



Kocaeli Gölcük Nüzhetiye Köyü için Şebekeden Bağımsız Hibrit Yenilenebilir Enerji Sisteminin Tasarımı ve Optimizasyonu: HOMER Pro Kullanılarak Teknik-Ekonomik Analiz

Halil Can OĞUR, Hasan KARAKUŞ

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

Özet

Bu çalışmada, Kocaeli ili Gölcük ilçesine bağlı Nüzhetiye köyünde yaklaşık 100 hanelik bir yerleşimin şebekeden bağımsız enerji ihtiyacını karşılamak üzere hibrit yenilenebilir enerji sistemi tasarlanmış ve teknik-ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Sistem bileşenlerinin seçimi ve en uygun konfigürasyonun belirlenmesi için HOMER Pro kullanılmış; elektrik + termal yükün birlikte ele alındığı hibrit yapı ve termal ihtiyacın elektrik yükü olarak modellendiği tam elektrifikasyon yaklaşımı karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, her iki senaryoda da PV ve rüzgârın biyogaz destekli üretim ve batarya depolama ile kullanılmasının arz sürekliliğini artırdığını göstermiştir. Ekonomik performans açısından sistemin LCOE değeri hibrit senaryoda yaklaşık 0,24 \$/kWh düzeyinde, tam elektrifikasyon senaryosunda ise yaklaşık 0,21 \$/kWh düzeyinde bulunmuştur; bu durum, tam elektrifikasyon yaklaşımının birim enerji maliyetini azaltma potansiyeline işaret etmektedir. Yenilenebilirlik açısından hibrit senaryoda sistemin yenilenebilir enerji payı yaklaşık %74 seviyesinde gerçekleşirken, tam elektrifikasyon senaryosunda uygun kurulum koşullarında %100 yenilenebilir arz hedefi sağlanabilmiştir. Sonuç olarak çalışma, yerel yenilenebilir kaynaklar ve biyogaz potansiyeli birlikte değerlendirildiğinde kırsal yerleşimlerde şebekeden bağımsız ve düşük maliyetli enerji arzının mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: PV, Biyogaz, Hibrit Enerji Sistemi, HOMER Pro

Design and Optimization of Off-Grid Hybrid Renewable Energy System for Nüzhetiye Village, Gölcük, Kocaeli: Techno-Economic Analysis Using HOMER Pro

Abstract

This study investigates the techno-economic feasibility of an off-grid hybrid renewable energy system designed to meet the energy demand of an approximately 100-household rural settlement in Nüzhetiye (Gölcük, Kocaeli, Türkiye). System sizing and optimization were conducted using HOMER Pro, and two approaches were evaluated: a hybrid configuration where electrical and thermal loads are considered together, and a full-electrification approach in which the thermal demand is modeled as an electrical load. The results indicate that combining PV and wind generation with biogas-based backup and battery storage improves supply reliability under off-grid conditions. From an economic perspective, the levelized cost of energy (LCOE) is approximately 0.24 \$/kWh for the hybrid scenario, while it decreases to about 0.21 \$/kWh under the full-electrification scenario, suggesting a lower unit energy cost potential for electrification. In terms of sustainability, the renewable energy contribution is around 74% in the hybrid scenario, whereas the full-electrification scenario can achieve 100% renewable supply under suitable design conditions. Overall, the study demonstrates that off-grid energy supply for rural communities is achievable when local renewable resources and biogas potential are jointly utilized, and it provides a practical reference for similar microgrid applications.

Keywords: PV, Biogas, Hybrid Energy System, HOMER Pro

1. Giriş

Dünya genelinde artan nüfus, sanayileşme ve yaşam standardındaki yükseliş, birincil enerji talebini hızlı bir şekilde arttırmakta ve fosil yakıtlara bağımlı mevcut enerji sistemlerinin hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilirliğini tartışmalı hale getirmektedir. Sera gazı emisyonlarının azaltılması, arz güvenliğinin sağlanması ve enerji ithalat bağımlılığının düşürülmesi amacıyla, elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hibrit sistemlerin kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Özellikle konut ölçeğinde ve dağıtık üretim temelli tasarlanan hibrit sistemler, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız çalışarak hem elektrikli yüklerin hem de yeni nesil elektrikli taşıtların enerji gereksinimlerini karşılayabilecek çözümler sunmaktadır [1]. Benzer şekilde, küçük yerleşimlerin elektrik ve ısı yüklerinin bir arada ele alındığı, 40 hanelik topluluklar gibi şebekeden bağımsız senaryolarda hibrit sistemlerin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu gösterilmiştir [2].

Türkiye özelinde yapılan çalışmalar, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin hem tekil konutlar hem de kırsal yerleşimler için önemli bir çözüm alternatifi sunduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin, Yalova ilinde şebekeden bağımsız bir çiftlik evinin elektrik ihtiyacını karşılamak üzere fotovoltaik (FV), dizel jeneratör ve lityum-iyon batarya içeren hibrit bir sistem tasarlanmış ve HOMER yazılımı kullanılarak teknik-ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir [3]. Bu çalışma, farklı batarya teknolojilerinin

ekonomiklik ve işletme ömrü bakımından karşılaştırılmasının, hibrit sistem tasarımında kritik olduğunu göstermektedir. Öte yandan, kamu binalarında çatı üstü FV potansiyelinin belirlenmesi ve mimari tasarımın enerji üretimindeki etkisinin incelendiği Yalova örneğinde, basit mimari iyileştirmelerle dahi yıllık FV enerji üretiminin büyük oranda artırılabilirdiği gösterilmiş, eğimli çatı tasarımları ile bu artışın katlanarak büyüdüğü ortaya konmuştur [4].

Ayrık yerleşimlerde veya kırsal bölgelerde tek bir konutun elektrik ihtiyacını karşılamaya yönelik hibrit sistemler de literatürde geniş yer bulmaktadır. Tekirdağ kırsalında müstakil bir ev için rüzgâr-güneş hibrit sisteminin HOMER Pro yazılımı ile analiz edildiği çalışmada, farklı rüzgâr hızı ve türbin göbek yüksekliği senaryoları altında en düşük net bugünkü maliyet değerine sahip konfigürasyon belirlenmiş ve sistemin 14 yıl civarında basit geri ödeme süresine sahip olduğu rapor edilmiştir [5]. Yenilenebilir enerji sistemlerinde hidrolik kaynakların payının artmasıyla birlikte, özellikle akarsu tipi hidroelektrik santrallerde (HES) kullanılan türbin ve jeneratör seçiminin net düşü, debi, özgül hız ve saha koşulları gibi parametrelere bağlı olarak dikkatle yapılması gerektiği vurgulanmaktadır [6]. Bu tür küçük ölçekli hidroelektrik uygulamalar, fotovoltaiik ve diğer kaynaklarla birlikte hibrit sistemlere entegre edildiğinde, sistemin toplam yenilenebilir enerji oranını artırmakta ve dizel jeneratör bağımlılığını azaltmaktadır. Sırbistan'da uzak bir balık üretim tesisinin elektrik ve ısı gereksinimlerini karşılamak üzere mikro hidroelektrik santral, FV, kojenerasyon ünitesi, dizel jeneratör, batarya, dönüştürücü ve ısı yük kontrolcüsü içeren hibrit sistemin HOMER Pro ile modellenmesi sonucunda, uygun tasarımın hem net bugünkü maliyet hem de enerji birim maliyeti açısından dizel ağırlıklı çözümlere göre çok daha avantajlı olduğu ve sera gazı emisyonlarının ciddi oranda azaltılabildiği gösterilmiştir [7].

Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde yalnızca elektrik üretim tarafı değil, enerji depolama altyapısı da sistemin teknik ve ekonomik performansını belirleyen temel unsurlardandır. Güneş ve rüzgâr gibi kesintili kaynakların hâkim olduğu izole mikro şebekelerde, çoklu enerji depolama sistemlerinin kullanımı; batarya enerji depolama ile hidrojen depolama sistemi, yakıt hücresi ve elektrolizör bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Maharashtra, Hindistan'da kırsal bir köy için rüzgâr-FV-batarya-hidrojen bileşenlerinden oluşan hibrit sistemin HOMER ile modellenmesinde, batarya ve hidrojen depolamayı birlikte içeren senaryonun hem net bugünkü maliyet hem de enerji birim maliyeti bakımından en iyi performansı verdiği ve kapasite yetersizliği sınırlamaları altında sistem güvenilirliğini artırdığı rapor edilmiştir [8]. Benzer biçimde, Kamerun'da üç farklı uzak yerleşimin elektrifikasyonu için FV/rüzgâr hibrit sistemlerine entegre edilen çeşitli enerji depolama teknolojileri, meta-sezgisel Cuckoo Search algoritması kullanılarak nicel olarak karşılaştırılmış; sonuçlar, depolama teknolojisi seçiminin yatırım maliyeti, sistem ömrü, kullanılabilirlik üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur [9]. Şebekeye bağlı hibrit sistemlerde de FV/rüzgâr/batarya senaryolarının, özellikle güvenilirlik, maliyet ve emisyon performanslarının çok seçenekli olarak optimize edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, şebeke bağlantılı hibrit sistemlerin uygun boyutlanmasıyla hem enerji maliyetlerinde hem de emisyonlarda anlamlı azalmalar sağlanabildiği gösterilmiştir [10].

