



Hibrit Enerji Sistemlerine Dayalı Mikro-Şebeke Tasarımı ve Optimizasyonu: Zonguldak-Elvanpazarcık Uygulaması

Design and Optimization of a Microgrid Based on Hybrid Energy Systems: A Case Study in Zonguldak-Elvanpazarcık

Nihat Pamuk*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, Zonguldak İli sınırları içerisinde yer alan kırsal bölgeler için rüzgâr ve güneş enerjilerinin hibrit bir sistem olarak kullanıldığı dağıtık üretim tesislerine (mikro şebeke) yönelik bir model yapısı tasarlanmıştır. Bu model ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, enerji üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması ve enerji çeşitliliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım hem bölgesel enerji ihtiyaçlarının karşılanması hem de çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, HOMER Pro yazılımı kullanılarak Zonguldak ili Merkez ilçesine bağlı Elvanpazarcık beldesinde, 20 adet hanenin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek bir mikro-şebeke sisteminin tasarlanması amaçlanmıştır. Bölgenin iklim verileri ve enerji yük ihtiyacı analiz edilerek, sistemde kullanılacak ekipmanlar bu veriler doğrultusunda belirlenmiştir. HOMER Pro programı aracılığıyla, seçilen ekipmanların ekonomik maliyet analizleri yapılmış ve rüzgâr-güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakların entegre edildiği optimum hibrit enerji sisteminin konfigürasyon modeli oluşturulmuştur. Bu model, bölgenin enerji ihtiyacını sürdürülebilir ve ekonomik bir şekilde karşılamayı amaçlamaktadır. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, en uygun sistemin rüzgâr türbini, fotovoltaiik (PV) panel ve dizel jeneratörden oluşan hibrit bir yapı olduğu belirlenmiştir. Bu sistemde; 13 adet rüzgâr türbini, 123 kW gücünde güneş paneli, 88 kW gücünde dizel jeneratör, 116 kW kapasiteli batarya bankası ve 81.1 kW gücünde inverter kullanılmıştır. Sistemin başlangıç sermayesi 475.210 bin \$, Net Şimdiki Maliyeti (NPC) 600.673 bin \$, Enerji Maliyeti (COE) 0.283 \$/kWh ve yıllık işletme maliyeti ise 10.834 bin \$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, sistemin toplam enerji üretiminin %99.8'inin yenilenebilir enerji kaynakları tarafından karşılandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sistemin hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik açıdan uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Ekonomik fizibilite analizi, enerji yönetimi, hibrit güç sistemleri, HOMER Pro yazılımı, mikro-şebeke.

Abstract

In this study, a model structure for distributed generation systems (micro grid) where wind and solar energy are used as a hybrid system for rural areas within the borders of Zonguldak Province is designed. This model aims to popularize the use of renewable energy sources, ensure sustainability in energy production and increase energy diversity. This approach is considered an important step in both meeting regional energy needs and reducing environmental impacts. In this study, it is aimed to design a microgrid system that can meet the electrical energy needs of 20 households in Elvanpazarcık town of Zonguldak province using HOMER Pro software. The climate data and energy load requirements of the region were analyzed and the equipment to be used in the system was determined with these data. Using the HOMER Pro program, economic cost analyses of the selected equipment were performed and the configuration model of the optimum hybrid energy system in which renewable energy sources such as wind and solar energy were integrated was created. This model aims to meet the energy needs of the region in a sustainable and economical way. As a result of the optimization studies, it was determined that the most suitable system is a hybrid structure consisting of a wind turbine, photovoltaic (PV) panel and diesel generator. This system includes 13 wind turbines, 123 kW solar panels, 88 kW diesel generators, 116 kW battery banks and 81.1 kW inverters. The initial capital of the system is \$475.210, Net Present Cost (NPC) is \$600.673, Cost of Energy (COE) is 0.283 \$/kWh and annual operating costs are \$10.834. In addition, it was determined that 99.8% of the total energy production of the system was provided by renewable energy sources. These results show that the system offers a viable solution in terms of both environmental sustainability and economic aspects.

Keywords: Economic feasibility analysis, energy management, hybrid power systems, HOMER Pro software, micro-grid.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: nihatpamuk@beun.edu.tr

Nihat Pamuk orcid.org/0000-0001-8980-6913



1. Giriş

Geçmişten günümüze kadar, dünya genelinde enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kömür ve doğalgaz gibi yenilenebilir enerji kaynakları yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, bu kaynaklara olan bağımlılık, yeterli yeraltı kaynaklarına sahip olmayan ülkelerde enerji temini konusunda dışa bağımlılık sorununu beraberinde getirmektedir. Bununla birlikte, fosil yakıtların kullanımı, çevre üzerinde ciddi olumsuz etkilere yol açmakta ve sera gazı emisyonlarının artışına bağlı olarak küresel ısınmanın temel nedenlerinden biri haline gelmektedir. Bu durum, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarına geçişin önemini daha da artırmaktadır (Dincer ve Acar 2015). Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınırlı sürdürülebilirliği, çevreye verdikleri zarar ve enerji temininde yarattıkları dışa bağımlılık sorunu, alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırma ve geliştirme çabalarını hızlandırmıştır. Bu kapsamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması hem çevresel etkilerin minimize edilmesi hem de enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından önemli bir çözüm stratejisi olarak benimsenmiştir.

Nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerin insan yaşamında giderek daha fazla yer almasıyla birlikte, dünya genelinde enerji talebi önemli ölçüde artış göstermiştir. 18. yüzyılda ortaya çıkan Sanayi Devrimi'nden itibaren dünya nüfusu logaritmik bir eğilimle hızla artmıştır (Stern ve Kander 2012). Elektrik enerjisi bilimsel ve teknolojik ilerlemelerin etkisiyle, günümüz toplumlarının sosyal, ekonomik ve endüstriyel işleyişi açısından kritik bir gereksinim haline gelmiştir. Bu durum, enerji talebindeki sürekli artışı beraberinde getirmiş ve enerji kaynaklarının verimli kullanımı ile sürdürülebilirliği konularını küresel ölçekte öncelikli bir sorun haline getirmiştir. Elektrik enerjisinin küresel ölçekte sahip olduğu geniş pazar payı, devletlerin ekonomik kalkınma süreçlerini doğrudan etkileyen ve refah düzeylerinin artmasında belirleyici bir rol oynayan temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Altınay ve Karagöl 2005).

Dünya üzerindeki enerji kaynakları, temel özelliklerine göre iki ana gruba ayrılmaktadır. Doğal süreçlerle kendini yenileyebilen ve sürekli olarak kullanılabilen kaynaklar, "yenilenebilir enerji kaynakları" olarak adlandırılmaktadır (Sayed vd. 2023). Bu kaynaklar, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımakta ve gelecekteki enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Rüzgâr, güneş ve hidroelektrik enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarına örnek olarak gösterilebilir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise sınırlı rezervlere sahip olan ve tüketildikçe azalan kaynaklardır. Dünya genelinde en yaygın kullanılan enerji kaynak-

ları arasında yer alan petrol, doğalgaz ve kömür, yenilenebilir enerji kaynakları kategorisinde değerlendirilmektedir. Bu kaynaklar, fosil yakıtlar olarak da adlandırılmakta olup, enerji üretiminde önemli bir paya sahiptir (Güney 2019).

Petrol, doğalgaz ve kömür gibi yenilenebilir enerji kaynakları, endüstriyel gelişim ve ekonomik büyüme süreçlerinde temel bir rol oynamıştır. Ancak, fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olması ve çevresel etkileri nedeniyle, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelim giderek artmaktadır (Yuksel ve Kaygusuz 2011). Ülkeler, yeraltı kaynakları bakımından yetersiz olmaları sebebiyle enerji ihtiyaçlarını önemli ölçüde dış kaynaklardan sağlamak durumunda kalmaktadır. Bu durum, enerji alanında dışa bağımlılık sorununu ortaya çıkarmış ve ülkelerin ekonomik yapılarını, zaman zaman da siyasi istikrarlarını olumsuz yönde etkilemiştir. Enerji güvenliği bağlamında yaşanan bu bağımlılık, ulusal ekonomiler üzerinde ciddi riskler yaratmış ve enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesini bir zorunluluk haline getirmiştir. Bu süreç, enerji arz güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Fosil yakıtların çevresel tahribata yol açması, sınırlı rezervleri nedeniyle sürdürülebilirliklerinin zayıf olması ve fosil yakıt kaynaklarına sahip olmayan ülkelerde ekonomik bağımlılığa sebep olması, küresel ölçekte alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevre üzerinde yarattığı olumsuz etkiler, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi yoluyla sürdürülebilirliğin sağlanması gerekliliği ve enerji alanında dışa bağımlılığın azaltılması ihtiyacı, fosil yakıtlara alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırma ve geliştirme çabalarını hızlandırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise çevresel etkilerinin minimal düzeyde olması, sürekli yenilenebilir özelliği, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olması ve özellikle enerji ithalatına bağımlı ülkelerde yerli ve milli enerji üretim kapasitesini artırma potansiyeli gibi avantajlarıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarına karşı etkili ve çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Demirtas 2013).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli özelliklerinden biri, diğer enerji kaynakları ile entegre edilerek hibrit sistemler oluşturabilmesidir. Hibrit enerji sistemleri, birden fazla enerji üretim teknolojisinin bir arada çalışarak elektrik yükünü beslediği sistemlerdir (Nema vd. 2009). Bu sistemler, hem şebekeye bağlı olarak hem de şebekeden bağımsız bir şekilde çalışabilme kapasitesine sahiptir. Hibrit enerji sistemlerinin kullanılması durumunda, yaz aylarında rüzgâr

enerjisi üretimindeki azalma, güneş enerjisi üretimindeki artış ile dengelenebilmektedir. Benzer şekilde, kış aylarında güneş enerjisi üretiminin düşmesi, rüzgâr enerjisi üretimindeki artış ile telafi edilebilmektedir. Aynı durum, geceleri güneş enerjisinden yararlanılmadığı zamanlar için de geçerlidir. Bu sayede, enerji üretiminin sürekliliği ve sistemin kararlılığı sağlanarak, kesintisiz bir enerji arzı mümkün hale gelmektedir.

