'ndeki zeytin potansiyeli ile hem güneş enerjisi hem de tarımsal atık (biyokütle) açısından hibrit sistemler için stratejik bir konuma sahiptir. Bu çalışmada, Manisa ili Akhisar ilçesi Medar Mahallesi'nde faaliyet gösteren bir zeytin hasat ve işleme tesisinin enerji ihtiyacını karşılamak üzere şebeke bağlantılı (on-grid) bir hibrit enerji sistemi tasarlanmıştır. Çalışmanın temel amacı, işletmenin yıl boyu süren idari yükleri ile sadece hasat sezonunda (Eylül-Aralık) ortaya çıkan endüstriyel yüklerini, en düşük maliyetle karşılayacak optimum sistemi belirlemektir. HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerde, işletme atığı olan pirinanın yakıt olarak kullanıldığı 10 kW'lık biyokütle jeneratörü ve 5 kW'lık fotovoltaiik (PV) sistem entegre edilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen sistemin toplam elektrik ihtiyacının %95,2'sini yenilenebilir kaynaklardan karşıladığını göstermektedir. Ekonomik analizde Net Bugünkü Maliyet (NPC) -460,76 \$ ve Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) -0,00144 \$/kWh olarak hesaplanmış; sistemin 5,97 yılda yatırımını amorti ettiği ve karbon negatif bir işletme modeli sunduğu tespit edilmiştir.

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

ABSTRACT

Fluctuations in global energy markets and the necessity to reduce carbon emissions are driving energy-intensive agricultural enterprises to seek alternative solutions. Turkey, particularly with its olive potential in the Aegean Region, holds a strategic position for hybrid systems in terms of both solar energy and agricultural waste (biomass). In this study, a grid-connected hybrid energy system was designed to meet the energy needs of an olive harvesting and processing facility operating in the Medar Neighborhood of Akhisar district, Manisa. The main objective of the study is to determine the optimal system that will meet the facility's year-round administrative loads and the industrial loads occurring only during the harvest season (September-December) at the lowest cost. In the analyses performed with HOMER Pro software, a 10 kW biomass generator using the facility's waste pomace as fuel and a 5 kW photovoltaic (PV) system were integrated. Simulation results indicate that the proposed system meets 95.2% of the total electricity demand from renewable sources. In the economic analysis, the Net Present Cost (NPC) was calculated as -\$460.76 and the Levelized Cost of Energy (LCOE) as -\$0.00144/kWh; it was determined that the system amortizes its investment in 5.97 years and presents a carbon-negative business model.

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

1. GİRİŞ

Modern tarımsal sanayi tesisleri, artan üretim kapasiteleriyle birlikte yüksek enerji maliyetleri ve tedarik güvenliği sorunlarıyla karşı karşıyadır. Fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi, hem işletme maliyetlerini artırmakta hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine zarar vermektedir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) entegre kullanımı, enerji verimliliği ve maliyet optimizasyonu açısından kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir. Özellikle güneş ve rüzgâr gibi kesintili kaynakların, biyokütle gibi daha stabil kaynaklarla desteklendiği hibrit enerji sistemleri, arz güvenliğini sağlama noktasında tekil sistemlere göre daha üstün performans sergilemektedir [1].

Türkiye'nin iklimsel özellikleri ve tarımsal altyapısı incelendiğinde, güneş enerjisi potansiyelinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Arslan ve Türkdoğan (2022) tarafından yapılan çalışmada, kamu binalarında çatı üzeri PV kurulum potansiyeli incelenmiş ve Türkiye'nin bu alandaki yüksek verimliliği vurgulanmıştır [4]. Ancak tarımsal işletmelerin enerji profili, konut veya kamu binalarından farklılık gösterir. Tarımsal üretim genellikle mevsimseldir ve hasat dönemlerinde enerji talebi zirve yapmaktadır. Türkdoğan ve arkadaşlarının (2018) bir çiftlik evi özelinde yaptığı çalışmada, kırsal alanlardaki tarımsal yapıların enerji ihtiyacının hibrit sistemlerle karşılanabilirliği teknik ve ekonomik açıdan ortaya konmuştur [3].