Son yıllarda kırsal elektrik sistemleri ve enerji yoksulluğunun azaltılmasına yönelik hibrit mikro şebeke tasarımlarında, farklı optimizasyon algoritmalarının kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Cezayir'in Biskra bölgesinde yer alan kırsal bir

yerleşim için FV, rüzgâr, dizel ve batarya bileşenlerinden oluşan şebekeden bağımsız hibrit mikro şebekenin boyutlandırılmasında Particle Swarm Optimization (PSO), Symbiotic Organisms Search (SOS) ve Stochastic Fractal Search (SFS) gibi sezgisel yöntemler karşılaştırılmış; SFS algoritmasının enerji birim maliyeti, güç kesinti ihtimali ve sahte yük gibi performans kriterleri açısından daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir [11]. Benzer şekilde, Fas'ın kuzeyinde kırsal elektrik ihtiyacının giderilmesi amacıyla FV/rüzgâr/biyokütle tabanlı şebekeden bağımsız hibrit sistemlerin HOMER ile analiz edildiği çalışmalarda, farklı kaynak kombinasyonları için optimum boyutlandırma yapılarak teknik ve ekonomik uygulanabilirlik değerlendirilmiştir [12]. Aynı araştırma grubunun izole dağlık bölgelerde sürdürülebilir ısıtma için güneş/rüzgâr/biyokütle hibrit sistemlerinin optimizasyonuna yönelik çalışması da, ısı yüklerinin entegrasyonunun hem yakıt tüketimi hem de işletme maliyetleri üzerinde belirgin etkileri olduğunu ortaya koymaktadır [13]. Türkiye'de Hatay ili için biyogaz tabanlı hibrit bir enerji sisteminin HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş fizibilite ve çevresel analizinde ise, biyogazın yerel atık kaynaklarından değerlendirilebilmesi sayesinde, enerji maliyetlerinin düşürülebileceği ve CO₂ emisyonlarının önemli ölçüde azaltılabileceği gösterilmiştir [14].

Gelişmekte olan ülkelerde kırsal elektrik ihtiyacının karşılanması için tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sistemlerine yönelik çok sayıda çalışma, farklı kaynak kombinasyonlarının teknik-ekonomik performanslarını ortaya koymaktadır. Kırsal bölgelerde şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin modellenmesi ve optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda, rüzgâr, güneş, biyokütle ve biyogaz gibi kaynakların farklı kombinasyonları değerlendirilerek; yük profili, kaynak potansiyeli ve yatırım maliyetlerine bağlı olarak en uygun senaryolar belirlenmiştir [15,16]. Biyokütle gazlaştırma teknolojilerinin hibrit yenilenebilir enerji mikro şebekelerine entegrasyonunda, HOMER yazılımında gazlaştırıcıların modellenmesine yönelik ayrıntılı prosedürler önerilmekte ve biyokütle tabanlı üretimin sistem esnekliğine katkısı vurgulanmaktadır [17]. Tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu kırsal bölgelerde, özellikle büyükbaş hayvancılıktan kaynaklanan gübre miktarı ve besin içeriğinin doğru tahmini, biyogaz potansiyelinin belirlenmesi için kritik olup; bu amaçla geliştirilen modeller, hayvan sayısı, yem ve üretim tipi gibi parametrelere dayalı olarak gübre ve besin madde atımını tahmin etmektedir [18]. Türkiye'de kırsal, şebekeden bağımsız bölgelerin karbon emisyonunun azaltılmasına yönelik hibrit yenilenebilir hidrojen sistemlerinin incelendiği çalışmalarda, rüzgâr ve FV gibi kaynaklardan üretilen fazla elektrikle hidrojen üretiminin, uzun dönemli enerji depolama ve emisyon azaltımı açısından önemli bir avantaj sağladığı gösterilmiştir [19]. Benzer şekilde, Pakistan'da büyükbaş hayvan gübresinden biyogaz üretimine dayalı elektrik üretim potansiyeli ve fizibilitesinin değerlendirildiği çalışmada, hayvansal atıkların enerji üretiminde değerlendirilmesinin hem ekonomik getirisi hem de çevresel faydaları ortaya konmuş; biyogaz tabanlı sistemlerin kırsal bölgelerde sürdürülebilir elektrik üretimi için güçlü bir aday olduğu vurgulanmıştır [20].

Bu literatür, farklı coğrafyalarda ve farklı kaynak kombinasyonlarıyla tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin; özellikle kırsal yerleşimlerde, balık çiftlikleri, çiftlik evleri, köy toplulukları ve izole mikro şebekelerde teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu, uygun boyutlandırma ve optimizasyon yaklaşımları kullanıldığında ise hem enerji maliyetlerinin hem de sera gazı emisyonlarının anlamlı şekilde azaltılabildiğini göstermektedir [1-20]. Bu bağlamda, bu çalışma kapsamında seçilen senaryo için yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hibrit bir sistemin HOMER

tabanlı teknik-ekonomik analizi gerçekleştirilmekte; farklı senaryolar karşılaştırılarak en düşük maliyetli ve en yüksek yenilenebilir enerji oranına sahip tasarım seçenekleri ortaya konulmaktadır. Bu yönüyle çalışma, literatürde sunulan örneklerle uyumlu olarak, Türkiye’de kırsal izole bir uygulama için hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin fizibilitesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

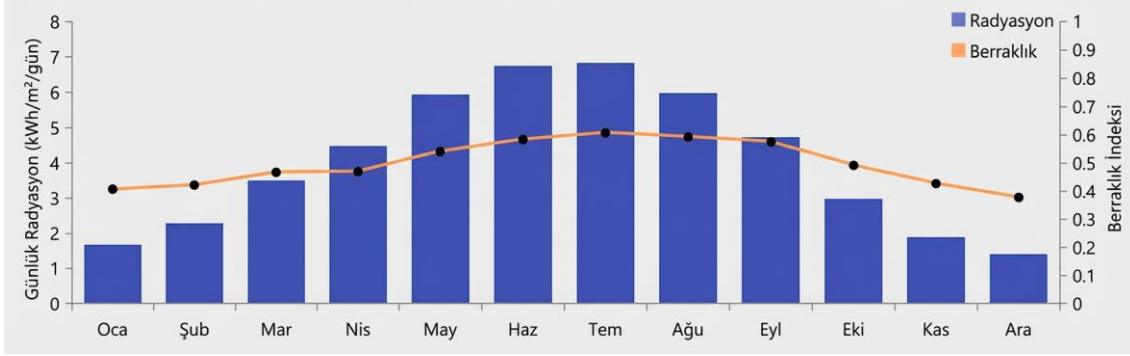
2. Sistem Tanıtımı

Bu çalışmada, Kocaeli ili Gölcük ilçesine bağlı Nüzhetiye köyü için şebekeden tamamen bağımsız çalışacak bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında, yaklaşık 100 haneden oluşan köyün hem elektriksel hem de ısı enerji ihtiyacının yerinde ve sürdürülebilir biçimde karşılanması amaçlanmaktadır. Literatürde konut ölçekli [1,3,5], küçük yerleşim birimleri [2,11,15,16] ve tarımsal, kırsal uygulamalar [7,12,13,14,19,20] için benzer hibrit sistemler önerilmiş olup, bu çalışma söz konusu yaklaşımları Nüzhetiye köyü özelinde ele alınmaktadır.

Tasarlanan sistemde birincil yenilenebilir enerji kaynakları olarak FV paneller, rüzgâr türbinleri ve biyogaz tabanlı bir üretim ünitesi kullanılmaktadır. Buna ek olarak, sistemde kısa ve orta vadeli enerji depolama ihtiyacını karşılamak üzere batarya enerji depolama sistemi, doğru akım ve alternatif akım tarafları arasında güç alışverişini sağlayan bir dönüştürücü, ısı yüklerinin optimum yönetimi için bir ısı yük birimi ve gerekli durumlarda devreye giren bir kazan bulunmaktadır. Bu bileşenler, literatürdeki benzer hibrit sistem çalışmalarında kullanılan bileşen setleri ile uyumludur [3,5,7,8,12-14].

Sistemin temel amacı, Nüzhetiye köyündeki 100 hanenin yıllık elektrik ve termal yük profilini karşılayabilecek, yüksek yenilenebilir enerji oranına sahip, dizel yakıtı veya ulusal şebekeye bağımlı olmayan bir mikro şebeke oluşturmak ve bu mikro şebekenin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliğini HOMER benzeri bir optimizasyon ve simülasyon aracıyla analiz etmektir. Yük profilinin belirlenmesinde, konutların aydınlatma, beyaz eşya, küçük elektrikli cihazlar, ısıtma-soğutma, su ısıtma ve tarımsal ekipman gibi tipik kırsal konut yükleri dikkate alınmaktadır. Termal yükler ise, özellikle su ısıtma ve ısınma amaçlı enerji tüketimini temsil edecek şekilde modellenmiş; bu yüklerin bir kısmının elektriksel, bir kısmının ise biyogaz destekli ısı üretimle karşılanabileceği varsayılmıştır [2,7,13,14,20].

Güneş enerjisi bileşeni, köyün yıllık küresel yatay radyasyon verileri ve panel eğim/açı optimizasyonu göz önünde bulundurularak boyutlandırılmış FV alanından oluşmaktadır. Literatürde olduğu gibi [3-5,8,10,12], FV panellerin DC baraya bağlı olduğu ve üretimin doğrudan yükü, bataryaları veya gerektiğinde ısı yük birimini besleyebildiği kabul edilmektedir. Rüzgâr enerjisi bileşeni ise, bölgedeki rüzgâr hızına bağlı olarak seçilen bir veya birden fazla rüzgâr türbininden oluşmakta; güç eğrisi ve rüzgâr dağılımı dikkate alınarak saatlik üretim profili elde edilmektedir [5,7,8,11].



Grafik 1. Nüzhetiye Aylık Güneşlenme Grafiği



Grafik 2. Nüzhetiye Aylık Rüzgar Hızı Grafiği

Çalışmanın önemli tasarım parametrelerinden biri, rüzgâr türbini göbek yüksekliğinin sistem performansına etkisidir. Bu kapsamda, rüzgâr türbini için birden fazla göbek yüksekliği senaryosu oluşturulmuştur. Literatürde de farklı türbin yüksekliklerinin enerji üretimi ve birim maliyet üzerindeki etkisinin ayrıntılı biçimde incelendiği çalışmalar mevcuttur [5,7,11]. Benzer yaklaşımla, bu çalışmada da daha düşük ve daha yüksek göbek yüksekliği seçenekleri değerlendirilerek, rüzgâr hızının yükseklikle değişimi dikkate alınmış, her bir senaryo için rüzgâr üretimi, sistemin net bugünkü maliyeti ve enerji birim maliyeti üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Biyogaz bileşeni, köydeki hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan büyükbaş hayvan gübresinin değerlendirilmesine dayanmaktadır. Atık yönetimi ve yenilenebilir enerji üretimi açısından önemli fırsatlar sunan bu yaklaşım, literatürde biyogaz temelli hibrit sistemler için önerilen yöntemlerle paralellik göstermektedir [14,17–20]. Köydeki hayvan sayısı, beslenme ve barınma koşulları dikkate alınarak hayvan başına günlük gübre miktarı ve içerdiği organik madde miktarı tahmin edilmekte; Nennich ve ark.'nın [18] sunduğu yöntemlere benzer şekilde toplam gübre ve besin madde atımı modellenmektedir. Elde edilen biyogaz, jeneratör veya CHP ünitesi vasıtasıyla elektrik ve/veya ısı üretiminde kullanılmakta; böylece hem elektriksel yük hem de termal yük kısmen biyogazla karşılanabilmektedir [12–14,19,20].