Dağıtık üretim tesisleri (mikro-şebekeler), şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak işletilebilen küçük ölçekli enerji sistemleridir (Aghajani ve Ghadimi 2018). Bu tesisler, enerji üretimini büyük ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktadır. Düşük iletim kayıpları, maliyet etkinliği ve yüksek güvenilirlikleri nedeniyle, enterkonnekte şebekeye alternatif bir enerji üretim modeli olarak öne çıkmaktadır. En önemli avantajlarından biri, hem şebeke ile entegre çalışabilme hem de bağımsız bir yapı içinde işletilebilme kapasitesine sahip olmasıdır (Moghaddas-Tafreshi vd. 2019). Özellikle kırsal bölgeler ve merkezi şebekeye uzak yerleşim alanlarında, kesintisiz elektrik arzının sağlanması ve altyapı yetersizliklerinden kaynaklanan sorunların giderilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Sanayi bölgelerinde ise bu tesisler, enerji kalitesini artırmak ve enerji arzının güvenilirliğini sağlamak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır (Yousefikhah vd. 2025).

HOMER Pro yazılımı, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinin optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yazılım, farklı coğrafi bölgelerdeki enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tasarlanan hibrit sistemlerin bileşenlerinin seçimi, boyutlandırılması ve ekonomik analizlerinin yapılmasında etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, Swarnkar ve arkadaşları, Hindistan'da bulunan Rajasthan Teknik Üniversitesi kampüsünün elektrik ihtiyacını karşılamak üzere PV ve biyokütle temelli bir hibrit sistem tasarlamışlardır (Swarnkar vd. 2016). Bu çalışmada, biyokütle potansiyeli ve maliyeti, güneş ışıması verileri ve farklı yük koşullarına yönelik hassasiyet analizleri HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Benzer şekilde Said ve arkadaşları, Tanzanya'nın çeşitli bölgelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hibrit sistemler kurarak elektrik ihtiyacını karşılamayı hedeflemişlerdir. Bu kapsamda, sistem bileşenlerinin seçimi ve boyutlandırılması için HOMER Pro yazılımından yararlanmışlardır (Said vd. 2024). Yapılan analizler sonucunda, PV-rüzgâr-dizel-batarya hibrit sisteminin, diğer alternatiflere kıyasla birim elektrik enerjisi maliyeti açısından daha avantajlı ol-

duğu tespit edilmiştir. Niringiyimana ve ekibi ise, Ruanda'da elektrik şebekelerinin kurulumunun ekonomik olarak uygun olmadığı kırsal bölgelerde, ailelerin elektrik ve termal enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla bir hibrit enerji sistemi simülasyonu gerçekleştirmiştir (Niringiyimana vd. 2023). Bu çalışmada, hidro türbinler, PV modülleri, jeneratörler, aküler, konvertörler, şebeke yükleri ve transformatörler gibi bileşenler kullanılarak, enerji ihtiyacının güvenilir bir şekilde karşılanabileceği ortaya konulmuştur.

Mbasso ve arkadaşları, konut binalarında balık yetiştiriciliği için gerekli olan enerji ve oksijen ihtiyacını karşılayacak şekilde tasarlanan bağımsız bir yenilenebilir hibrit sistemin tekno-ekonomik analizini HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirmiştir (Mbasso vd. 2023). Kumar ve ekibi ise, yerleşim yerlerinden uzakta konumlandırılan ATM makinelerinin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla, minimum maliyet esasına dayalı bir fizibilite çalışması yürütmüş ve bu çalışmada HOMER Pro yazılımından faydalanmıştır (Kumar vd. 2016). Rahmat ve arkadaşları, Malezya'da yenilenebilir enerji teknolojilerinin entegrasyonuna yönelik yatırım analizlerinin optimizasyonunu HOMER Pro kullanarak gerçekleştirmiştir (Rahmat vd. 2022). Son olarak, Sharma ve ekibi, Vietnam'da şebekeden bağımsız bir güneş/biyogaz/pil hibrit enerji sisteminin elektrik ihtiyacını karşılamaya yönelik tekno-ekonomik analizler gerçekleştirmiş ve bu çalışmada HOMER Pro yazılımının etkinliğini göstermiştir (Sharma vd. 2024). Yapılan tüm çalışmalar, HOMER Pro yazılımının, farklı coğrafi ve ekonomik koşullarda yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için güçlü bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Yazılım, hem teknik hem de ekonomik açıdan uygun çözümler sunarak, sürdürülebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılmasına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, HOMER Pro yazılımı kullanılarak Zonguldak ili Merkez ilçesine bağlı Elvanpazarcık beldesindeki elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek bir mikro-şebeke sisteminin tasarlanması amacıyla, farklı enerji üretim senaryoları için en iyi yenilenebilir enerji kaynakları kullanım yaklaşımları belirlenmiştir. Güneş, rüzgâr, dizel jeneratör ve hibrit sistemlerin yatırım getirileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Elvanpazarcık beldesi kırsal ve şehir merkezine uzak bir bölge olması nedeniyle, şebekeden bağımsız olacak şekilde ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık bir elektrik üretim tesisi tasarlanmıştır. Söz konusu tesis, 20 hanelin elektrik ihtiyacını karşılayacak şekilde modellenmiştir. Sistem yükünün belirlenmesi amacıyla, bir hanede kullanılan elektrikli cihazların güç tüketimleri hesaplanmıştır.

Rüzgâr türbini, batarya, PV panel, inverter ve dizel jeneratör gibi bileşenlerin teknik özellikleri ve ekonomik parametreleri HOMER Pro yazılımında tanımlanarak sistem benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışma sayesinde kırsal konut özelliklerine sahip olan bölgelerde tek bir yenilenebilir enerji teknolojisi kullanılması yerine, PV-rüzgar-dizel jeneratör-batarya gibi hibrit bir enerji sisteminin tercih edilmesi ile daha avantajlı sonuçlar elde edilmektedir. Hibrit yenilenebilir enerji sistemleri sayesinde daha hızlı geri dönüş süresi, daha fazla maliyet tasarrufu ve daha az çevre kirleticisi emisyon değerleri elde edilmiştir. Yenilenebilir enerji sistemlerindeki stratejiler değerlendirilirken, geri ödeme süresi, NPC değeri ve sistem emisyon değerleri yatırım kararlarını etkilemektedir. Çalışmada kullanılan teknoloji ile sistem bileşenlerinin maliyetleri, enerji kaynaklarının kullanılabilirliği, sistemde kullanılan bileşenlerin birim kazançları, daha hızlı geri ödeme süresi ve negatif yönde daha büyük NPC değerleri ile daha yüksek NPC değerleri elde edilmiş ve daha düşük sistem emisyon değerleri ile sürdürülebilir çevre çalışmalarına katkıda bulunulmuştur.

2. Gereç ve Yöntemler

Sistem tasarımı ve uygulama adımları üç ana kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, bölgenin enerji kaynakları açısından verimliliği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. İkinci kısımda, 20 adet konutun günlük enerji tüketimi hesaplanmış ve bu veriler doğrultusunda sistemde kullanılacak bileşenler belirlenmiştir. Ayrıca, bu bileşenlere ilişkin maliyet analiz-

leri gerçekleştirilmiştir. Son olarak, önceki kısımlarda elde edilen iklimsel ve enerji verileri kullanılarak, tasarlanan sistemin optimizasyonu ve benzetimi HOMER Pro yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