Bu çalışmanın odak noktası olan zeytinyağı sektörü, üretim sürecinde "pirina" adı verilen ve yüksek ısıl değere sahip bir atık ortaya çıkarmaktadır. Bu atığın enerjiye dönüştürülmesi, atık bertaraf maliyetlerini ortadan kaldırdığı gibi işletmeye bedava yakıt sağlama potansiyeline de sahiptir. Literatürde, Türkdoğan (2021) tarafından konut ve elektrikli araç yüklerinin yenilenebilir enerji ile karşılanması üzerine yapılan

optimizasyon çalışmaları, hibrit sistemlerin şebeke üzerindeki yükü hafiflettiğini göstermiştir [1]. Benzer şekilde, Türkdoğan vd. (2020) tarafından 40 hanelik bir topluluk için yapılan şebekeden bağımsız sistem analizi, ölçek büyüdükçe hibrit yapıların birim enerji maliyetini düşürdüğünü kanıtlamaktadır [2].

Mevcut literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu makale, şebeke bağlantılı endüstriyel bir tesisin mevsimsel yük karakteristiğini (Load 1 ve Load 2) ve mevsimsel yakıt bulunabilirliğini (sadece hasat sezonunda pirina) senkronize eden özgün bir model sunmaktadır. Çalışmada, Manisa/Akhisar bölgesindeki bir zeytin işletmesinin enerji talebi, bölgenin güneş verileri ve işletme atığı potansiyeli HOMER Pro yazılımı ile analiz edilmiş; sistemin teknik performansı, ekonomik geri dönüşü ve çevresel katkıları detaylandırılmıştır [5, 6].