Batarya enerji depolama sistemi, FV ve rüzgâr üretiminin kesintili yapısını dengelemek, ani yük değişimlerini sönmek ve sistem güvenilirliğini artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Literatürde birçok çalışmada [3,5,8–11,15,16], lityum-iyon veya kurşun-asit batarya teknolojilerinin farklı boyutlandırma stratejileri ile hibrit sistemlere entegre edildiği ve enerji maliyeti, yenilenebilir enerji payı, kayıp yük olasılığı gibi performans göstergeleri üzerinden değerlendirildiği görülmektedir. Alınmakta da uygun batarya kimyası seçilerek, deşarj derinliği, çevrim ömrü ve

maliyet parametreleri dikkate alınmakta; batarya bankasının kapasitesi, yük profili ve yenilenebilir üretim karakteristikleri ile uyumlu olacak şekilde optimize edilmektedir.

Sistemdeki dönüştürücü DA baraya bağlı FV paneller, rüzgâr türbini, bataryalar ve biyogaz jeneratörü ile AA baraya bağlı konut yükleri arasındaki güç akışını yönetmektedir. Dönüştürücü hem evirici hem de doğrultucu modunda çalışarak çift yönlü enerji akışına izin vermekte, benzer hibrit mikro şebeke çalışmalarında olduğu gibi [3,5,7,8,11–13,15,16] sistemin kararlı ve verimli çalışmasını sağlamaktadır.

Çalışmada ayrıca, sistem bileşenlerinin etkileşimini ve tasarım kararlarının sonuçlarını daha iyi görebilmek amacıyla farklı senaryolar tanımlanmıştır. İlk senaryoda, köyün toplam elektrik ve termal yükleri birlikte modellenmiş; FV, rüzgâr, biyogaz, batarya, dönüştürücü, ısı yük ve kazan bileşenleri birlikte değerlendirilerek hem elektrik hem de ısı talebinin hibrit sistem tarafından ne ölçüde ve hangi maliyetle karşılanabileceği analiz edilmiştir. Bu senaryo, literatürde balık üretim tesisleri veya kırsal yerleşimler için elektrik ve ısı yüklerin entegre edildiği hibrit sistem çalışmalarına benzer bir yaklaşım sunmaktadır [2,7,12,13].

İkinci senaryoda ise, termal yük bileşeni sistemden çıkarılmış ve bunun yerine “Elektrik Yüğü 2” olarak adlandırılan ek bir elektriksel yük tanımlanmıştır. Böylece, daha önce termal yük olarak modellenen ihtiyaçların, tamamen elektrikli çözümler (örneğin elektrikli ısıtıcılar, ısı pompası vb.) üzerinden karşılandığı bir senaryo oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, ısı ihtiyaçların doğrudan elektriksel yük formunda temsil edilmesi durumunda sistem boyutlarının, bileşen seçimlerinin ve enerji maliyetinin nasıl değişeceğini inceleme olanağı sağlamaktadır. Literatürde, benzer şekilde farklı yük profillerinin ayrı ayrı değerlendirilerek sistem tasarımına etkilerinin araştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır [2,7,13,15,16].

Bu iki ana senaryoya ek olarak, rüzgâr türbini göbek yüksekliğinin farklı alınması ile elde edilen alt senaryolar da dikkate alınmıştır. Böylece hem yük yapısındaki değişimin hem de rüzgâr türbini kurulum yüksekliğinin, sistemin toplam yatırım maliyeti, işletme maliyeti, net bugünkü maliyeti, enerji birim maliyeti, yenilenebilir enerji oranı, emisyonlar ve kayıp yük olasılığı gibi temel performans göstergelerine etkisi kapsamlı biçimde karşılaştırılabilecektir [3,5,7,8,11–13,15,16,19].

Sonuç olarak, bu bölümde tanıtılan Nüzhetiye köyü için tasarlanan hibrit yenilenebilir enerji sistemi; FV, rüzgâr, biyogaz, batarya, dönüştürücü, ısı yük ve kazan bileşenlerinden oluşmakta, farklı rüzgâr türbini yükseklikleri ve yük senaryoları altında incelenmektedir

3. Analiz ve Yöntem

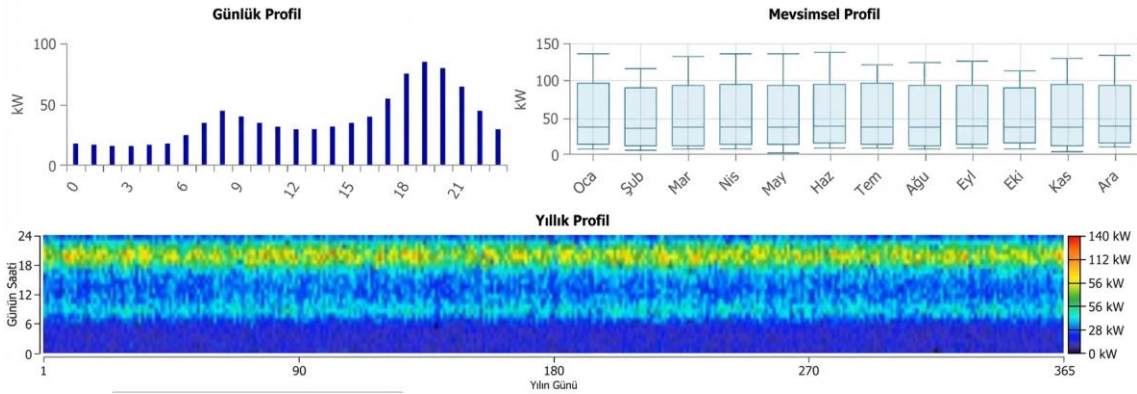
Bu bölümde, Nüzhetiye köyü için tasarlanan hibrit sistemin HOMER Pro ortamında nasıl modellendiği, yük profillerinin nasıl oluşturulduğu ve senaryoların nasıl kurgulandığı açıklanmaktadır. Çalışmanın temel yaklaşımı; köyün elektriksel ve ısı yüklerini tanımlamak, bu yükleri karşılayabilecek FV–rüzgâr–biyogaz–batarya tabanlı bir sistem kurmak ve farklı senaryolar altında sistemin teknik ve ekonomik performansını karşılaştırmaktır.

3.1. Yük Profillerinin Tanımlanması

Köy için iki farklı elektriksel yük ve bir termal yük profili oluşturulmuştur. Yükler HOMER'in Electric Load ve Thermal Load modülleri kullanılarak saatlik çözünürlükte tanımlanmıştır.

Elektrik Yük 1

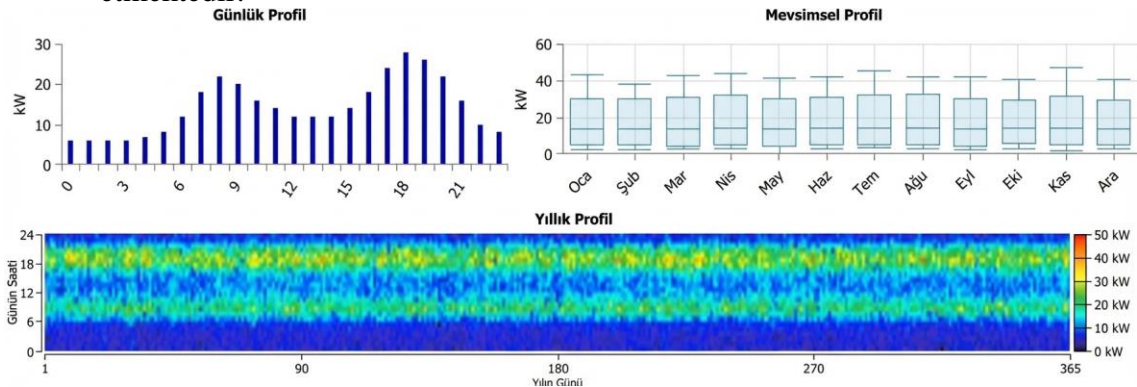
- Günlük ortalama enerji tüketimi: yaklaşık 800 kWh/gün
- Ortalama güç: 33,33 kW
- Pik güç: yaklaşık 120,31 kW
- Yük faktörü: 0,28
- Günlük profil incelendiğinde akşam saatlerinde belirgin bir pik görülmekte, yıllık ısı haritasında yaz ve kış aylarında yük seviyelerinin nispeten dengeli olduğu izlenmektedir. Bu yük, köydeki 100 hanenin aydınlatma, beyaz eşya, küçük ev aletleri ve ortak tüketimlerini temsil etmektedir.



Grafik 3. Nüzhediye Elektrik Yük Profili

Termal Yük

- Günlük ortalama enerji tüketimi : yaklaşık 300 kWh/gün
- Ortalama güç: 12,5 kW
- Pik güç: yaklaşık 40,83 kW
- Yük faktörü: 0,31
- Termal yük, özellikle sabah ve akşam saatlerinde yoğunlaşmakta olup, yıl boyunca düzenli fakat kış aylarında daha yüksek seviyelere sahip bir profil göstermektedir. Bu yük; mekân ısıtma ve sıcak su gereksinimini temsil etmektedir.