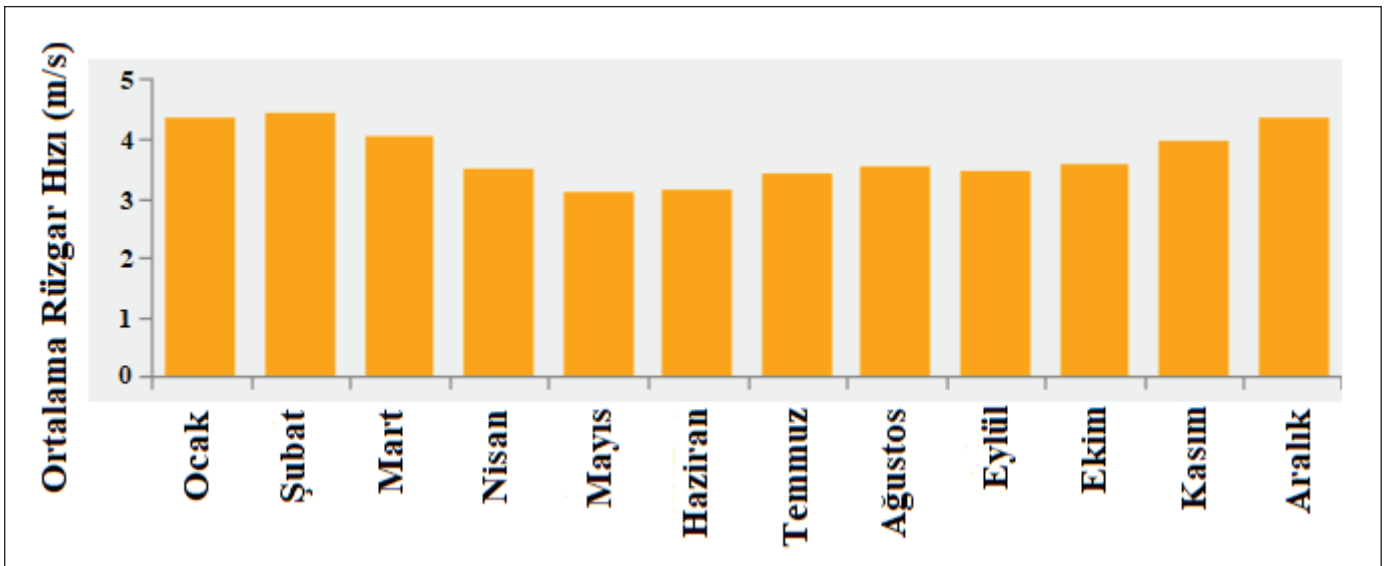
2.1. Bölgenin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının İncelenmesi

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneş enerjisi kullanılarak sistemin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında kullanılacak olan meteorolojik ve enerji verileri, NASA'nın küresel enerji kaynaklarına yönelik tahmin verilerini içeren veri tabanından temin edilmiştir (NASA POWER 2024). Şekil 1'de çalışma bölgesine ait aylık ortalama rüzgar hızı verileri gösterilmiştir. Şekil 2'de ise aylık güneş radyasyon verileri gösterilmiştir.

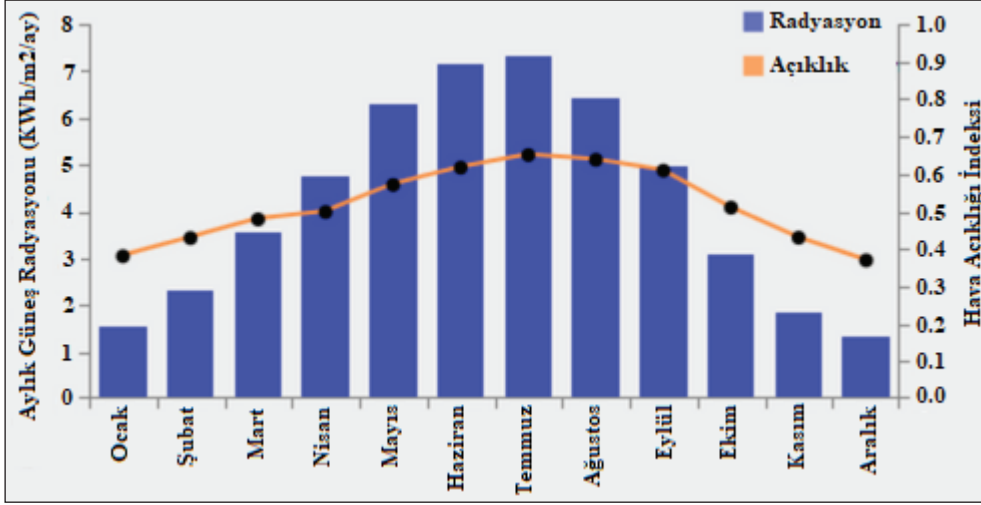
Bölgede ölçülen yıllık ortalama günlük güneş radyasyonu $4.21 \text{ kWh/m}^2/\text{gün}$ olarak belirlenmiştir. Güneş radyasyonu, Haziran ve Temmuz aylarında en yüksek değerlerine ulaşırken, Aralık ve Ocak aylarında en düşük seviyelerde görülmektedir. Hava açıklığı indeksinin yıllık ortalaması ise 0.51 olarak hesaplanmıştır. Bölgedeki yıllık ortalama rüzgar hızı 3.73 m/s olarak belirlenmiş olup, Ocak, Şubat ve Aralık aylarında en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Bununla birlikte, bölgede yıl boyunca rüzgar hızının dengeli bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

2.2. Sistem Bileşenleri

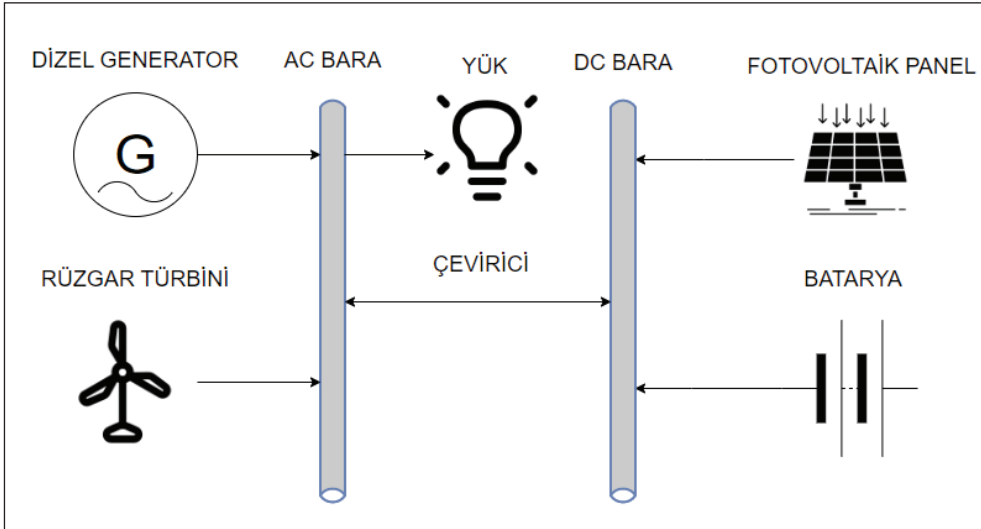
Şebekeden bağımsız olarak çalışan hibrit bir enerji sisteminde, altı temel bileşen bulunmaktadır. Bu bileşenler dizel je-



Şekil 1. Aylık ortalama rüzgar hızı grafiği.



Şekil 2. Aylık güneş radyasyon değeri grafiği.



Şekil 3. Şebekeden bağımsız hibrit sistem yapısı.

neratör, rüzgar türbini, PV panel, batarya, inverter ve yük'tür. Şekil 3'te bu bileşenlerin entegrasyonu ile oluşturulan hibrit sistem yapısı gösterilmiştir. Çizelge 1'de ise tek bir konuta ait günlük enerji tüketimi verilmiştir.

Sistemde 20 adet evin günlük enerji tüketim değerleri yük olarak belirlenmiştir. Toplam yük 479.6 kWh/gün olarak elde edilmiştir. Sistemde kullanılacak rüzgar türbininin seçiminde, bölgenin iklim koşulları, rüzgar hızı dağılımı ve sistemin hesaplanan yük profili gibi temel kriterler dikkate alınmıştır. Bu kriterler doğrultusunda, 10 kW gücüne sahip Eocyle EO10 model rüzgar türbini tercih edilmiştir. Türbinin kurulum maliyeti kW başına 800 \$ olarak belirlenirken, yıllık bakım ve işletim maliyetinin ise 100 \$ olacağı hesaplanmıştır. Sistemde kullanılacak PV panel modeli olarak, 1

Çizelge 1. Tek bir konuta ait günlük enerji tüketim değerleri.

Cihaz	Enerji tüketimi (kWh/gün)
Buzdolabı	4.800
Aydınlatma	1.440
Şarj cihazları	0.840
İndüksiyonlu ocak	4.000
Elektrikli ısıtıcı	3.600
Bilgisayar	0.450
Televizyon	0.450
Fırın	4.400
Bulaşık makinası	1.000
Çamaşır makinası	1.000
Mikrodalga fırın	2.000

kW gücündeki Peimar SG290MFB PV panel tercih edilmiştir. Panelin kurulum maliyeti kW başına 800 \$ olarak hesaplanırken, yıllık bakım ve işletim masraflarının ise 10 \$ olacağı öngörülmüştür. Batarya seçimi kapsamında, 2500 mAh kapasiteli Hoppecke 20 OPzS 2500 modeli tercih edilmiştir. Bir adet bataryanın maliyeti 1500 \$ olarak belirlenirken, yıllık bakım ve işletim masraflarının ise 10 \$ olacağı hesaplanmıştır. Sistemde inverter olarak, 1 kW kapasiteli XTS 1400-48 modeli kullanılmıştır. Her bir inverterin maliyeti 1000 \$ olarak belirlenmiş olup, yıllık bakım ve işletme maliyetleri ise 10 \$ olarak hesaplanmıştır. Sistemde kullanılacak jeneratörün kapasitesi, HOMER Pro programının optimizasyon analizleri doğrultusunda belirlenmiştir. Dizel jeneratörün kurulum maliyetinin 1 kW başına 200 \$ olduğu tespit edilmiştir. Yakıt maliyeti 1.3 \$/L, bakım ve işletme maliyetleri ise saatlik 3 \$ olarak hesaplanmıştır. Çizelge 2’de, sistemde kullanılan bileşenlerin yanı sıra bu bileşenlere ait kurulum maliyetleri ve yıllık işletme-bakım giderleri gösterilmiştir.