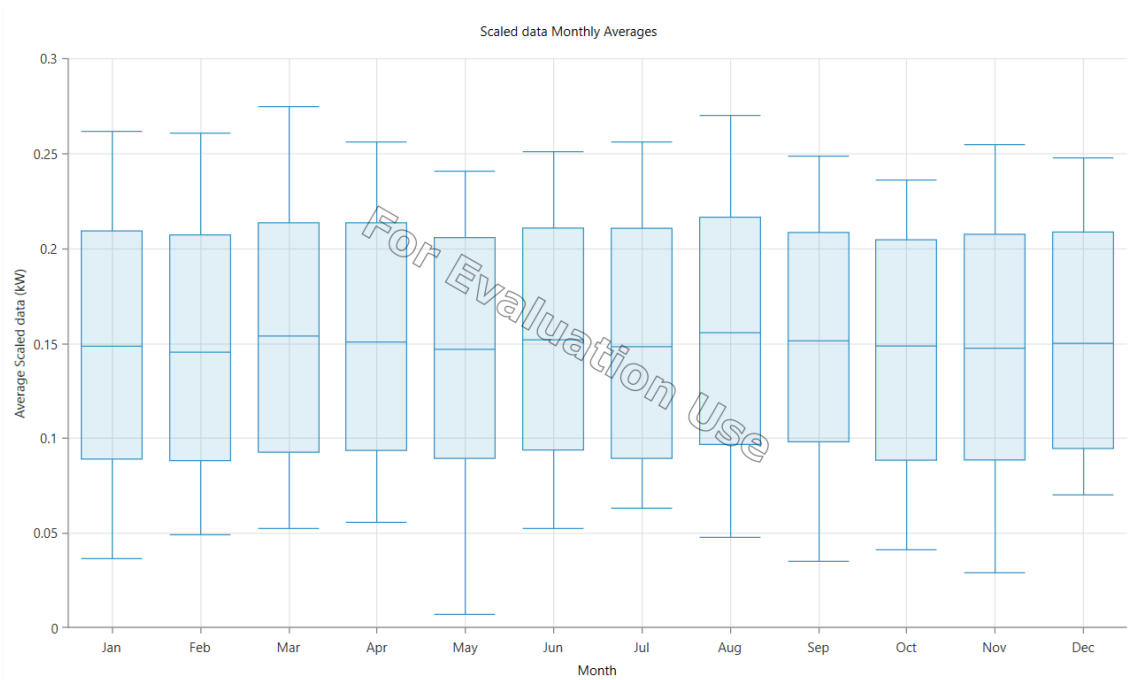
2. SİSTEM TANITIMI

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

2.1. Proje Sahası ve Elektrik Yük Profili

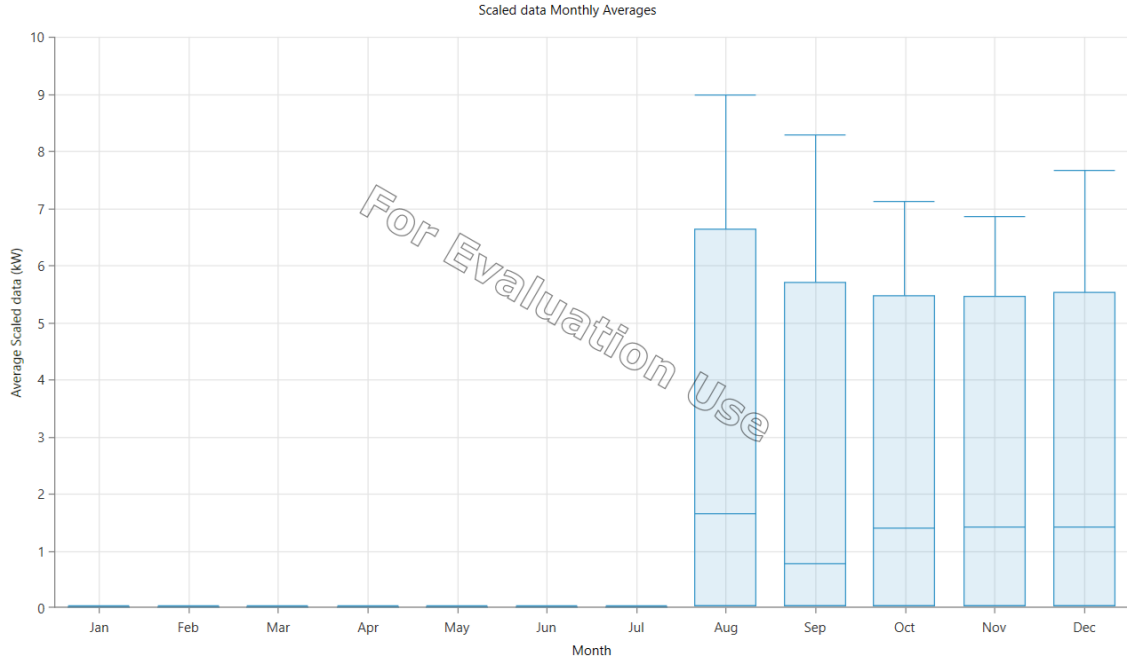
Proje, zeytin üretiminin yoğun olduğu Manisa ili Akhisar ilçesi Medar Mahallesi lokasyonunda kurgulanmıştır. İşletmenin enerji tüketim davranışı, üretim sezonuna bağlı olarak iki farklı karakteristikte modellenmiştir. Yük profilinin doğru modellenmesi, sistemin güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir [2].

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.