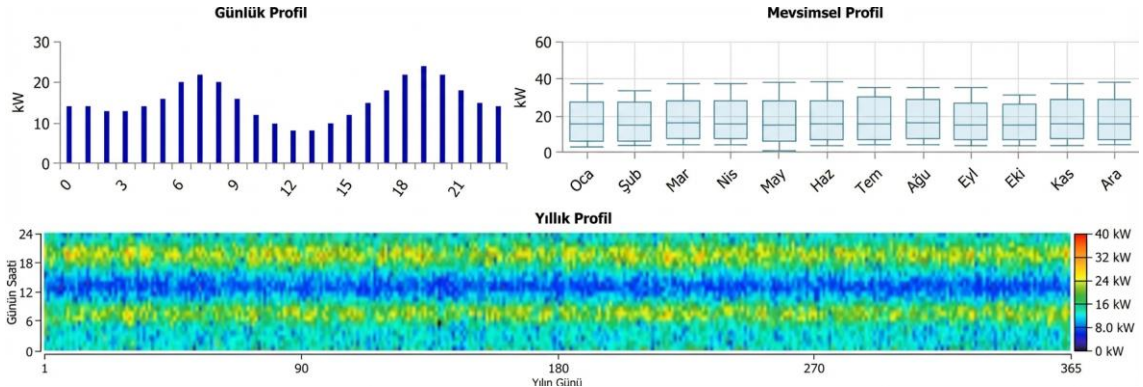


Grafik 4. Nüzhediye Termal Yük Profili

Elektrik Yük 2

- İkinci senaryoda termal yük sistemi devre dışı bırakıldığından, aynı enerji ihtiyacı Elektrik Yük 2 adı verilen ikinci bir elektrik yükü olarak tanımlanmıştır. Elektrik Yük 2'nin yıllık enerji miktarı, termal yükle aynı olacak şekilde ölçeklenmiş; günlük ve mevsimsel dağılımı da termal yüke benzer olacak

şekilde düzenlenmiştir. Böylece, ısı gereksiniminin ısı pompası veya elektrikli ısıtıcılar gibi tamamen elektrikli teknolojilerle karşılandığı bir “tam elektrifikasyon” durumu modellenmiştir.



Grafik 5. Nüzhetiye Termal Yük Yerine Kullanılan Elektrik Yük Profili

Bu yapı sayesinde, aynı köy için iki farklı enerji stratejisi doğrudan karşılaştırılabilir hâle getirilmiştir.

3.2. Sistem Bileşenlerinin Modellemesi

Hibrit sistem; FV, rüzgâr türbini, biyogaz jeneratörü, lityum-iyon batarya, dönüştürücü, termal yük kontrolörü ve kazan bileşenlerinden oluşmaktadır. Bileşenlere ait temel teknik ve ekonomik parametreler Tablo 1’de özetlenmiş, ardından metin içinde kısaca açıklanmıştır.

| Bileşen | Parametre | Değer | Birim | Bileşen | Parametre | Değer | Birim | | |
|------------------------------------|----------------------------|---------|-----------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|---------|
| PV Panel | Nominal güç | 1 | kW | Dönüştürücü (Converter) | Nominal güç | 1 | kW | | |
| | Ömür | 25 | yıl | | Ömür | 15 | yıl | | |
| | Sermaye maliyeti | 900 | \$/kW | | Sermaye maliyeti | 300 | \$/kW | | |
| | Değiştirme maliyeti | 900 | \$/kW | | Değiştirme maliyeti | 300 | \$/kW | | |
| | İşletme & bakım maliyeti | 10 | \$/kW/yıl | | İşletme & bakım maliyeti | 0 | \$/yıl | | |
| | Verim | 20 | % | | Verim | 95 | % | | |
| Rüzgâr Türbini (Bergey Excel 10-R) | Nominal güç | 10 | kW | Termal Yük Kontrolörü (TLC) | Nominal güç | 50 | kW | | |
| | Kule yüksekliği | 30 / 50 | m | | Ömür | 20 | yıl | | |
| | Ömür | 20 | yıl | | Sermaye maliyeti | 10.000 | \$ | | |
| | Sermaye maliyeti | 25.000 | \$/adet | | Değiştirme maliyeti | 10.000 | \$ | | |
| | Değiştirme maliyeti | 25.000 | \$/adet | | İşletme & bakım maliyeti | 5 | \$/yıl | | |
| | İşletme & bakım maliyeti | 300 | \$/yıl | | Verim | 100 | % | | |
| Biyogaz Jeneratörü | Nominal güç | 100 | kW | Kazan (Boiler) | Yakıt türü | Dizel | - | | |
| | Ömür | 15.000 | saat | | Yakıt fiyatı | 1,25 | \$/L | | |
| | Sermaye maliyeti | 300.000 | \$ | | Verim | 85 | % | | |
| | Değiştirme maliyeti | 300.000 | \$ | | Ömür | 20 | yıl | | |
| | İşletme & bakım maliyeti | 0,10 | \$/saat | | Sermaye maliyeti | 0 | \$ | | |
| | Yakıt türü | Biyogaz | - | | İşletme & bakım maliyeti | 0 | \$/yıl | | |
| Li-Ion Batarya (Generic 100kWh) | Yakıt fiyatı | 1,00 | \$/kg | Elektrik Yükü 1 | Ortalama günlük tüketim | 800 | kWh/gün | | |
| | Nominal kapasite | 100 | kWh | | Pik güç | ~130 | kW | | |
| | Ömür | 10 | yıl | | Termal Yük (Senaryo 1) | Ortalama günlük tüketim | 300 | kWh(th)/gün | |
| | Maksimum şarj/deşarj akımı | 83,3 | A | | | Pik güç | ~40 | kW | |
| | Değiştirme maliyeti | 20.000 | \$/adet | | | Elektrik Yükü 2 (Senaryo 2) | Ortalama günlük tüketim | 300 | kWh/gün |
| | İşletme & bakım maliyeti | 50 | \$/yıl | | | | Pik güç | ~31,5 | kW |
| Minimum SOC | 20 | % | | | | | | | |
| Şarj/deşarj verimi | 95 | % | | | | | | | |

Tablo 1. Sistem Bileşenlerinin Teknik ve Ekonomik Parametreleri

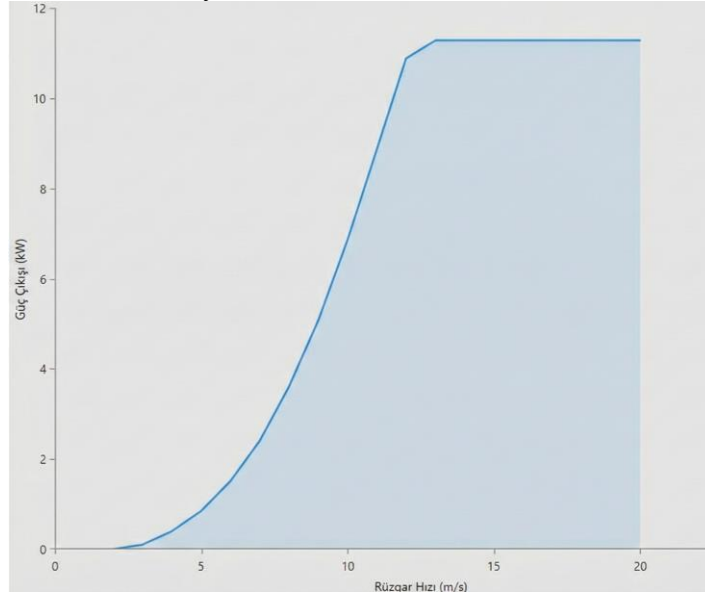
3.2.1. Fotovoltaik Sistem

PV sistemi HOMER’daki “Generic flat plate PV” bileşeni kullanılarak modellenmiştir. Panel tipi düz plaka olup, 1 kW’lık birim kapasite için sermaye maliyeti 900 \$/kW, yenileme maliyeti 700\$/kW ekonomik ömrü ise 25 yıl olarak tanımlanmıştır. Sahaya özgü kirlenme, kablo ve inverter kayıplarını temsil etmek amacıyla panel

çıkışına %88 derating faktörü uygulanmıştır. PV üretimi, saatlik global yatay radyasyon ve sıcaklık verilerine göre HOMER tarafından hesaplanmıştır.

3.2.2. Rüzgâr Türbini








Rüzgâr bileşeni olarak Bergey Excel 10-R tipi, 10 kW nominal güce sahip yatay eksenli bir türbin seçilmiştir. Türbinin kule yüksekliği temel durumda 30 m olarak tanımlanmış, ayrıca farklı kule yükseklikleri için hassasiyet analizi yapılmıştır. Sermaye maliyeti 25.000\$/Ad., yenileme maliyeti 20.000\$ ve yıllık işletme-bakım maliyeti ise 300 \$ olarak alınmıştır. Türbin, AC baraya bağlanarak doğrudan elektrik yüklerini ve dönüştürücü üzerinden DC barayı beslemektedir.



