



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Van ili için Şebekeden Bağımsız Rüzgâr, Güneş ve Hibrit (Rüzgâr/Güneş) Enerji Sistemlerinin Tasarımı ve Karşılaştırmalı Analizi [†]

Yunus DURSUN¹, Mehmet YILMAZ^{*2}

¹MEB, Kemalpaşa Mopak Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, 35730, Kemalpaşa, İzmir, Türkiye

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

*Sorumlu yazar e-posta: m.yilmaz@inonu.edu.tr

Öz: Hibrit enerji sistemleri, maliyetleri azaltmak ve bağımsız alternatiflere kıyasla kapasiteyi, değeri, verimliliği veya çevresel performansı iyileştirmek için çeşitli enerji üretimi, depolama ve/veya dönüştürme teknolojilerini fiziksel veya kavramsal olarak birleştiren sistemlerdir. Bu makale Van ilinin yüksek güneş enerjisi potansiyelini kullanarak rüzgâr, güneş ve hibrit (güneş/rüzgâr) enerji sistemi ile elektrik üretim olanaklarını araştırmayı amaçlamaktadır. Akdamar Adası'nda dubleks bir evin elektrik ihtiyacını karşılamaya yönelik çalışmada, rüzgâr enerjisi sistemi, güneş enerjisi sistemi ve hibrit enerji sistemi (güneş/rüzgâr) şebekeden bağımsız olarak simülasyonla modellenmiştir. Simülasyonlar HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen sistemlerin ekonomik ve ekolojik analizleri yapılarak toplam net bugünkü maliyet (NPC), birim enerji maliyeti (COE), fazla elektrik miktarı, geri ödeme süresi bakımından uygun sonuçları veren sistemler araştırılmıştır. Rüzgâr enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1681-0.4457 arasında, güneş enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1356-0.3987 arasında, hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin COE değerleri 0.0804-0.2108 arasında değişmiştir. Rüzgâr türbininin gücü 11 kW, PV panellerinin gücü 8 kW, batarya sayısı 3 adet, dönüştürücü gücü 2.94 kW olan hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemi en düşük birim enerji maliyetine (0.0804 \$/kWh) sahip olduğundan en uygun sistem olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Hibrit sistem, HOMER, Rüzgâr enerjisi, Şebekeden bağımsız, Van

Design and Comparative Analysis of Off-Grid Wind, Solar and Hybrid (Wind-Solar) Energy Systems for Van Province

Abstract: Hybrid energy systems are systems that physically or conceptually combine various energy generation, storage and/or conversion technologies to reduce costs and improve capacity, value, efficiency or environmental performance compared to standalone alternatives. This article aims to investigate the possibilities of electricity generation with wind, solar, and hybrid (solar-wind) energy system by using the high solar energy potential of Van Province. In the study to meet the electricity needs of a duplex house in Akdamar Island, wind energy system, solar energy system and hybrid energy system (solar-wind) were modeled independently from the grid. Simulations were performed using HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) software. The designed systems were analyzed economically and ecologically and the systems that give suitable results in terms of the net present cost (NPC), the levelized cost of energy (COE), the residual electricity amount and the payback period were investigated. The COE values of wind energy systems varied between 0.1681-0.4457, the COE values of solar energy systems varied between 0.1356-0.3987, and the COE values of hybrid (wind-solar) energy systems varied between 0.0804-0.2108. The hybrid (wind-solar) energy system with a wind turbine power of 11 kW, PV panel power of 8 kW, battery number of 3, and converter power of 2.94 kW was determined as the most suitable system because it has the lowest unit energy cost (0.0804 \$/kWh).

Keywords: HOMER, Hybrid system, Off-grid, Solar energy, Van, Wind energy

[†] Bu çalışma, Yunus DURSUN'un "Hibrit (Güneş + Rüzgâr) Enerji Sisteminden Elektrik Üretimi - Van Örneği" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Gönderilme Tarihi: 20.02.2025

Kabul Tarihi: 30.04.2025

Nasıl atıf yapılır: Dursun, Y., & Yılmaz, M. (2025). Van ili için şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin tasarımı ve karşılaştırmalı analizi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(2), 771-797. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1643656>

1. Giriş

Hibrit enerji sistemleri, maliyetleri azaltmak ve bağımsız alternatiflere kıyasla kapasiteyi, değeri, verimliliği veya çevresel performansı iyileştirmek için çeşitli enerji üretimi, depolama ve/veya dönüştürme teknolojilerini fiziksel veya kavramsal olarak birleştiren sistemlerdir. Entegre hibrit enerji sistemlerinin geliştirilmiş esnekliği, şebekeye daha fazla yenilenebilir enerjinin entegre edilmesini hızlandırabilir ve sıfır karbonlu enerji şebekeleri hedefine yaklaştırmaya yardımcı olabilir (Nazari-Heris ve ark., 2023).