Çizelge 2. Sistem bileşenleri, kurulum maliyetleri ile yıllık işletme ve bakım giderleri.

Sistem bileşeni	Kurulum maliyeti	Yıllık işletme-bakım gideri
Rüzgar türbini	800 \$/kW	100 \$/kW
PV panel	800 \$/kW	100 \$/kW
Batarya	1500 \$	10 \$
İnverter	1000 \$/kW	10 \$/kW
Dizel jeneratör	200 \$/kW	3 \$/kW (saatlik)

2.3. HOMER Pro Uygulaması

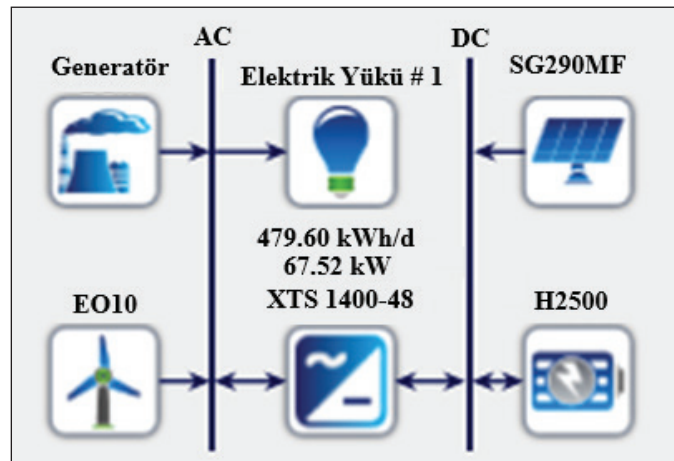
Yapılan çalışmada, sistem optimizasyonu, elektrik enerjisi analizi ve ekonomik değerlendirmeler için HOMER Pro yazılımı kullanılmıştır. HOMER Pro, binaların enerji tüketimini analiz etme, yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etme ve enerji verimliliğini artırma amacıyla geliştirilmiş bir simülasyon programıdır (Khalil vd. 2021). Bu yazılım, tasarlanan sistemlerin enerji tüketimini simüle ederek enerji tasarrufu potansiyelini ve maliyet azaltma imkanlarını ortaya koymaktadır. Ayrıca, farklı enerji kaynaklarının sistem üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla senaryo analizleri de gerçekleştirebilmektedir. HOMER Pro uygulamasında yapılan analizler, beş temel aşamaya ayrılmaktadır. İlk aşamada, bölgenin iklim koşulları, yükün enerji tüketim verileri, kullanılacak ekipmanların teknik özellikleri ve maliyet parametreleri programa girilerek modelleme süreci baş-

latılmaktadır. Şekil 4’te HOMER Pro’da oluşturulan hibrit enerji sisteminin modeli gösterilmiştir.

HOMER Pro yazılımı uygulanan senaryoların benzetimini gerçekleştirerek enerji tüketiminin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlar. Simülasyon sonuçları, enerji tüketimi, enerji maliyetleri ve çevresel etkiler gibi çeşitli faktörler temel alınarak hesaplanır. Elde edilen sonuçlar kapsamlı bir şekilde incelenir ve toplam enerji tüketimini minimize etmek, enerji maliyetlerini optimize etmek ve sistemin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla en uygun senaryolar belirlenir. Çalışmanın sonunda, tüm bu veriler raporlanarak sistemin performans analizi gerçekleştirilir ve bulgular değerlendirilir (Pamuk 2024).

Programda, enerji verimliliği, kullanılan ekipman ve malzemeler gibi faktörler göz önünde bulundurularak detaylı bir enerji modeli oluşturulmuştur. Enerji tüketimini azaltmak amacıyla farklı senaryolar geliştirilmiş ve bu senaryolar çerçevesinde enerji kaynaklarının değiştirilmesi, enerji verimliliğini artırıcı önlemler alınması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegre edilmesi gibi uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu adımlar, sistemin hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir hale getirilmesini sağlamıştır.

HOMER Pro programında kullanılan NPC ve Birim COE değerleri, sistemin çevresel ve ekonomik analizinde kritik bir rol oynamaktadır. NPC, sistemin kullanım ömrü boyunca yapılan toplam harcamalardan elde edilen kar değerlerinin çıkartılması ile hesaplanmaktadır. Bu harcamalar, başlangıç yatırım maliyetleri, bakım ve işletim giderleri ile kullanım süresi dolan ekipmanların yenilenme maliyetlerini içermektedir. Sistemin kar miktarı ise geri dönüşüm aşamasından sağlanan kazanç değerleri ve şebekeye satılan enerjiden elde



Şekil 4. Hibrit enerji sistem modeli.

edilen gelirlerden oluşmaktadır. Bu değerler, sistemin ekonomik açıdan uygunluğunu değerlendirmek ve en verimli maliyet çözümünü belirlemek için kullanılmaktadır (Ur Rashid vd. 2022). Denklem 1’de birim COE değerinin eşitliği gösterilmiştir.

$$COE = \frac{[C_{yt} - (C_b \cdot H_s)]}{E_s} \quad (1)$$

Denklem 1’de C_{yt} yıllık üretim maliyetini, C_b ısıtıcı maliyetini, H_s termal yük tüketimini, E_s ise toplam yük tüketimini temsil etmektedir. Birim COE değeri, üretilen faydalı elektrik enerjisinin kilowatt-saat (kWh) başına ortalama maliyetini ifade etmektedir (Basheer vd. 2022). HOMER Pro yazılımında yukarıdaki eşitlik kullanılarak yıllık elektrik üretim maliyet değeri (toplam yıllık maliyetten termal yükü sağlama maliyetinin çıkarılmasıyla elde edilen değer) hizmet verilen toplam elektrik yükü değerine bölünmektedir. Bu hesaplama, enerji sisteminin ekonomik verimliliğini değerlendirmek için kullanılan temel bir parametredir.

Hibrit enerji sistemlerine dayalı şebeke tasarımlarının ekonomik analizlerinde, türbin ve panel kurulum maliyetleri ile bakım giderlerinin doğru bir biçimde hesaplanması, sistemin finansal sürdürülebilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu hesaplamalar, projelerin uzun vadeli karlılık oranını ve yatırımın geri dönüş süresini doğru bir şekilde değerlendirebilmek için gereklidir. Ekonomik analizde yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biri, Seviye Maliyet Modeli (LCOE) olarak bilinen yaklaşımdır (Swarnkar vd. 2016). LCOE, bir enerji üretim sisteminin toplam maliyetlerinin, o sistem tarafından üretilen enerji miktarına bölünmesiyle elde edilen bir ölçüttür. Bu model, farklı enerji üretim teknolojilerinin karşılaştırılmasında ve yatırımların ekonomik verimliliğinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Denklem 2’de LCOE modelinin eşitliği gösterilmiştir.

$$LCOE = \frac{capex + \sum_{t=1}^n Opex_t}{\sum_{t=1}^n E_t} \quad (2)$$

Denklem 2’de $Capex$ başlangıç yatırım maliyetlerini, (kurulum, altyapı vb.) $Opex_t$ her yıl için operasyonel ve bakım maliyetlerini, E_t her yıl üretilen enerji miktarını (kWh), n ise sistemin ömrünü (yıl olarak) temsil etmektedir. Denklem 2, enerji başına maliyetin hesaplanmasına olanak tanırken, aynı zamanda yatırımcıların karar alma süreçlerinde sistemin ekonomik etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. LCOE değeri, enerji üretim teknolojilerinin uzun vadeli

maliyetlerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu nedenle farklı hibrit enerji sistemlerinin ekonomik verimlilikleri arasında karşılaştırma yapılmasına imkan tanımaktadır. Bu model yapısı, enerji üretim sistemlerinin finansal sürdürülebilirliğini sağlamaya yardımcı olmakta ve yatırımcıların en verimli ve etkili çözümleri seçmelerine olanak tanımaktadır.

Bunun yanı sıra, geri dönüş süresinde hibrit enerji sistemlerine dayalı şebeke tasarımlarında yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik olarak değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir başka yöntemdir. Yatırımın ne kadar sürede kendini amorti edeceğini belirlemek, projelerin finansal açıdan kabul edilebilirliğini anlamak için önemlidir. Geri dönüş süresi, başlangıç maliyetlerinin yıllık gelirlerle karşılaştırılması yoluyla hesaplanmaktadır (Niringiyimana vd. 2023). Denklem 3’de geri dönüş süresinin hesaplama eşitliği gösterilmiştir.

$$GeriDönüşSuresi = \frac{Capex}{YıllıkTasarruf} \quad (3)$$

Denklem 3’de $Capex$ yatırım maliyetini, $Yıllık Tasarruf$ ise yıllık gelir miktarını temsil etmektedir. Bu model, özellikle kısa vadeli finansal risklerin değerlendirilmesi ve yatırım kararlarının alınmasında önemli bir rol oynamaktadır (Said vd. 2024). Yatırımcılar, LCOE hesaplamaları sayesinde enerji üretim sistemlerinin finansal sürdürülebilirliğini daha sağlıklı bir biçimde analiz etmektedir. Bu süreç, yatırım kararlarının daha bilinçli ve verimli bir şekilde alınmasını sağlamaktadır.