Grafik 6. Rüzgar Türbin Karakteristiği

3.2.3. Biyogaz Jeneratörü

Köydeki hayvan varlığından elde edilebilecek gübre miktarına dayanarak biyogaz potansiyeli hesaplanmış ve bu biyogazı yakıt olarak kullanan Generic Biogas Genset modeli seçilmiştir. Jeneratörün birim gücü 1 kW olarak tanımlanmış, HOMER'in "search space" özelliği ile toplam kurulu güç 0–200 kW aralığında optimize edilmiştir. Minimum yük oranı %70 seçilerek, jeneratörün çok düşük yüklerde verimsiz çalışmasının önüne geçilmiştir. Yakıt fiyatı 1 \$/kg olarak tanımlanmış, yakıtın sürekliliği gübre ve biyogaz üretim hesabına göre sağlandığı varsayılmıştır.

|  Hayvan Türü |  Adet |  Gübre Miktarı (kg/baş/gün) |  Toplam Gübre (kg/gün) |  Toplam Gübre (Geri kazanım = 0,7) (kg/gün) |  Toplam Biyogaz Verimi (m ³ /gün) |  Potansiyel Güç Verimi (kWh/gün) |
|---|--|--|---|--|---|---|
| Büyükbaş | 500 | 10 | 5.000 | 3.500 | 126,00 | 172,62 |
| Küçükbaş | 700 | 1 | 700 | 490 | 17,64 | 24,17 |
| Toplam | 1.200 | | 5.700 | 3.990 | 143,64 | 196,79 |

Tablo 2. Nüzhetiye Köyü için Tahmini Biyogaz Güç Potansiyeli

3.2.4. Batarya enerji depolama sistemi

Depolama birimi olarak Generic 100 kWh Li-Ion modeli kullanılmıştır. Bu model 600 V gerilimde 100 kWh nominal enerji kapasitesi ve %90 çevrim verimine sahiptir. Minimum doluluk oranı %20, başlangıç doluluk oranı ise %50 olarak belirlenmiştir. Ekonomik ömür 10 yıl veya 600.000 kWh enerji çevrimi olarak tanımlanmış; sermaye maliyeti 20.000\$, yenileme maliyeti 15.000\$ ve yıllık O&M maliyeti 50 \$ kabul edilmiştir. HOMER, toplam batarya sayısını sistem maliyetini en aza indirecek şekilde optimize etmektedir.

3.2.5. Dönüştürücü

AC ve DC baralar arası güç dönüşümü için System Converter kullanılmıştır. İnverter ve doğrultucu verimleri %95 olarak atanmış, ekonomik ömür 15 yıl alınmıştır. 1 kW'lık birim kapasite için sermaye maliyeti 300\$/kW, yenileme maliyeti 250\$/kW olarak girilmiştir. Dönüştürücü, PV ve batarya gibi DC bileşenlerin AC yükleri beslemesini, aynı zamanda AC taraftan gelen gücün bataryaları şarj etmesini sağlamaktadır.

3.2.6. Termal yük kontrolörü ve kazan

Termal yükler için, fazla elektrik enerjisinin ısı enerjisiye dönüştürülmesini sağlayan Thermal Load Controller (TLC) kullanılmıştır. TLC, 1 kW birim kapasite için 200\$/kW sermaye, 170\$/kW yenileme maliyeti ve 0,10 \$/yıl O&M maliyetine sahip olup, toplam kapasitesi HOMER tarafından 50 kW'a kadar optimize edilmektedir.

Isı üretiminde yardımcı kaynak olarak Generic Boiler bileşeni eklenmiştir. Kazan %85 verimle çalışmakta ve yakıt olarak 1,25 \$/L birim fiyatla dizel kullanmaktadır. Böylece, biyogaz üretiminin yetersiz olduğu veya elektrik fazlasının bulunmadığı dönemlerde termal yük, kazandan sağlanan ısı ile karşılanabilmektedir.

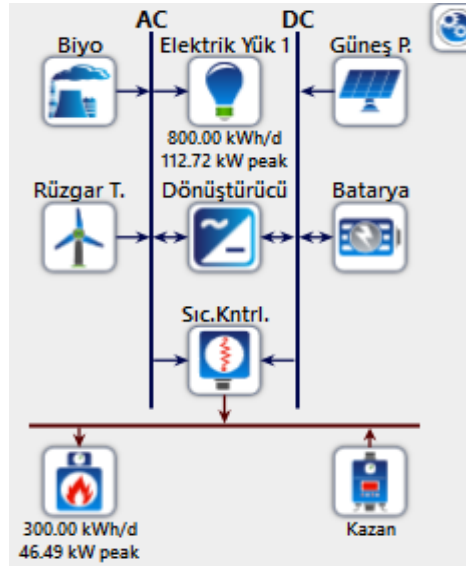
3.3. Senaryoların Tanımlanması

Bu çalışma kapsamında iki ana senaryo tanımlanmıştır:

Senaryo 1 – Elektrik + Termal Yük Senaryosu:

- Elektrik Yük 1 ve Termal Yük birlikte sisteme tanımlanmıştır. Biyogaz jeneratörü, PV, rüzgâr türbini, batarya, dönüştürücü, TLC ve kazan bileşenleri aktif hâle getirilmiş; böylece hem elektriksel hem de ısı ihtiyaçlarının hibrit

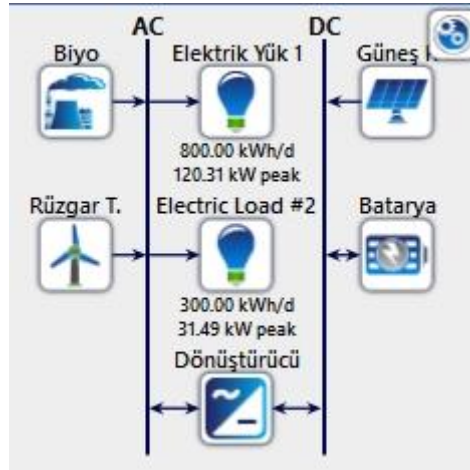
sistem tarafından karşılandığı bir yapı elde edilmiştir. Fazla yenilenebilir elektrik, TLC üzerinden termal yüke yönlendirilerek sistemin toplam verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir [7,13].



Şekil 1. Senaryo 1 için Bara Diyagramı

Senaryo 2 – Tam Elektrifikasyon Senaryosu:

- Bu senaryoda Termal Yük, TLC ve kazan bileşeni devre dışı bırakılmış; termal enerji gereksinimi ile aynı yıllık enerjiye sahip Elektrik Yük 2 sisteme eklenmiştir. Böylece, toplam elektrik yükü (Elektrik Yük 1 + Elektrik Yük 2) artmış, ancak ayrı bir ısıl sistem bulunmayan, tamamen elektrikli bir yapı simüle edilmiştir. Bu senaryo sayesinde, aynı köy için “hibrit elektrik + ısı” yaklaşımı ile “tamamen elektrikli” yaklaşımın teknik ve ekonomik sonuçları doğrudan karşılaştırılabilmektedir.



Şekil 2. Senaryo 2 için Bara Diyagramı

Her iki senaryo için de rüzgâr türbini göbek yüksekliği farklı değerler alacak şekilde hassasiyet analizi yapılmış; kule yüksekliği arttıkça rüzgâr hızındaki artışın enerji üretimi, batarya boyutu, biyogaz tüketimi ve toplam maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir [5,7,11].

3.4. Optimizasyon ve Değerlendirme

HOMER, yukarıda tanımlanan yük profilleri, kaynak verileri ve bileşen parametrelerine dayanarak çok sayıda konfigürasyon üretmekte ve her bir konfigürasyon için:

- Net Bugünkü Maliyet (NPC),
- Enerji birim maliyeti (COE),
- Yenilenebilir enerji oranı,
- Kayıp yük olasılığı (LPSP)

gibi performans göstergelerini hesaplamaktadır.

Bu çalışmada amaç fonksiyonu, literatürdeki benzer çalışmalarla uyumlu olarak [3,5,7,8,11–16] NPC ve COE'yi en aza indirmek, aynı zamanda yenilenebilir enerji oranını ve sistem güvenilirliğini mümkün olduğunca yüksek tutmaktır. Bu kapsamda, HOMER'in optimizasyon sonuç tabloları kullanılarak her bir senaryo ve kule yüksekliği kombinasyonu için en uygun hibrit sistem konfigürasyonu belirlenmiştir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Elektrik yükü için oluşturulan günlük ve yıllık profiller, 100 haneli bir köy yerleşimi için beklenen tipik davranışı sergilemektedir. Günlük profilde sabah saatlerinde 10–20 kW bandında başlayan yük, gün içinde kademeli olarak artmakta ve özellikle 18:00–22:00 aralığında 80–90 kW seviyelerine ulaşarak pik yapmaktadır. Yıllık ısı haritasında da yılın tamamında akşam saatlerinde yoğunlaşan yüksek yük bölgeleri görülmektedir. HOMER raporuna göre Elektrik Yükü 1'in ortalama tüketimi 800 kWh/gün, pik gücü ise yaklaşık 130 kW'tır.

Senaryo 1'de termal yük, ayrı bir 300 kWh/gün profili ile modellenmiştir. Günlük grafikte sabah ve akşam saatlerinde yükselen, gün ortasında azalan bir yapı söz konusudur. Pik termal güç yaklaşık 40–50 kW seviyesindedir. Senaryo 2'de bu termal yük, aynı profil korunarak Elektrik Yükü 2 adıyla tamamen elektriksel yüke çevrilmiştir; böylece toplam elektrik talebi 1.100 kWh/gün seviyesine çıkmıştır.

Kaynak tarafında, global güneş radyasyonu grafikleri Nüzhetiye bölgesinin yıl boyunca makul bir güneş potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ocak–Şubat aylarında ortalama radyasyon 0,3–0,4 kW/m², Nisan–Eylül döneminde ise 0,7–0,9 kW/m² aralığındadır. En yüksek değerler Haziran–Temmuz aylarında görülmektedir.

Rüzgâr hızı kutu grafikleri, tüm yıl için geniş bir dağılım olduğunu göstermektedir. Medyan değerler çoğu ayda 4–5 m/s civarındadır; maksimum değerler 14–16 m/s'ye ulaşmaktadır. Rüzgâr türbini güç eğrisi ile birlikte değerlendirildiğinde, 4 m/s civarında üretimin başladığı ve yaklaşık 11–12 m/s'den sonra türbinin nominal güce ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle hem 30 m hem de 50 m kule yüksekliğinde rüzgâr türbininin yılın önemli bir kısmında az ya da çok üretim yapabildiği söylenebilir.

Bu yük ve kaynak profilleri birlikte değerlendirildiğinde, Nüzhetiye köyünde hem PV hem de rüzgâr açısından anlamlı bir yenilenebilir potansiyel bulunduğu; yükün ise akşam saatlerine yığılmış konut tipi bir karakter sergilediği, dolayısıyla depolama ve jeneratör desteğinin kritik olduğu anlaşılmaktadır.