Rüzgâr/güneş hibrit sistemi, iki tip güç üretim ekipmanı, yani rüzgâr türbini ve güneş paneli dizisi tarafından elektriğin eş zamanlı üretilmesini ifade eden, elektrik üretme ve tedarik etmeye yönelik bir uygulama sistemidir. Sistem rüzgâr türbinleri, güneş panelleri, akıllı MPPT kontrolörleri (entegre veya bölünmüş), pil paketleri (lityum veya jel piller), çok işlevli eviriciler, kablolar, güneş paneli montajları, yardımcı aksesuarlar vb. içerir. Bu sistemler tarafından üretilen fazla enerji elektrik şebekesine verilebilir ve kârla satılabilir.

Hibrit enerji sistemlerinin kullanımının fizibilite çalışması son yıllarda dünya çapında önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmalarda hibrit enerji sistemlerinin kapsamlı araştırması yapılmış, belirli saha koşullarına göre uyarlanmış rüzgâr enerji sistemleri, güneş enerji sistemleri ve diğer tamamlayıcı sistemlerin çeşitli kombinasyonları analiz edilmiştir. Kolhe ve ark. (2013) Sri Lanka'da kırsal bir bölge için HOMER pro yazılımını kullanarak farklı hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik analizini yapmışlardır. 20 kW güneş paneli (PV), 40 kW rüzgar türbini (RT), 20 kW dizel jeneratör seti (DJ) ve 40 akü bankasına sahip PV/RT/DJ/akü konfigürasyonunun en ekonomik konfigürasyon olduğu ve bu sistemin birim enerji maliyetinin 0.36 \$/kWh olduğu belirlenmiştir. Enerji fiyatının Sri Lanka'daki şebeke fiyatından daha pahalı olmasına rağmen çalışma alanında kamu şebekesinin olmaması nedeniyle hibrit sistemin kırsal yaşam tarzını iyileştireceği ve sera gazı emisyonlarını azaltacağı vurgulanmıştır. Tawfik ve ark. (2018) PV, RT, DJ ve bataryalardan oluşan şebekeden bağımsız hibrit sistemleri modellemek için genetik algoritmaya (GA) dayalı iHOGA yazılımını kullandılar. Mısır'ın Noubarya kentindeki bir çiftliğe kurulan bir tuzdan arındırma ünitesi için gereken enerjiyi karşılamak üzere çeşitli olası konfigürasyonların performansını araştırdılar. Optimizasyon sonunda birim enerji maliyeti (COE) 0.17 \$/kWh ve karşılanmayan yük (enerji açığı) toplam ihtiyaç duyulan enerjinin %1.3'ü, yenilenebilir enerji payı yaklaşık %75 olarak belirlenmiştir. Jenkins ve ark. (2019) tarafından HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) yazılımı kullanılarak Libya Al-Marj Üniversitesi'ndeki (MARJU) bir bina için hibrit (RT-PV) güç sistemi tasarlandı. Simülasyon yapılarak on adet 100 kW'lık rüzgâr türbini ve 150 kW'lık güneş PV kurulumu değerlendirildi. Geri ödeme süresi 2.6 yıl olan bu tasarım, en uygulanabilir ekonomik tasarım olarak belirlendi. Abidin & Mérida (2019) tarafından yenilenebilir enerji sistemlerine dayalı olarak beş farklı küresel lokasyon için (Squamish, Kanada; Los Angeles ve Golden, ABD; ve Brisbane ve Adelaide, Avustralya) minimum enerji maliyetini belirlemek amacıyla HOMER Pro yazılımı kullanılarak bir çalışma yapılmıştır. PV, RT ve bunların kombinasyonlarına dayalı olarak, pil bankaları ve hidrojen teknolojileri de dâhil olmak üzere dokuz farklı yenilenebilir enerji sistemi incelenmiştir. PV, RT, bir pil bankası, bir elektrolizör ve bir hidrojen tankından oluşan sistemin COE'sinin Golden, Colorado, ABD'de 0.50 \$/kWh olduğu belirlenmiştir. Hidrojenin uzun vadeli enerji tasarrufu için akülerden daha ekonomik olduğu, ancak akü bankası aynı yerde kullanılmazsa, hidrojen teknolojisinin yüksek maliyeti nedeniyle minimum COE'nin 0.78 \$/kWh'ye yükseldiği bulunmuştur. Nassar ve ark. (2021) hibrit PV-RT yenilenebilir enerji sisteminin dinamik analizini ve boyutlandırma optimizasyon çalışmasını gerçekleştirdiler. Entegre sistemin yıllık yük enerjisi talebinin yaklaşık %15'ini karşılayarak önemli ölçüde katkıda bulunabileceğini buldular. Araştırma, PV ve RT gibi hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin, özellikle uygun topografik koşullar ve yenilenebilir enerji üretimi için yüksek potansiyel ile karakterize edilen kentsel alanlarda sürdürülebilir enerji arzını sağlamak için rekabetçi ve güvenilir bir alternatif olduğunu vurgulamaktadır. Zhang ve ark. (2022) tarafından İran'ın Ardabil kentindeki bir sanayi bölgesinde orta büyüklükteki bir atölyenin ihtiyaç duyduğu elektrik gücünü karşılamak için rüzgâr türbini ve fotovoltaiik sistemli hibrit yenilenebilir enerji kaynağının optimum konfigürasyonu HOMER yazılımı kullanılarak araştırılmıştır. En iyi PV dizisi, rüzgâr türbini, jeneratör, dönüştürücü ve batarya konfigürasyonu belirlenmiş ve bu konfigürasyonun birim enerji maliyetinin 0.462 \$/kWh olduğu bulunmuştur. Muller ve ark. (2023) rüzgâr ve güneş enerjisi konfigürasyonlarını ve bunların çıktılarını HOMER yazılımı ile analiz ederek fizibilite ve maliyet değerlendirmesi yapmıştır. Manipal,