NPC ve İç Verim Oranı (IRR), daha karmaşık ekonomik analiz yöntemleri olup, hibrid şebeke tasarımının gelecekteki nakit akışlarının değerini, mevcut yatırım maliyetleriyle karşılaştırarak sistemin kârlılığını değerlendirmeye olanak tanımaktadır (Rahmat vd. 2022). NPC, gelecekteki nakit akışlarının şimdiki değerinin, mevcut yatırım maliyetleriyle farkını hesaplayarak, yatırımın finansal açıdan olumlu olup olmadığına dair somut bir değerlendirme sunmaktadır. Bu yöntem, yatırımcıların projelerin uzun vadeli finansal sürdürülebilirliğini ve ekonomik verimliliğini daha kapsamlı bir biçimde analiz etmelerine yardımcı olmaktadır. Denklem 4’de NPC değerinin hesaplama eşitliği gösterilmiştir.

$$NPC = \sum \frac{R_t}{(1+i)^t} - Capex \quad (4)$$

Denklem 4’de R_t her yıl elde edilen nakit akışını (geliri), i iskonto oranını, t zaman dilimini (yıl), $Capex$ başlangıç yatırım maliyetini temsil etmektedir. IRR, bir yatırımın yıllık beklenen getirisini ölçen ve yatırımın kârlılığını değeren-

dirmeye yardımcı olan bir göstergedir. IRR, NPC değerinin sıfır olduğu iskonto oranını ifade etmektedir. IRR, NPC değerinin sıfır olduğu durumda sistemin yıllık getiri oranını belirlemektedir. Bu analizler, enerji projelerinin yalnızca kısa vadeli değil, aynı zamanda uzun vadeli finansal performanslarının da değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle yatırımcıların karar alma süreçlerinde, NPC ve IRR değerleri, projelerin kârlılık düzeyini niceliksel olarak ortaya koyarak daha bilinçli ve stratejik yatırım kararlarının alınmasına katkı sağlamaktadır.

Ekonomik modellemelerin doğruluğunu artıran bir diğer önemli yöntem duyarlılık analizidir (Mbasso vd. 2023). Duyarlılık analizi, belirli parametrelerde meydana gelen değişimlerin (örneğin, enerji fiyatları ve bakım maliyetleri) projenin toplam maliyetleri ve getirileri üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Bu analiz, sistemin ekonomik performansını etkileyebilecek belirsizliklerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır ve yatırımcılara farklı senaryolar altında sistemin nasıl bir performans sergileyebileceğine dair öngörüler sunmaktadır. Ayrıca, duyarlılık analizi, enerji projelerinin çevresel ve ekonomik belirsizliklere karşı dayanıklılığını değerlendirmede kritik bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, bu tür modellemeler hibrid yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik analizlerinde temel bir araç olarak kullanılmakta olup, doğru ve bilinçli yatırım kararlarının alınmasına sağlam bir veri temeli oluşturmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

HOMER Pro yazılımında modellenen sistem optimal çalışma şartları altında iki senaryo içermekte olup, her senaryo dört simülasyon sonucuna sahiptir. Her sistem için kurulum maliyeti, yenileme maliyeti, hurda maliyeti ve işletme-bakım maliyetleri karşılaştırıldığında, en büyük nakit çıkışı kurulum maliyetinden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, sistem maliyet özetinde en büyük nakit girişi işletme-bakım maliyetinden sağlanmaktadır. Her iki senaryoda da, dizel jeneratör-batarya-rüzgar hibrit sistemi, dizel jeneratör-batarya-PV hibrit sistemlerine kıyasla daha iyi NPC değerine sahiptir. Bu maliyet değerleri birinci senaryo için 1.67 milyon \$, ikinci senaryo için ise 1.14 milyon \$ olarak hesaplanmıştır. Dizel jeneratör-batarya-rüzgar hibrit sistemi, birinci senaryodaki PV sistemine kıyasla 4.93 yıl ve ikinci senaryodaki rüzgar türbini sistemine kıyasla 3.18 yıl daha kısa geri ödeme süresine sahiptir. Hibrit sistemin NPC değeri, birinci senaryoda 669.483 \$ ve ikinci senaryoda ise 912.560 \$ olarak hesaplanmıştır. Yenilenebilir enerji teknolojisinin entegrasyonu, geri ödeme süresini kısaltmış ve

sistemin şimdiki maliyetini arttırmıştır. PV ve rüzgar türbin sistemleri, hibrit sisteme kıyasla sırasıyla yılda 473 kg ve 312 kg daha fazla emisyon üretmektedir. Bu nedenle sistemle bütünleşmiş yenilenebilir enerji teknolojisi, sistem kaynaklı emisyon kirliliği değerlerini azaltmıştır. Hassasiyet analizi, yenilenebilir enerji sisteminin toplam NPC değeri ve CO₂ emisyonlarının, yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunması ile sermaye maliyetinden önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Dizel jeneratör sistemi, şebeke elektriginden bağımsız olarak çalışabilen ve bu özelliğiyle enerji ihtiyacının karşılanmasında temel bir çözüm olarak kabul edilen bir sistemdir (Yasin ve Alsayed 2020). Çalışmada, 88 kW gücünde bir dizel jeneratör kullanılarak sistemin performansı ve maliyet analizleri incelenmiştir. Sistemin kurulum aşamasında gereken başlangıç sermayesi 17.600 \$ olarak hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, sistemin NPC değeri 28.2 milyon \$, COE değeri ise kWh başına 13.89 \$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, sistemin yıllık işletme ve bakım masrafları 2.43 milyon \$ olarak optimize edilmiştir. Bu parametreler, dizel jeneratör sisteminin hem ekonomik hem de teknik açıdan değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, sistemin uzun vadeli kullanımında maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Şekil 5'te hibrit enerji sisteminden elde edilen optimal sistem parametreleri, sistemin performansı ve maliyet etkinliği gösterilmiştir.

Rüzgar türbini ve dizel jeneratörün entegre edildiği hibrit enerji sisteminde, 32 adet rüzgar türbini, 88 kW kapasiteli bir dizel jeneratör, 102 kW gücünde bir inverter ve 178 adet batarya kullanılarak sistemin teknik ve ekonomik performansı analiz edilmiştir. Sistemin kurulum aşamasında gereken başlangıç sermayesi 642.600 \$ olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, sistemin NPC değeri 869.959 \$, COE değeri kWh başına 0.429 \$ ve yıllık işletme ve bakım masrafları ise 19.633 \$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, hibrit enerji sisteminin hem yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırması hem de dizel jeneratör ile sürekliliği sağlaması açısından ekonomik ve teknik açıdan uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Elde edilen veriler, sistemin uzun vadeli kullanımında maliyet etkinliği, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir referans oluşturmaktadır.

PV paneller ve dizel jeneratörden oluşan hibrit enerji sistemlerinde ise, 461 kW kurulu güce sahip PV paneller, 88 kW kapasiteli bir dizel jeneratör, 262 adet batarya ve 88 kW gücünde bir inverter kullanılarak sistemin teknik ve ekono-

Sistem Parametreleri					Maliyet				Sistem
SG290MFB (kW)	EO10	Jen (kW)	H2500	XTS1400-48 (kW)	NPC (\$)	COE (\$)	İşletme Maliyeti (\$)	Kurulum Maliyeti (\$)	Performans (%)
123	13	88.0	116	81.1	\$600.673	\$0.296	\$10.834	\$475.210	99.8
	32	88.0	178	102	\$869.959	\$0.429	\$19.633	\$642.600	99.5
461		88.0	262	88.0	\$1.01M	\$0.499	\$12.392	\$867.388	99.8
794	119	88.0		67.7	\$9.42M	\$4.65	\$669.483	\$1.67M	67.7
	140	88.0			\$11.7M	\$5.77	\$912.560	\$1.14M	54.1
1.440		88.0		74.4	\$17.2M	\$8.48	\$1.38M	\$1.24M	29.8
		88.0	39	34.0	\$23.6M	\$11.65	\$2.03M	\$110.100	0
		88.0			\$28.2M	\$13.89	\$2.43M	\$17.600	0

Şekil 5. Hibrit enerji sisteminin optimal sistem parametreleri, maliyet etkinliği ve performans değerleri.