4.1. Senaryo 1 – Elektrik + Termal Yükün Birlikte Karşılandığı Durum

Senaryo 1'de sistem; 57,7 kW PV, 10 kW rüzgâr türbini, 100 kW biyogaz jeneratörü, 200 kWh Li-ion batarya, 80 kW dönüştürücü, 50 kW TLC ve dizel kazan bileşenlerinden oluşmaktadır.

| Sensitivity | Architecture | | | | | | | Cost | | | | System | Project Economics | |
|--------------------------|---------------|-----------|--------------|-------------|-----------------|------------------|----------|---------------|------------------------|------------|--------------|---------|---------------------|--|
| Rüzgâr T. Hub Height (m) | Güneş P. (kW) | Rüzgâr T. | Biyogaz (kW) | Batarya (#) | Sic.Kntrl. (kW) | Dönüştürücü (kW) | NPC (\$) | LCOE (\$/kWh) | Operating cost (\$/yr) | CAPEX (\$) | Ren Frac (%) | IRR (%) | Simple Payback (yr) | |
| 30.0 | 58.9 | 1 | 100 | 2 | 50.0 | 79.6 | \$1.17M | \$0.238 | \$52,686 | \$451,901 | 74.1 | 18 | 6.2 | |
| 50.0 | 57.7 | 1 | 100 | 2 | 50.0 | 80.9 | \$1.16M | \$0.237 | \$52,441 | \$451,205 | 74.1 | 18 | 6.2 | |

| Optimization Results | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|-----------|--------------|-------------|-----------------|------------------|----------|---------------|------------------------|------------|--------------|-------------------|---------------------|-------|
| Double click on a system to see its Simulation Details. | | | | | | | | | | | | | | |
| Categorized Over | | | | | | | | | | | | | | |
| Export... Export Details... | | | | | | | | | | | | | | |
| Architecture | | | | | | | Cost | | | | System | Project Economics | | |
| Rüzgâr T. (m) | Güneş P. (kW) | Rüzgâr T. | Biyogaz (kW) | Batarya (#) | Sic.Kntrl. (kW) | Dönüştürücü (kW) | NPC (\$) | LCOE (\$/kWh) | Operating cost (\$/yr) | CAPEX (\$) | Ren Frac (%) | IRR (%) | Simple Payback (yr) | Hours |
| 1 | 57.7 | 100 | 2 | 50.0 | 80.9 | \$1.16M | \$0.237 | \$52,441 | \$451,205 | 74.1 | 18 | 6.2 | 2,357 | |
| 62.0 | | 100 | 2 | 50.0 | 79.1 | \$1.17M | \$0.238 | \$54,375 | \$429,537 | 74.1 | 23 | 6.1 | 2,496 | |
| 5 | | 100 | 2 | 50.0 | 81.5 | \$1.24M | \$0.256 | \$54,394 | \$499,435 | 73.5 | 9.4 | 6.6 | 2,358 | |
| 100 | | 100 | 2 | 50.0 | 77.9 | \$1.30M | \$0.273 | \$68,470 | \$373,369 | 72.7 | | | 3,297 | |

Tablo 3. Senaryo 1 için HOMER Pro Çıktıları

HOMER raporuna göre 50m türbin yüksekliğindeki senaryoda PV sistemi yılda 81.605 kWh, rüzgâr türbini 19.144 kWh elektrik üretmektedir. Biyogaz jeneratörü ise 229.526 kWh/yr elektrik üreterek toplam talebin önemli kısmını tamamlamakta, kalan dengesizlikler batarya üzerinden dengelenmektedir. Bataryanın yıllık enerji çevrimi 125.709 kWh olup ömür beklentisi yaklaşık 9,5 yıl'dır. Termal tarafta dizel kazan yılda 103.991 kWh, TLC ise fazla elektrikten 10.142 kWh ısı üretmektedir.

Bu bileşenler ile toplam enerji arzının yaklaşık %74'ü yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır. Kalan kısım dizel kazan üzerinden karşılanmaktadır. Batarya doluluk oranı yıl boyunca çoğunlukla %20–90 aralığında kalmakta, minimum SOC eşiği olan %20'nin altına çok seyrek düşmektedir. Bu durum seçilen 200 kWh'lık kapasitenin hem güvenilirlik hem de maliyet açısından dengeli olduğunu göstermektedir.

Ekonomik açıdan, yalnızca 100 kW jeneratör ve 200 kWh bataryadan oluşan mevcut sistemin yıllık işletme maliyeti 68.387\$/yıl iken, önerilen hibrit sistemle bu maliyet 52.365\$/yıl'a düşmüştür. Yani yıllık yaklaşık 15.239\$ tasarruf sağlanmaktadır. Ek yatırım tutarı 77.724\$, basit geri ödeme süresi 6,16 yıl, iç kârlılık oranı %18,2 ve yatırımın geri dönüş oranı %16,5 olarak hesaplanmıştır.

Duyarlılık analizinde rüzgâr türbini kule yüksekliği 30 m ve 50 m için ayrıca incelenmiştir.

| Parametre | Birim | 30 m Kule Yüksekliği | 50 m Kule Yüksekliği |
|--|--------|----------------------|----------------------|
| Net Bugünkü Maliyet (NPC) | M\$ | ≈ 1,17 | 1,16 |
| Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) | \$/kWh | 0,238 | 0,237 |
| Yıllık İşletme Maliyeti (Operating cost) | \$/yıl | 52.686 | 52.441 |
| İlk Yatırım Maliyeti (CAPEX) | \$ | 451.901 | 451.901 |
| Yenilenebilir Enerji Oranı (RenFrac) | % | 74,1 | 74,1 |
| İç Kârlılık Oranı (IRR) | % | ≈ 18 | 18,2 |
| Basit Geri Ödeme Süresi | yıl | ≈ 6,2 | 6,16 |

Tablo 4. Senaryo 1-Rüzgâr Türbini Yüksekliğinin Sistem Parametrelerine Etkisi

RenFrac ve IRR değerleri değişmemekte, geri ödeme süresi yine yaklaşık 6,2 yıl olmaktadır. Yani Senaryo 1'de kule yüksekliği artışı küçük fakat pozitif bir ekonomik iyileşme sağlamaktadır.

Genel olarak Senaryo 1, hem elektrik hem de termal yüklerin birlikte düşünüldüğü durumda; yüksek yenilenebilir enerji oranına sahip, yakıt maliyetlerini

belirgin ölçüde azaltan ve yaklaşık 6 yıl civarında geri ödeme süresi sunan teknik ve ekonomik açıdan dengeli bir çözüm ortaya koymaktadır.

4.2. Senaryo 2 – Tam Elektrifikasyon Durumu

Senaryo 2’de, Senaryo 1’deki 300 kWh/gün termal yük, aynı profille Elektrik Yükü 2 olarak sisteme elektriksel yük şeklinde tanımlanmıştır. Böylece toplam elektrik talebi 1.100 kWh/gün seviyesine çıkmış, pik güçler yer yer 150 kW mertebelerine ulaşmıştır. Termal yük kontrolçüsü ve kazan bu senaryoda kullanılmamaktadır; tüm enerji ihtiyacı elektrikle karşılanmaktadır.

| Sensitivity | Architecture | | | | | | Cost | | | | System | | Project Economics | |
|--------------------------|---------------|-----------|--------------|-------------|------------------|----------|---------------|------------------------|------------|--------------|----------------------|---------|---------------------|--|
| Rüzgar T. Hub Height (m) | Güneş P. (kW) | Rüzgar T. | Biyogaz (kW) | Batarya (#) | Dönüştürücü (kW) | NPC (\$) | LCOE (\$/kWh) | Operating cost (\$/yr) | CAPEX (\$) | Ren Frac (%) | Total Fuel (tons/yr) | IRR (%) | Simple Payback (yr) | |
| 30.0 | 111 | | 100 | 2 | 92.7 | \$1.16M | \$0.213 | \$51,201 | \$467,502 | 100 | 951 | 18 | 4.4 | |
| 50.0 | 94.0 | 3 | 100 | 2 | 84.0 | \$1.16M | \$0.213 | \$46,734 | \$524,771 | 100 | 841 | 13 | 4.8 | |

| Optimization Results | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------|-----------|--------------|-------------|------------------|----------|---------------|------------------------|------------|--------------|----------------------|-------------------|---------------------|-------|
| Architecture | | | | | | Cost | | | | System | | Project Economics | | Hours |
| Rüzgar T. Hub Height (m) | Güneş P. (kW) | Rüzgar T. | Biyogaz (kW) | Batarya (#) | Dönüştürücü (kW) | NPC (\$) | LCOE (\$/kWh) | Operating cost (\$/yr) | CAPEX (\$) | Ren Frac (%) | Total Fuel (tons/yr) | IRR (%) | Simple Payback (yr) | Hours |
| 30.0 | 111 | | 100 | 2 | 92.7 | \$1.16M | \$0.213 | \$51,201 | \$467,502 | 100 | 951 | 18 | 4.4 | 3,212 |
| 30.0 | 120 | 1 | 100 | 2 | 90.4 | \$1.17M | \$0.214 | \$49,003 | \$500,381 | 100 | 899 | 15 | 4.6 | 3,044 |
| 30.0 | 6 | 6 | 100 | 2 | 78.1 | \$1.30M | \$0.238 | \$57,619 | \$513,421 | 100 | 1,019 | 6.8 | 4.9 | 3,464 |
| 30.0 | | | 100 | 2 | 76.0 | \$1.32M | \$0.243 | \$70,670 | \$362,805 | 100 | 1,314 | | | 4,418 |
| 30.0 | 294 | 18 | 24 | 152 | 152 | \$1.73M | \$0.317 | \$35,926 | \$1,24M | 100 | 0 | | | |

Tablo 5. Senaryo 2 için HOMER Pro Çıktıları

Bu daha ağır yük profili nedeniyle HOMER optimizasyonu, Senaryo 1’e göre daha yüksek yenilenebilir ve dönüştürücü güçlerine yönelmiştir. 30 m kule yüksekliğinde seçilen en iyi çözümde:

- PV gücü: 111 kW,
- Rüzgâr türbini: 1 adet (10 kW),
- Biyogaz jeneratörü: 100 kW,
- Batarya: 2 × 100 kWh,
- Dönüştürücü: 92,7 kW

olarak belirlenmiştir.