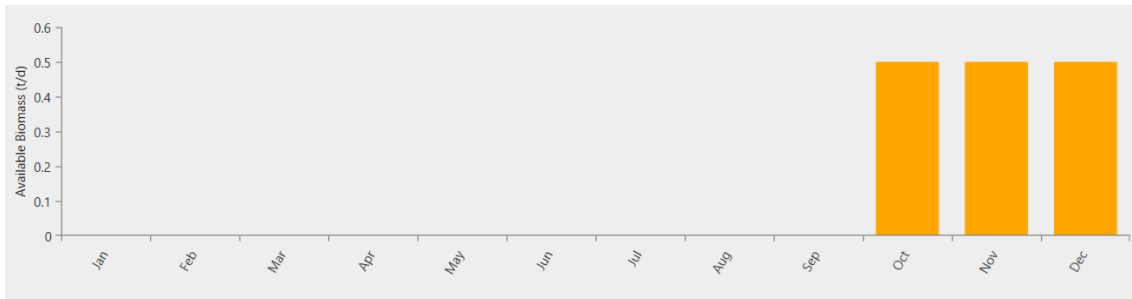
2. **Mevsimsel Yük (Load 2):** Zeytin hasadı ve sıkım işlemlerinin yapıldığı kampanya dönemini (Ağustos-Aralık) kapsamaktadır. Bu dönemde pres makineleri, konveyörler ve ısıtma sistemleri devreye girdiği için enerji talebi dramatik şekilde artmaktadır. Sadece yılın son 5 ayında aktif olan bu yükün günlük 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).



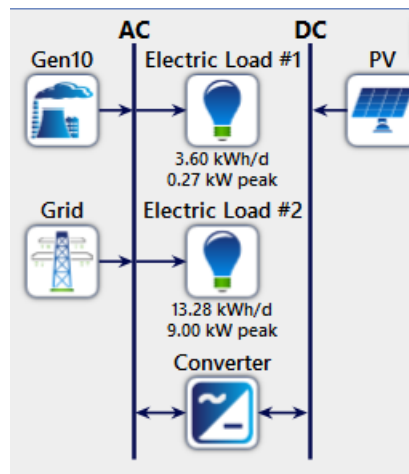
Şekil 3. Biyokütle (pirina) kaynağının aylık uygunluk durumu.

2.3. Sistem Bileşenleri

Önerilen mikro şebeke mimarisi; enerji üretiminde PV paneller ve biyokütle jeneratörü, enerji yönetiminde ise çift yönlü dönüştürücü ve şebeke bağlantısından oluşmaktadır. Bileşenlerin teknik ve maliyet parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Hibrit sistemlerin bileşen seçiminde maliyet etkinliği ve ömür parametreleri belirleyici faktörlerdir [3].

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 modellenmesi ve optimizasyonu sürecinde HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) yazılımı tercih edilmiştir. Bu yazılım, girilen meteorolojik veriler (NASA Surface Meteorology veritabanından alınan Akhisar güneş radyasyonu verileri), yük profilleri ve bileşen maliyetlerini işleyerek binlerce farklı sistem kombinasyonunu simüle etmektedir. Simülasyon sürecinde sistemin enerji dengesi, her zaman adımı için (time-step) korunarak hesaplamalar yapılır [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:

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

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. 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 [6]:

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

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

Yapılan simülasyon sonucunda elde edilen optimum sistem konfigürasyonları Tablo 2'de listelenmiştir. En düşük NPC değerine sahip olan sistem (ilk satır), PV ve Biyokütle jeneratörünün birlikte çalıştığı hibrit yapıdır. Sadece PV veya sadece şebeke kullanılan senaryolara kıyasla, hibrit yapının maliyet etkinliği çok daha yüksektir.

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

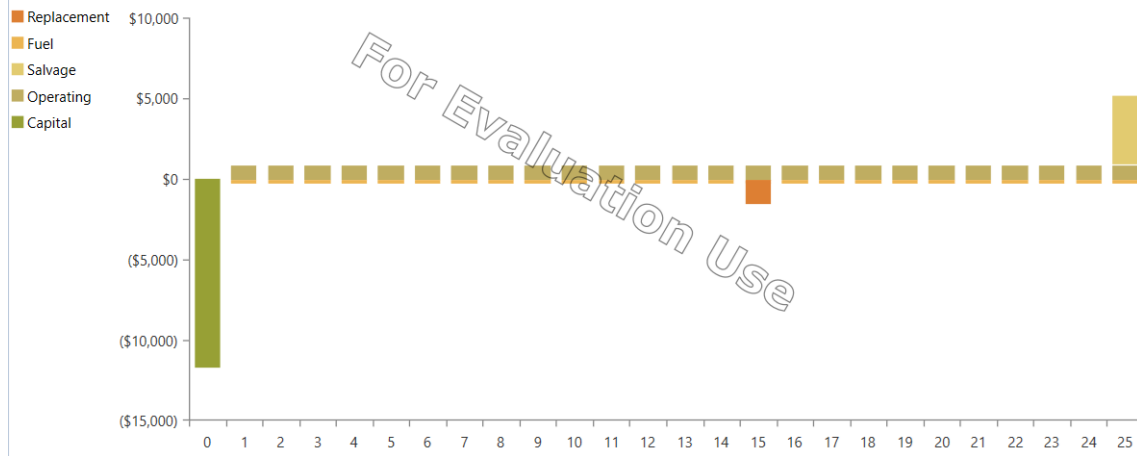
Tablo 3. Baz senaryo ile önerilen sistemin maliyet karşılaştırması.