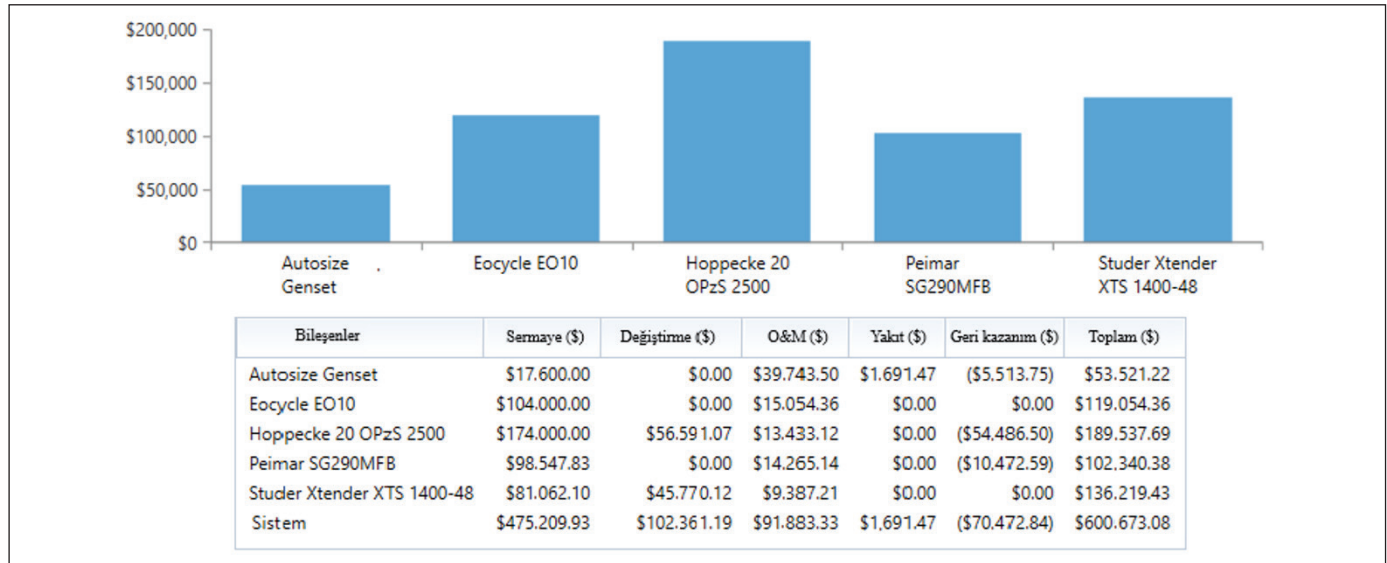
mik performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sistemin kurulum maliyeti 867.388 \$ olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, sistemin NPC değeri 1.01 milyon \$, COE değeri kWh başına 0.499 \$ ve yıllık işletme ve bakım masrafları ise 12.392 \$ olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, PV ve dizel jeneratörün entegre edildiği hibrit sistemin, hem yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını optimize etmesi hem de enerji sürekliliği sağlaması açısından ekonomik ve teknik olarak uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, sistemin düşük işletme maliyetleri ve enerji maliyetleri, özellikle şebekeden uzak bölgelerde veya enerji erişiminin sınırlı olduğu alanlarda uygulanabilirliğini artırmaktadır. Elde edilen sonuçlar, hibrit sistemin sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği açısından önemli bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Rüzgar türbini, PV paneller ve dizel jeneratörün entegre edildiği hibrit enerji sisteminde ise, 13 adet rüzgar türbini, 123 kW kurulu güce sahip güneş panelleri, 88 kW kapasiteli bir dizel jeneratör, 116 kW batarya bankası ve 81.1 kW gücünde bir inverter kullanılarak sistemin teknik ve ekonomik performansı kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Sistemin kurulum maliyeti 475.210 \$ olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, sistemin NPC değeri 600.673 \$, COE değeri kWh başına 0.296 \$ ve yıllık işletme ve bakım masrafları ise 10.834 \$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, hibrit sistemin yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar ve güneş) kullanımını maksimize ederken, dizel jeneratör ile enerji sürekliliği sağlaması açısından hem çevresel hem de ekonomik olarak avantajlı bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Özellikle, düşük COE değeri ve işletme maliyetleri, bu hibrit sistemin şebekeden uzak bölgelerde veya enerji altyapısının yetersiz olduğu alanlarda uygulanabilirliğini artırmaktadır. Elde edi-

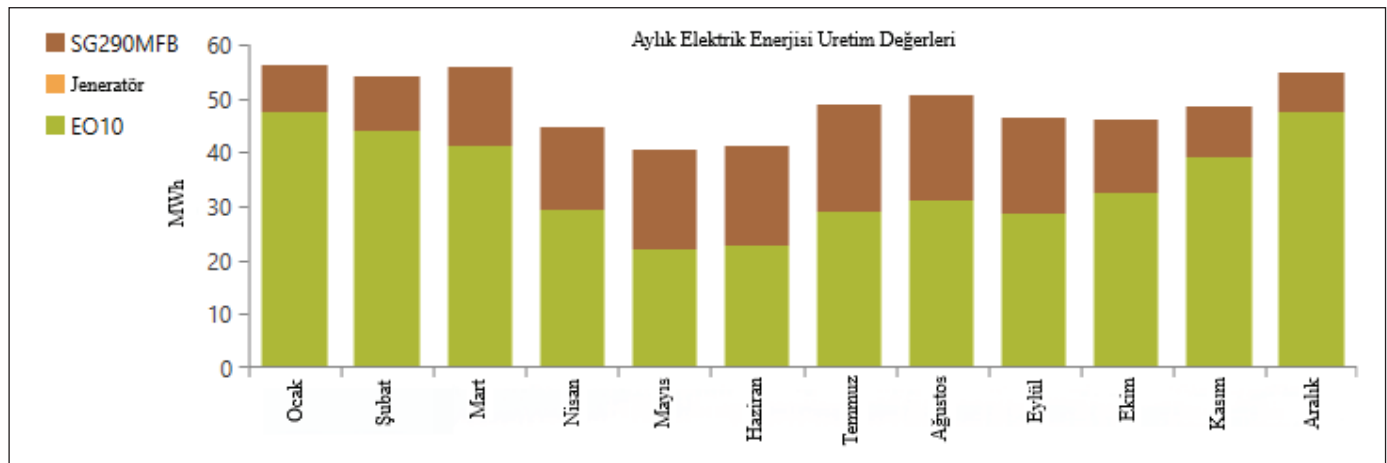
len bulgular, sistemin sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve maliyet etkinliği açısından önemli bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 6'da sistem bileşenlerine ait toplam NPC değerlerinin sonuçları gösterilmiştir.

Optimal sistemin maliyet analizleri incelendiğinde, sistem bileşenleri arasında en yüksek maliyetin 189.537 \$ ile batarya bileşenine ait olduğu tespit edilmiştir. Bataryayı, 136.219 \$ maliyeti ile inverter takip etmektedir. İnverter bileşeni sistemin en yüksek ikinci maliyetli unsuru olarak öne çıkmaktadır. İnverterden sonra, toplam maliyeti 119.054 \$ olan rüzgar türbinleri, sistemin üçüncü en maliyetli bileşenidir. PV paneller ise sistemde 102.340 \$ maliyetle yer almaktadır. Dizel jeneratörler ise 53.521 \$ maliyeti ile sistemdeki en düşük maliyetli bileşen olarak belirlenmiştir. Şekil 7'de sistemdeki enerji üretim bileşenlerinden elde edilecek olan aylık elektrik üretim değerleri gösterilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, yük tarafından tüketilen toplam enerjinin, PV, rüzgar ve dizel jeneratör bileşenlerinden sağlanan enerjilerin toplamına eşit olduğu tespit edilmiştir. HOMER Pro yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları doğrultusunda, yıllık toplam enerji talebinin %63.47'sinin rüzgar enerjisi tarafından karşılandığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, PV panellerinin sağladığı enerjinin yıllık toplam enerji tüketiminin %36.49'unu oluşturduğu, jeneratör katkısının ise yalnızca %0.04 gibi oldukça düşük bir seviyede kaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarının sistemin enerji ihtiyacını karşılamada baskın rol oynadığını, jeneratörün ise ancak çok sınırlı düzeyde bir destek sağladığını ortaya koymaktadır.

Şekil 8'de, sistem bileşenlerinin optimal büyüklüklerine bağlı olarak iki farklı senaryo incelenmiştir. İlk senaryoda, batarya, invertör ve güneş panelinin optimal büyüklüklerinin



Şekil 6. Sistem bileşenlerinin toplam NPC değeri sonuçları.