Kule yüksekliği 50 m’ye çıkarıldığında ve rüzgâr türbini sayısı 3’e yükseltildiğinde en uygun çözümde:

- PV gücü: 94 kW,
- Rüzgâr türbini: 3 adet (toplam 30 kW),
- Biyogaz jeneratörü: 100 kW,
- Batarya: 2 × 100 kWh,
- Dönüştürücü: 84 kW

olarak seçilmiştir.

| Parametre | Birim | 30 m Kule Yüksekliği | 50 m Kule Yüksekliği |
|--|--------|----------------------|----------------------|
| Net Bugünkü Maliyet (NPC) | M\$ | ≈ 1,16 | ≈ 1,16 |
| Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) | \$/kWh | 0,213 | 0,213 |
| Yıllık İşletme Maliyeti (Operating cost) | \$/yıl | 51.201 | 46.734 |
| İlk Yatırım Maliyeti (CAPEX) | \$ | 467.502 | 524.771 |
| Yenilenebilir Enerji Oranı (RenFrac) | % | 100 | 100 |
| İç Kârlılık Oranı (IRR) | % | ≈ 18 | 13 |
| Basit Geri Ödeme Süresi | yıl | ≈ 4,4 | 4,8 |

Tablo 6. Senaryo 2-Rüzgâr Türbini Yüksekliğinin Sistem Parametrelerine Etkisi

30 m Kule yüksekliği için dikkat çekici nokta, LCOE'nin Senaryo 1'e göre daha düşük çıkmasına rağmen, toplam yükün çok daha yüksek olması nedeniyle sistem gücünün ve CAPEX'in de artmış olmasıdır. Yani birim enerji maliyeti yönünden avantajlı, ancak toplam yatırım büyüklüğü açısından daha iddialı bir senaryodur.

50 m kule yüksekliğinde ise rüzgâr üretimi artmakta, yakıt ve işletme maliyetleri azalmaktadır; fakat daha yüksek başlangıç yatırımı sebebiyle yatırımcının beklediği finansal getiriler bir miktar zayıflamaktadır. Ancak bu durumda NPC 1,73M\$ seviyesine ve LCOE 0,307\$/kWh'ye yükselmekte, CAPEX ise 1,24 M\$'ı aşmaktadır. Dolayısıyla tam yenilenebilir fakat çok yüksek yatırım maliyetli bu alternatif, ekonomik açıdan tercih edilmemiştir.

4.3. Senaryoların Karşılaştırılması

- Senaryo 1 ve Senaryo 2, hem yük yapısı hem de ekonomik göstergeler bakımından birbirinden oldukça farklı iki yaklaşımı temsil etmektedir:
- Teknik açıdan, her iki senaryo da Nüzhetiye köyünün enerji ihtiyacını güvenilir bir şekilde karşılayabilmektedir. Batarya SOC profilleri minimum sınırın çok az altına düşmekte, yük kesintisi ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır.
- Yenilenebilir oranı açısından Senaryo 1'de yenilenebilir payı yaklaşık %74, Senaryo 2'de ise seçilen konfigürasyonlar için %100'dür. Senaryo 2 bu anlamda tam elektrifikasyon ve tamamen yenilenebilir bir sistem vizyonunu temsil etmektedir.
- Ekonomik açıdan bakıldığında Senaryo 1'in LCOE değeri 0,237–0,238 \$/kWh iken, Senaryo2'de bu değer 0,213\$/kWh seviyesine inmektedir. Ancak Senaryo 2'nin yükü daha yüksek olduğu için sistem boyutları ve CAPEX'i de artmış; buna rağmen geri ödeme süreleri 4,4–4,8 yıl bandında kalarak kabul edilebilir düzeyde çıkmıştır.
- Yatırımcı bakış açısıyla, Senaryo 1 daha düşük toplam yatırım gerektiren, fakat yenilenebilir oranı %74'te kalan bir çözümdür. Senaryo 2 ise daha yüksek yatırım gerektirirken hem LCOE'yi düşürmekte hem de %100 yenilenebilir bir yapı sunmaktadır. Özellikle biyogaz kaynağının yerel olarak mevcut olduğu düşünüldüğünde Senaryo 2 uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından güçlü bir alternatiftir.

- Kule yüksekliği etkisi, Senaryo 1’de nispeten sınırlı kalmış; 30 m’den 50 m’ye geçiş sadece küçük bir LCOE ve NPC iyileşmesi sağlamıştır. Senaryo 2’de ise kule yüksekliği ve türbin sayısındaki artış, işletme maliyetini düşürmekle birlikte sermaye maliyetini ve geri ödeme süresini bir miktar artırmıştır. Bu nedenle rüzgâr tarafındaki tasarımın, projeye ayrılabilir başlangıç bütçesi ve yatırımcının risk algısına göre optimize edilmesi gerektiği söylenebilir.

5. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, Kocaeli ili Gölcük ilçesi Nüzhetiye köyü için yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı bağımsız bir hibrit enerji sistemi tasarlanmış ve HOMER Pro yazılımı kullanılarak kapsamlı bir teknik-ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 100 haneli kırsal bir yerleşimin 800 kWh/gün elektriksel ve 300 kWh/gün ısı yükü esas alınmış; PV, rüzgâr türbini, biyogaz jeneratörü, lityum-iyon batarya, dönüştürücü, termal yük kontrolcüsü ve kazan bileşenlerinden oluşan farklı konfigürasyonlar değerlendirilmiştir. Ayrıca iki ayrı senaryo ve iki farklı rüzgâr türbini kule yüksekliği 30 m ve 50 m karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

5.1. Yük ve Kaynak Analizine İlişkin Sonuçlar

Yük profilleri incelendiğinde, elektrik ve ısı talebin tipik bir konut yerleşiminde olduğu gibi özellikle akşam saatlerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Elektrik yükü, 18:00–22:00 aralığında 80–90 kW seviyelerine ulaşan belirgin pikler göstermekte; ısı yükü ise sabah ve akşam saatlerinde artan, gün ortasında azalan bir yapı sergilemektedir. Bu durum, depolama biriminin ve esnek bir jeneratör kaynağının sistem güvenilirliği açısından kritik olduğunu ortaya koymuştur.

Meteorolojik veriler, Nüzhetiye köyünün hem güneş hem de rüzgâr açısından anlamlı bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Global güneş radyasyonu yıl boyunca 0,3–1,1 kW/m² aralığında değişmiş, özellikle Nisan–Eylül döneminde PV üretimini destekleyecek seviyelere ulaşmıştır. Rüzgâr hızı verileri ise medyanın çoğu ayda 4–5 m/s civarında olduğunu, maksimum değerlerin 14–16 m/s’ye çıktığını göstermiştir. Türbin güç eğrisi ile değerlendirildiğinde, rüzgâr türbininin yılın büyük bölümünde kısmi yükte de olsa üretim yapabildiği anlaşılmıştır.

Bu analizler, Nüzhetiye ölçeğinde bir köy için yenilenebilir odaklı hibrit bir sistemin hem kaynak erişilebilirliği hem de yük profili uyumu açısından uygulanabilir olduğunu doğrulamaktadır.

5.2. Senaryo 1’e İlişkin Sonuçlar

Senaryo 1’de elektriksel ve ısı yükleri ayrı tutulmuş; elektrik yükü PV, rüzgâr, biyogaz jeneratörü ve batarya tarafından, termal yük ise kazan ve termal yük kontrolcüsü tarafından karşılanmıştır. Optimizasyon sonucunda 50 m kule yüksekliği için en uygun konfigürasyon yaklaşık 57,7 kW PV, 10 kW rüzgâr türbini, 100 kW biyogaz jeneratörü, 200 kWh batarya, 80 kW dönüştürücü, 50 kW TLC ve dizel kazan olarak belirlenmiştir.

Bu yapı ile:

- PV yıllık 81.605 kWh, rüzgâr türbini 19.144 kWh, biyogaz jeneratörü 229.526 kWh elektrik üretmiştir.

- Batarya yıllık 125.709 kWh enerji çevrimine ulaşmış ve SOC değerleri yıl boyunca çoğunlukla %20–90 aralığında kalmıştır.
- Dizel kazan 103.991 kWh, TLC ise 10.142 kWh ısı sağlamıştır.

Toplam enerji arzı içinde yenilenebilir kaynakların payı %74,1 olarak hesaplanmış, geri kalan kısmın dizel kazan üzerinden karşılandığı görülmüştür. Bu sonuç, tamamen dizel jeneratöre dayalı bir sisteme göre önemli ölçüde yakıt ve emisyon azaltımı anlamına gelmektedir.

Ekonomik açıdan bakıldığında, sadece jeneratör ve batarya içeren mevcut sistem ile karşılaştırıldığında:

- Mevcut durumda yıllık işletme maliyeti 68.387 \$/yıl iken, hibrit sistemle bu değer 52.365\$/yıl'a düşmüştür.
- Yıllık yaklaşık 15.239 \$ tasarruf sağlanmıştır.
- Ek yatırım maliyeti 77.724 \$, basit geri ödeme süresi yaklaşık 6,2 yıl, iç kârlılık oranı ise %18 civarında hesaplanmıştır.
- Enerji birim maliyeti 0,237–0,238 \$/kWh bandında oluşmuştur.

Rüzgâr türbini kule yüksekliğinin 30 m'den 50 m'ye çıkarılması, LCOE ve NPC üzerinde sınırlı fakat pozitif bir iyileşme sağlamış; işletme maliyeti hafifçe azalmış, sistemin yenilenebilir oranı ve finansal göstergeleri ise korunmuştur. Bu bulgular, Senaryo 1 konfigürasyonunun hem teknik hem ekonomik açıdan dengeli ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

5.3. Senaryo 2'ye İlişkin Sonuçlar

Senaryo 2'de, 300 kWh/gün'lük termal yük tamamen ortadan kaldırılmış ve aynı profil korunarak Elektrik Yüğü 2 adıyla sisteme eklenmiştir. Böylece toplam elektrik talebi 1.100 kWh/gün'e yükselmiş, pik güç değerleri 150 kW mertebelerine çıkmıştır. Bu durum, sistem tasarımını daha zorlu hâle getirmiş; ancak doğru boyutlandırma ile tamamen yenilenebilir bir yapı kurulabileceği gösterilmiştir.