	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.

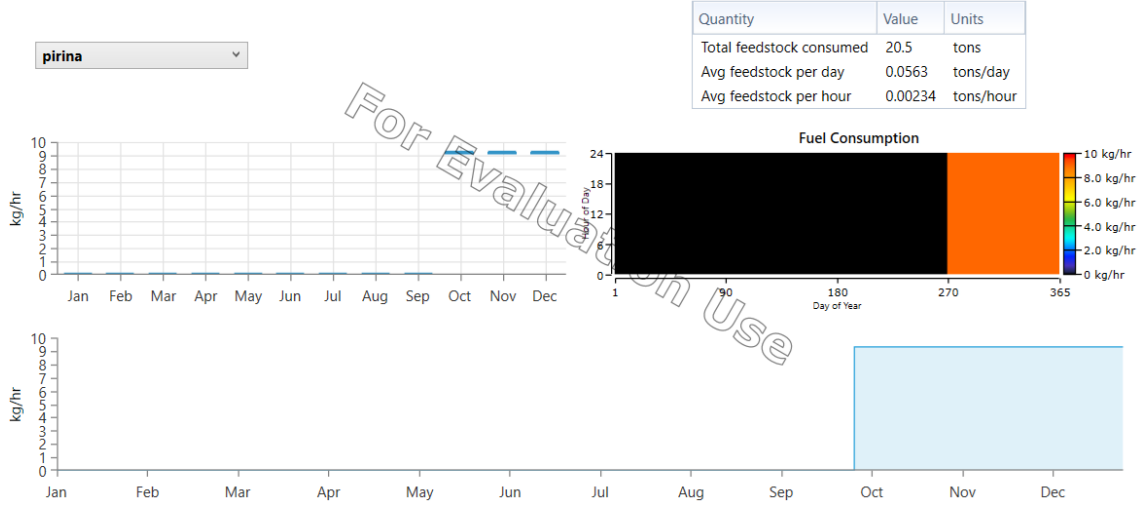


Şekil 5. Proje ömrü boyunca kümülatif nakit akışı değişimi.

4.2. Teknik Performans Bulguları

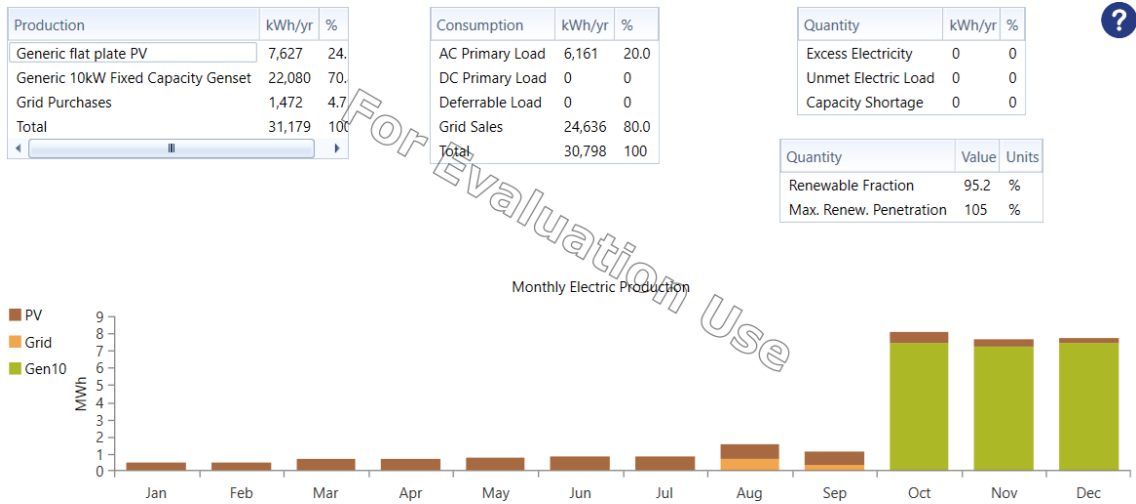
Teknik analizde öncelikle jeneratörün yakıt tüketim davranışı incelenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, işletmenin atık yönetimi stratejisine uygun olarak, sadece hasat sezonu