Şekil 7. Aylık elektrik enerjisi üretim değerleri.

sabitlendiği durumda, rüzgar türbini sayısının NPC üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. İkinci senaryoda ise, batarya ve invertörün optimal büyüklüklerinin sabitlendiği koşullarda, rüzgar türbini sayısı ve güneş paneli büyüklüklerinin NPC değeri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Her iki senaryoda da rüzgar türbini sayısı ile NPC değeri arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu analizler, sistem bileşenlerinin boyutlandırılmasının toplam maliyet üzerinde nasıl kritik bir rol oynadığını ve bileşen optimizasyonunun maliyet etkinliği açısından ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, rüzgar türbini sayısı ve güneş paneli kapasitesi gibi parametrelerin, sistemin ekonomik performansını doğrudan etkilediğini ve bu bileşenlerin optimal seçiminin maliyet etkinliği açısından büyük önem taşıdığını göstermektedir. Çizelge 3'te sistemde uygulanan

hibrit varyasyonlar ve bu varyasyonlara ait maliyet bilgileri gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, sistemde üretilen enerjinin büyük bir kısmının rüzgar türbinleri tarafından sağlandığı tespit edilmiştir. PV panellerin ürettiği enerji, yalnızca yaz aylarında rüzgar türbinlerinin ürettiği enerjiye yaklaşmaktadır. Yaz ayları süresince sistemdeki toplam enerji üretiminin %70.4'ünün rüzgar türbinlerinden, %29.6'sının PV panellerden ve %0.0487'sinin ise dizel jeneratörlerden sağlandığı belirlenmiştir. Yenilenebilir enerji fraksiyon oranı %99.8 olarak hesaplanmış olup, bu durum sistemin büyük ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarına dayandığını ortaya koymaktadır. Sistemdeki toplam yıllık enerji üretimi 587.488 kW olarak belirlenmiştir. Üretilen enerjinin %67.8'ine denk gelen 398.217 kW'lık kısmı, yük tarafından tüketilen ener-

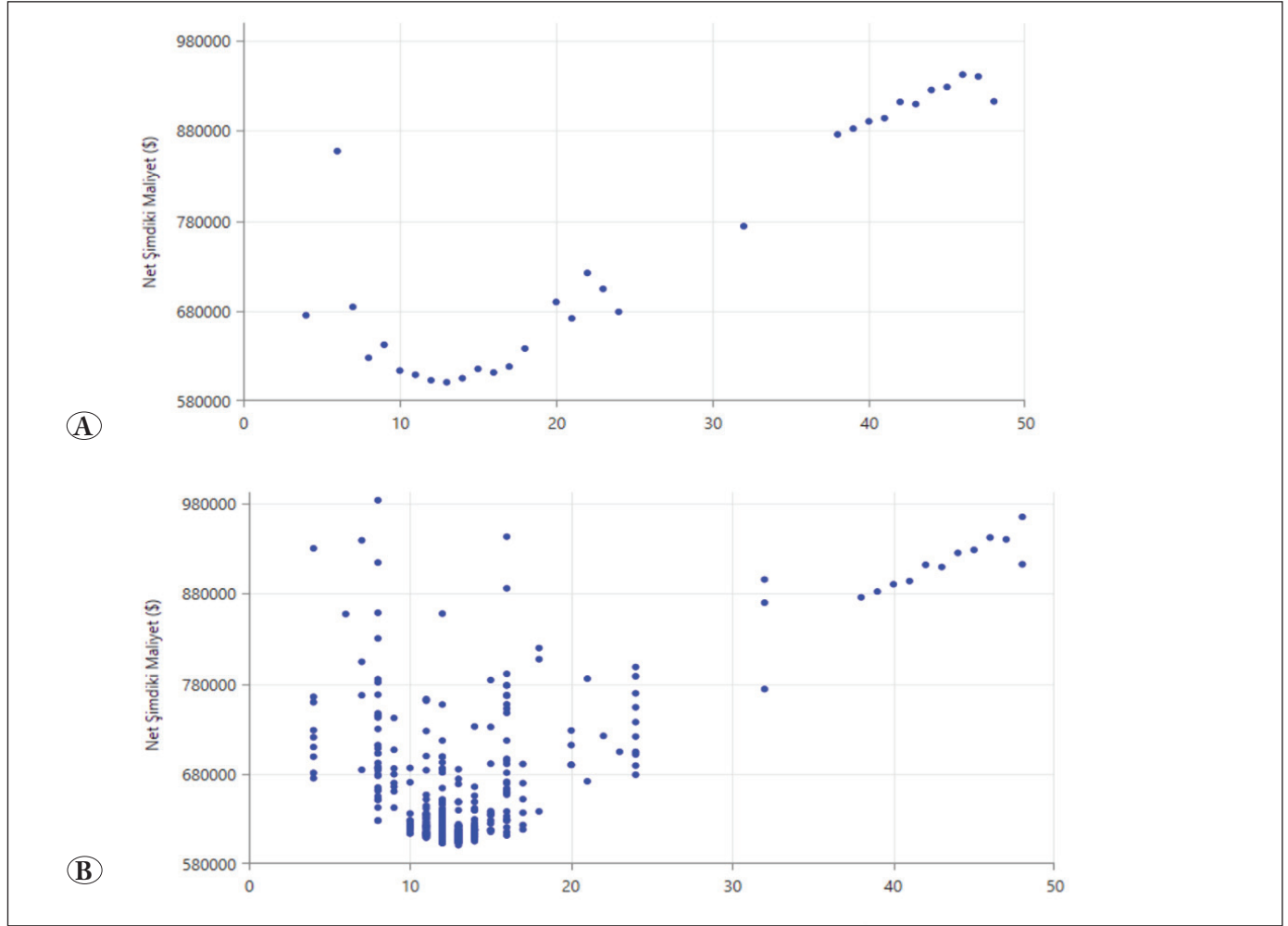
Çizelge 3. Sistemde uygulanan hibrit varyasyonlar ve maliyet bilgileri.

Senaryo	Sistem Tipi	Toplam NPC Değeri (\$)	COE Değeri (\$/kWh)
1	Rüzgar	325.37	0.178
	PV	512.54	0.112
	Batarya	3.09 M	4.012
	Dizel	28.2 M	13.89
	PV+Rüzgar	340.14	0.207
	Rüzgar+Batarya	1.16 M	0.853
	Rüzgar+Dizel	869.959	0.429
	PV+Batarya	913.527	0.513
	PV+Dizel	1.01 M	0.499
	Batarya+Dizel	12.183 M	6.541
	Rüzgar+PV+Dizel	600.673	0.296
	Rüzgar+PV+Batarya	815.317	0.795
	Batarya+PV+Dizel	1.67 M	0.894
	PV+Rüzgar+Batarya+Dizel	669.483	0.307
2	Rüzgar	310.25	0.185
	PV	520.12	0.116
	Batarya	3.10 M	3.952
	Dizel	29.3 M	14.27
	PV+Rüzgar	330.12	0.213
	Rüzgar+Batarya	1.15 M	0.883
	Rüzgar+Dizel	875.253	0.435
	PV+Batarya	920.450	0.546
	PV+Dizel	1.02 M	0.492
	Batarya+Dizel	12.462 M	6.432
	Rüzgar+PV+Dizel	607.462	0.314
	Rüzgar+PV+Batarya	826.514	0.813
	Batarya+PV+Dizel	1.14 M	0.718
	PV+Rüzgar+Batarya+Dizel	912.560	0.466

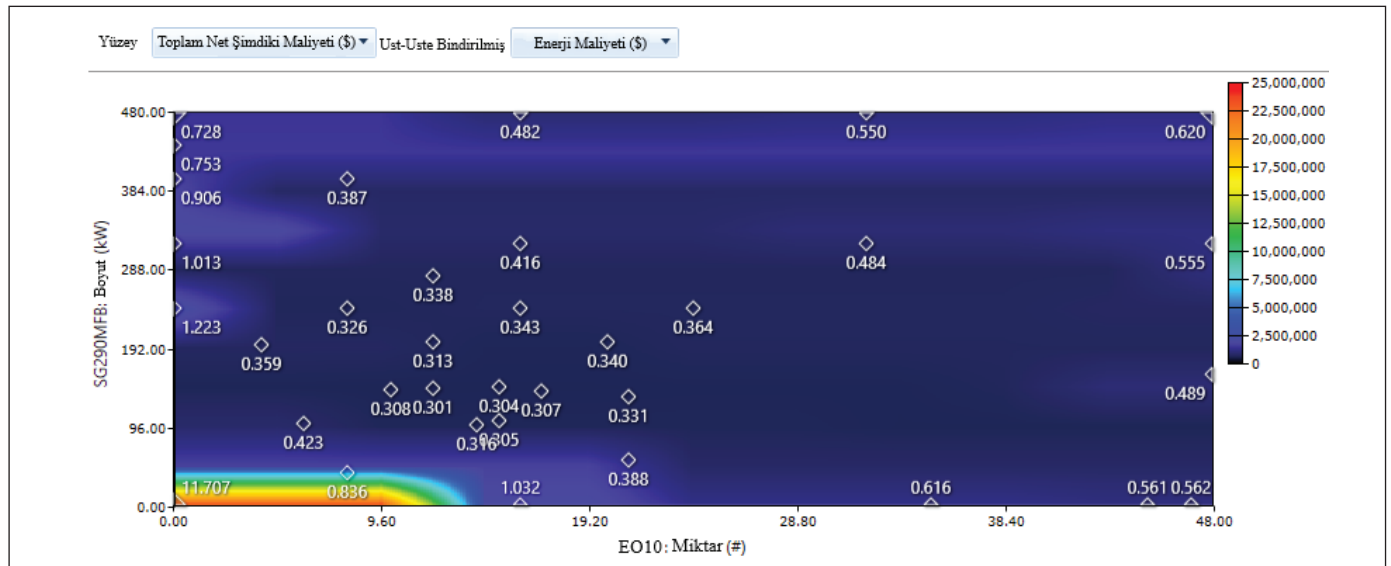
jinin üzerinde kalan fazla enerji olarak kaydedilmiştir. NPC analizlerinde, 25 rüzgar türbininden sonra maliyetlerin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, NPC değerinin 10-18 rüzgar türbini aralığında en düşük değerlerine ulaştığı ve özellikle 13 rüzgar türbini kullanıldığında en optimal maliyet seviyesine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, sistemin hem enerji üretim performansını hem de maliyet etkinliğini optimize etmek için rüzgar türbini sayısının kritik bir parametre olduğunu göstermektedir. Şekil 9'da rüzgar türbini sayısı ve güneş paneli büyüklüğüne bağlı olarak birim COE değerindeki değişimleri veren ısı haritası gösterilmiştir. Bu grafik, rüzgar türbini sayısı ve güneş

paneli kapasitesi arasındaki ilişkinin birim COE üzerindeki etkisini göstermektedir. Isı haritası, farklı bileşen kombinasyonlarının enerji maliyetleri üzerindeki etkisini analiz etmek ve sistemin en uygun konfigürasyonunu belirlemek için kullanılmıştır.