30 m kule yüksekliğinde optimum çözümde:

- 111 kW PV, 1 adet 10 kW rüzgâr türbini, 100 kW biyogaz jeneratörü ve 200 kWh batarya kullanılmış;
- Sistem %100 yenilenebilir olacak şekilde tasarlanmıştır.
- LCOE 0,213\$/kWh, NPC≈1,16M\$/kWh, yıllık işletme maliyeti 51.201 \$/yıl, CAPEX 467.502\$/yıl, IRR %18 ve geri ödeme süresi 4,4 yıl olarak hesaplanmıştır.

50 m kule yüksekliğinde ve üç rüzgâr türbini kullanılan alternatifte ise:

- PV gücü 94 kW'a inerken rüzgâr gücü 30 kW'a çıkmış, biyogaz jeneratörü ve batarya kapasitesi korunmuştur.
- Yenilenebilir oranı yine %100 seviyesinde kalmıştır.
- İşletme maliyeti 46.734 \$/yıl'a gerileyerek önemli bir azalma sağlamış; ancak CAPEX 524.771\$/yıl'a yükselmiştir.
- Bu nedenle IRR %13 seviyesine düşmüş, geri ödeme süresi 4,8 yıla uzamıştır.

Sonuç olarak Senaryo 2, yükü Senaryo 1'e göre çok daha yüksek olmasına rağmen düşük LCOE ve yüksek yenilenebilir oranı ile dikkat çekmektedir. Buna karşın başlangıç yatırımının daha büyük olması, özellikle sermaye kısıtı olan projelerde Senaryo 1'e kıyasla daha temkinli değerlendirilmesini gerektirmektedir.

5.4. Senaryoların Değerlendirilmesi

İki senaryo ve farklı kule yükseklikleri birlikte değerlendirildiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Teknik açıdan, hem Senaryo 1 hem de Senaryo 2 Nüzhetiye köyünün enerji ihtiyacını güvenilir biçimde karşılayabilmektedir. Batarya SOC profilleri, yük kesintilerinin çok sınırlı olduğunu; PV, rüzgâr ve biyogaz kombinasyonunun yük değişimlerine başarılı bir şekilde yanıt verdiğini göstermektedir.
2. Yenilenebilir enerji oranı bakımından Senaryo 1, %74 seviyesinde kalarak fosil yakıt bağımlılığını önemli ölçüde azaltmakta; Senaryo 2 ise %100 yenilenebilir yapıyla uzun vadeli sürdürülebilirlik ve karbon nötrlüğü hedefleri açısından daha güçlü bir seçenek sunmaktadır.
3. Ekonomik performans açısından, Senaryo 1 daha düşük toplam yatırım maliyetiyle, yaklaşık 6 yıllık geri ödeme süresi ve 0,237 \$/kWh düzeyindeki LCOE değeriyle maliyet odaklı bir çözüm sunarken, Senaryo 2 özellikle 30m kule yüksekliğinde 0,213\$/kWh'lik birim maliyet ve 4,4 yıllık geri ödeme süresiyle “yüksek yenilenebilir – düşük LCOE” odağında öne çıkmaktadır.
4. Kule yüksekliği etkisi, Senaryo 1’de görece sınırlı kalmış; Senaryo 2’de ise rüzgâr payını artırarak işletme maliyetini düşürmekle birlikte, yatırım maliyetini ve geri ödeme süresini bir miktar artırmıştır. Bu nedenle, proje geliştiricilerin kule yüksekliği kararını yalnızca enerji üretimi üzerinden değil, yatırım bütçesi, finansman koşulları ve risk durumu ile değerlendirmesi gerekmektedir.

Bu bulgular ışığında, Nüzhetiye köyü için kısa vadede daha düşük yatırım gerektiren ve bileşen sayısı açısından daha sade olan Senaryo 1’in uygulanabilir bir çözüm olduğu; ancak uzun vadede karbon emisyonlarının daha da azaltılması ve yenilenebilir enerji payının en üst düzeye çıkarılması hedefleniyorsa, uygun finansman koşulları sağlandığında Senaryo 2’nin daha stratejik bir tercih olacağı sonucuna varılabilir.

5.5. Genel Değerlendirme ve Öneriler

Genel olarak bu çalışma, kırsal bir yerleşimde PV–rüzgâr–biyogaz–batarya temelli hibrit sistem tasarımının hem teknik hem de ekonomik açıdan mümkün olduğunu göstermiştir. Özellikle yerel biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesi hem atıkların yönetimi hem de fosil yakıt tüketiminin azaltılması açısından önemli bir avantaj sağlamıştır.

Gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler getirilebilir:

- Yük profillerinin talep tarafı yönetimi, zaman-ofis tarifeler veya esnek yükler ile yeniden şekillendirilmesi; böylece depolama ihtiyacının ve birim enerji maliyetlerinin daha da düşürülmesi mümkündür.
- Güneş ısı kolektörleri, ısı pompaları ve bölgesel ısıtma gibi ilave teknolojilerin modele entegre edilerek farklı hibrit yapıların kıyaslanması, özellikle ısı yükünü baskın olduğu yerleşimler için önemli sonuçlar ortaya koyabilir.
- Finansman koşullarını ve karbon kredilerini de içeren daha detaylı bir ekonomik analiz yapılarak, yatırımcı bakış açısıyla optimum senaryonun seçilmesine yönelik karar destek araçları geliştirilebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma Nüzhetiye köyü özelinden yola çıkarak, benzer ölçekli kırsal yerleşimlerin yüksek yenilenebilir oranlı, ekonomik ve çevreci hibrit enerji sistemleri ile sürdürülebilir bir enerji altyapısına kavuşabileceğini göstermektedir. Elde edilen bulgular hem akademik literatüre katkı sunmakta hem de saha uygulamaları için somut bir referans senaryo ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- [1].Turkdoğan, 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].AKAN, Ahmet Erhan. "Techno-economic analysis of an off-grid hybrid energy system with homer pro." *Icontech International Journal* 5.3 (2021): 56-61.
- [6].Özdemir, Mehmet Semih, Adem Dalcalı, and Cemil Ocak. "Akarsu tipi hidroelektrik santraller ve bu santrallerde kullanılan türbin-generatörler." *Mühendislik bilimleri ve araştırmaları dergisi* 2.2 (2020): 69-75.
- [7].Tomovic, Milan V., et al. "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid system to supply a remote fishpond with electricity and heat." *Elektronika ir Elektrotehnika* 30.1 (2024): 44-55.
- [8].Yadav, Subhash, Pradeep Kumar, and Ashwani Kumar. "Techno-economic assessment of hybrid renewable energy system with multi energy storage system using HOMER." *Energy* 297 (2024): 131231.
- [9].Koholé, Yemeli Wenceslas, et al. "Quantitative techno-economic comparison of a photovoltaic/wind hybrid power system with different energy storage technologies for electrification of three remote areas in Cameroon using Cuckoo search algorithm." *Journal of Energy Storage* 68 (2023): 107783.
- [10]. Naderipour, Amirreza, et al. "Optimal design of hybrid grid-connected photovoltaic/wind/battery sustainable energy system improving reliability, cost and emission." *Energy* 257 (2022): 124679.
- [11]. Bacha, Badis, et al. "Optimal sizing of a hybrid microgrid system using solar, wind, diesel, and battery energy storage to alleviate energy poverty in a rural area of Biskra, Algeria." *Journal of Energy Storage* 84 (2024): 110651.
- [12]. El-Maaroufi, Abdellah, Mohammed Daoudi, and Rachid Ahl Laamara. "Techno-economic analysis of a PV/WT/biomass off-grid hybrid power system for rural electrification in northern Morocco using HOMER." *Renewable Energy* 231 (2024): 120904.
- [13]. El-Maaroufi, Abdellah, Mohammed Daoudi, and Rachid Ahl Laamara. "Optimization of hybrid solar/wind/biomass systems for sustainable heating in isolated mountainous areas of northern Morocco." *Solar Energy* 299 (2025): 113683.

This manuscript represents a preprint version. A revised and peer-reviewed version may be submitted to and published in a scientific journal at a later stage.

- [14]. Hüner, Bulut. "Feasibility and environmental analysis of biogas-based hybrid energy system using HOMER pro software: A case study for Hatay." *Energy Conversion and Management* 326 (2025): 119480.
- [15]. Suresh, Vendoti, Mahankali Muralidhar, and R. Kiranmayi. "Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas." *Energy Reports* 6 (2020): 594-604.
- [16]. Vendoti, Suresh, M. Muralidhar, and R. Kiranmayi. "Techno-economic analysis of off-grid solar/wind/biogas/biomass/fuel cell/battery system for electrification in a cluster of villages by HOMER software: S. Vendoti et al." *Environment, Development and Sustainability* 23.1 (2021): 351-372.
- [17]. Ribó-Pérez, David, et al. "Modelling biomass gasifiers in hybrid renewable energy microgrids; a complete procedure for enabling gasifiers simulation in HOMER." *Renewable Energy* 174 (2021): 501-512.
- [18]. Nennich, T. D., et al. "Prediction of manure and nutrient excretion from dairy cattle." *Journal of Dairy Science* 88.10 (2005): 3721-3733.
- [19]. Oymak, Aysenur, and Mehmet Rida Tur. "Decarbonizing Rural Off-Grid Areas Through Hybrid Renewable Hydrogen Systems: A Case Study from Turkey." *Processes* 13.9 (2025): 2909.
- [20]. Arshad, Muhammad, et al. "Green electricity generation from biogas of cattle manure: an assessment of potential and feasibility in Pakistan." *Frontiers in Energy Research* 10 (2022): 911485.