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.

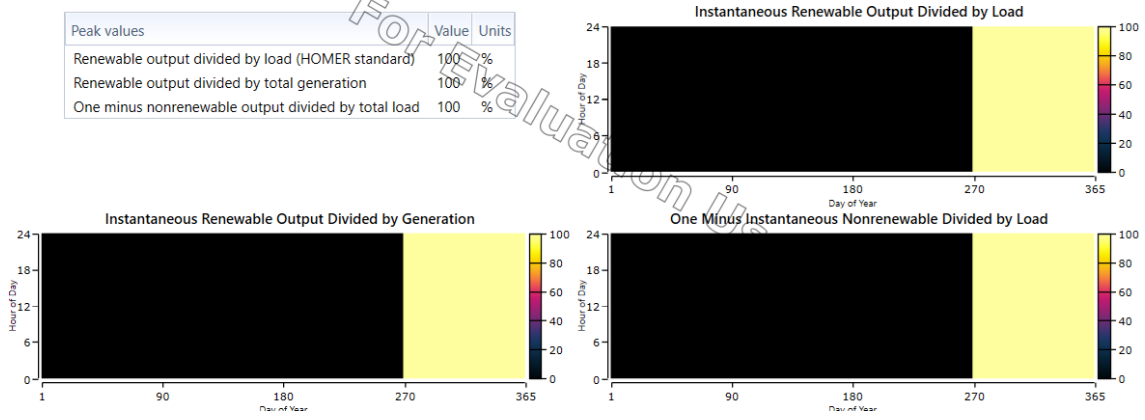


Şekil 7. Elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı.

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] O. Elma ve U. S. Selamoğulları, "Şebekeden Bağımsız Hibrit Enerji Sistemleri Kullanılarak 40 Hanelik Bir Köyün Elektrik İhtiyacının Karşılanması," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, c. 6, sa. 3, ss. 543-552, 2018.
- [2] A. D. Karağaç, "Kamu binalarında çatı üzeri fotovoltaik panel kurulum potansiyelinin belirlenmesi: Manisa ili örneği," Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 12, sa. 2, ss. 273-284, 2021.
- [3] M. S. Javadi et al., "Design and optimization of a solely renewable based hybrid energy system for a rural community," Proteus Journal, vol. 11, no. 10, pp. 120-135, 2020.
- [4] T. Salameh et al., "Techno-Economic Assessment of a Grid Connected Hybrid System for a Hospital Building," International Journal of Energy Research, vol. 45, no. 3, pp. 4500-4515, 2021.
- [5] A. G. Olabi, T. Wilberforce, and M. A. Abdelkareem, "Fuel cell application in the automotive industry and future perspective," Energy, vol. 214, p. 118955, 2024.
- [6] P. Lilienthal, T. Lambert, and P. Gilman, "Computer modeling of renewable power systems," Encyclopedia of Energy, vol. 1, pp. 633-647, 2004.
- [7] S. Sinha and S. S. Chandel, "Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 50, pp. 755-769, 2015.