Isı haritası incelendiğinde, sistemdeki en düşük birim COE değerinin, 10 ile 18 adet rüzgar türbini kullanıldığı durumda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu aralık, rüzgar türbinlerinin enerji üretim verimliliği ile maliyet etkinliği arasındaki optimal dengeyi sağladığını göstermektedir. Güneş paneli büyüklükleri açısından yapılan değerlendirmede ise, 96 kW ile 192 kW aralığında hem birim COE değerinin hem de NPC



Şekil 8. Sistem bileşenlerine bağlı NPC ilişkisi (A) Batarya, inverter ve güneş panellerinin optimal çalışma durumundaki rüzgar türbini sayısı ve dağılımı (B) Batarya ve inverterin optimal çalışma durumundaki rüzgar türbini sayısı ve dağılımı.



Şekil 9. Optimal çalışma şartlarındaki birim COE değerindeki ısı haritası değişimi.

değerinin en düşük değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, güneş paneli kapasitesinin belirli bir aralıkta tutulmasının, sistemin genel maliyet performansını optimize ettiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, hem rüzgar türbini sayısının hem de güneş paneli büyüklüğünün belirli aralıklarda seçilmesi, hibrit enerji sisteminin hem ekonomik hem de teknik açıdan en verimli şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, rüzgar türbini, PV paneller ve dizel jeneratörden oluşan hibrit enerji sisteminin, teknik ve ekonomik açıdan en uygun çözüm olduğu tespit edilmiştir. Bu tür hibrit enerji sistemlerinde, NPC değeri ve COE değerlerinin, diğer sistem konfigürasyonlarına kıyasla önemli ölçüde daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, yıllık işletme ve bakım masraflarının da diğer sistemlerle karşılaştırıldığında daha ekonomik olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, hibrit enerji sisteminde üretilen yenilenebilir enerjinin (rüzgar ve güneş) toplam enerji üretimine oranının, diğer hibrit enerji sistemlerine göre en yüksek seviyede olduğu görülmüştür. Bu durum, sistemin hem çevresel sürdürülebilirliği desteklediğini hem de fosil yakıt kullanımını minimize ettiğini göstermektedir. Maliyet dağılımları incelendiğinde ise, hibrit enerji sistemlerinde enerji depolama ve dönüşüm bileşenlerinin (batarya ve inverter) toplam maliyet içinde önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, yenilenebilir enerji kaynaklarına (rüzgar türbinleri ve PV paneller) yapılan yatırımların da sistem maliyetleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, hibrit enerji sistemlerinin tasarım ve optimizasyon süreçlerinde maliyet etkinliğinin sağlanması için bileşen seçiminin kritik bir rol oynadığını ortaya koymakta ve gelecekteki benzer çalışmalar için önemli bir referans oluşturmaktadır.

5. Kaynaklar

- Aghajani, G., Ghadimi, N. 2018.** Multi-objective energy management in a micro-grid. *Energy Reports*, 4, 218-225. Doi: 10.1016/j.egy.2017.10.002
- Altinay, G., Karagol, E. 2005.** Electricity consumption and economic growth: evidence from Turkey. *Energy Economics*, 27(6): 849-856. Doi: 10.1016/j.eneco.2005.07.002
- Basheer, Y., Waqar, A., Qaisar, SM., Ahmed, T., Ullah, N., Aloatai, S. 2022.** Analyzing the prospect of hybrid energy in the cement industry of Pakistan, using HOMER pro. *Sustainability*, 14(19): 12440. Doi: 10.3390/su141912440
- Demirtas, O. 2013.** Evaluating the best renewable energy technology for sustainable energy planning. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 3(4): 23-33.
- Dincer, I., Acar, C. 2015.** A review on clean energy solutions for better sustainability. *International Journal of Energy Research*, 39(5): 585-606. Doi: 10.1002/er.3329
- Güney, T. 2019.** Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(5): 389-397. Doi: 10.1080/13504509.2019.1595214
- Khalil, L., Bhatti, KL., Awan, M. AI., Riaz, M., Khalil, K., Alwaz, N. 2021.** Optimization and designing of hybrid power system using HOMER pro. *Materials Today: Proceedings*, 47, S110-S115. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.054
- Kumar, P., Pukale, R., Kumabhar, N., Patil, U. 2016.** Optimal design configuration using HOMER. *Procedia Technology*, 24, 499 – 504. Doi: 10.1016/j.protcy.2016.05.085
- Mbasso, WF., Naoussi, SRD., Molu, RJJ., Saatong, KT., Kamel, S. 2023.** Technical assessment of a stand-alone hybrid renewable system for energy and oxygen optimal production for fishes farming in a residential building using HOMER pro. *Cleaner Engineering and Technology*, 17, 100688. Doi: 10.1016/j.clet.2023.100688
- Moghaddas-Tafreshi, SM., Mohseni, S., Karami, ME., Kelly, S. 2019.** Optimal energy management of a grid-connected multiple energy carrier micro-grid. *Applied Thermal Engineering*, 152, 796-806. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.113
- NASA POWER 2024.** NASA Prediction of Worldwide Energy Resources, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nema, P., Nema, RK., Rangnekar, S. 2009.** A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8): 2096-2103. Doi: 10.1016/j.rser.2008.10.006
- Niringiyimana, E., Wanquan, S., Dushimimana, G., Niyigena, JB., 2023.** Hybrid Renewable Energy System Design and Optimization for Developing Countries Using HOMER Pro: Case of Rwanda. 7th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), 10-12 March, Singapore, pp. 72-76. Doi: 10.1109/ICGEA57077.2023.10125739
- Pamuk, N. 2024.** Techno-economic feasibility analysis of grid configuration sizing for hybrid renewable energy system in Turkey using different optimization techniques. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3): 102474. Doi: 10.1016/j.asej.2023.102474
- Rahmat, MAA., Abd Hamid, AS., Lu, Y., Ishak, MAA., Suheel, SZ., Fazlizan, A., Ibrahim, A. 2022.** An analysis of renewable energy technology integration investments in Malaysia using HOMER pro. *Sustainability*, 14(20): 13684. Doi: 10.3390/su142013684

- Said, TR., Kichonge, B., & Kivevele, T. 2024.** Optimal design and analysis of a grid-connected hybrid renewable energy system using HOMER Pro: A case study of Tumbatu Island, Zanzibar. *Energy Science & Engineering*, 12(5): 2137-2163. Doi: 10.1002/ese3.1735
- Sayed, ET., Olabi, AG., Alami, AH., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., Abdelkareem, MA. 2023.** Renewable energy and energy storage systems. *Energies*, 16(3): 1415. Doi: 10.3390/en16031415
- Sharma, P., Bora, BJ., Bui, TMT., Efremov, C., Tran, MH., Kowalski, J., Cao, DN., 2024.** Techno-economic analysis of a hybrid energy system for electrification using an off-grid solar/biogas/battery system employing HOMER: A case study in Vietnam. *Process Safety and Environmental Protection*, 191, 1353-1367. Doi: 10.1016/j.psep.2024.09.046
- Stern, DI., Kander, A. 2012.** The role of energy in the industrial revolution and modern economic growth. *The Energy Journal*, 33(3): 125-152. Doi: 10.5547/01956574.33.3
- Swarnkar, NM., Gidwani, L., Sharma, R. 2016.** An application of HOMER Pro in optimization of hybrid energy system for electrification of technical institute. 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 07-08 April, Nagercoil, India, pp. 56-61. Doi: 10.1109/ICEETS.2016.7582899
- Ur Rashid, M., Ullah, I., Mehran, M., Baharom, MNR., Khan, F. 2022.** Techno-economic analysis of grid-connected hybrid renewable energy system for remote areas electrification using HOMER Pro. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(2): 981-997. Doi: 10.1007/s42835-021-00984-2
- Yasin, A., Alsayed, M. 2020.** Optimization with excess electricity management of a PV, energy storage and diesel generator hybrid system using HOMER Pro software. *International Journal of Applied Power Engineering*, 9(3): 267-283. Doi: 10.11591/ijape.v9.i3.pp267-283
- Yousefikhah, S., Asgharizadeh, E., Jahangir, MH., 2025.** Multi-objective optimization of a hybrid micro-grid system for reducing grid dependency in the automotive industry: a case study of Iran Khodro company. *International Journal of Modelling and Simulation*, 45(1): 114-136. Doi: 10.1080/02286203.2023.2188512
- Yuksel, I., Kaygusuz, K. 2011.** Renewable energy sources for clean and sustainable energy policies in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8): 4132-4144. Doi: 10.1016/j.rser.2011.07.007