Hindistan'daki bir akademik kampüs için 3007 PV dizisi, iki adet 1.5 MW rüzgâr türbini ve 1927 kW dönüştürücüden oluşan bir sistemin en uygun olduğu tespit edilmiştir. Hibrit yenilenebilir enerji sisteminin bir akademik kampüste kurulmasının uygulanabilir olduğu, maliyetinin mevcut sistemden %40.8 daha düşük olduğu, sistemin geri ödeme süresinin 10.11 yıl olduğu belirlenmiştir. [Patil ve ark. \(2023\)](#) tarafından HOMER yazılımı kullanılarak yapılan hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin performans analizi, farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji karışımına entegrasyonunun pratikliği ve potansiyeli hakkında faydalı bilgiler sunmaktadır. [Nazari-Heris ve ark. \(2023\)](#) ekonomik, çevresel ve teknik bakış açılarına odaklanarak binalardaki hibrit enerji sistemlerinin tasarımı ve uygulamalarına ilişkin güncellenmiş bir literatür taraması yapmıştır. Çalışmada, binalar için hibrit enerji sistemlerine yönelik mevcut ve gelecekteki eğilimler ve elektrik enerjisi ağlarındaki işlevler gelecek için potansiyel araştırma çalışma konuları olarak analiz edilmiştir. [Ariaei ve ark. \(2024\)](#) önemli güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olan İran'ın Zahedan kasabası için tek kaynaklı ve hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin performansını araştırmıştır. TRNSYS yazılımı kullanılarak, iki tek kaynaklı (PV ve RT) ve PV'ler, RT'ler, alkali yakıt hücreleri ve dizel jeneratörlerinin kombinasyonlarını içeren altı hibrit sistemden oluşan sekiz konfigürasyon simüle ve analiz edilmiştir. Analiz, özellikle PV ve RT'yi birleştiren hibrit sistemlerin, tek kaynaklı sistemlerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. [Ahmed ve ark. \(2024\)](#), Bangladeş'teki üçüncü bir ada için güvenilir ve uygun maliyetli elektrik, tatlı su ve pişirme gazı sağlamak amacıyla NSGA-II kullanarak PV, RT, DJ, batarya ve yakıt hücresi konfigürasyonlarını optimize etmişlerdir. [Roy ve ark. \(2024\)](#), Hindistan'daki Henry Adası için en uygun entegre bir PV/RT/Biyogaz Jeneratörü/Batarya/Dönüştürücü konfigürasyonunu araştırdılar. En uygun konfigürasyon için COE değeri 0.4224 \$/kWh olarak belirlendi.

Ülkemizde de şebekeden bağımsız ve şebekeye bağımlı hibrit enerji sistemleri önemli bir araştırma konusu olmuştur ve konuya ilgi gittikçe artmaktadır. Bu çalışmalarda hibrit enerji sistemlerinin kapsamlı araştırması yapılmış, farklı iller için belirli saha koşullarına göre uyarlanmış rüzgâr enerji sistemleri, güneş enerji sistemleri ve diğer tamamlayıcı sistemlerin çeşitli kombinasyonları analiz edilmiştir. [Köse \(2010\)](#) Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Merkez Kampus alanı için şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı hibrit enerji (güneş/rüzgâr) sistemleri ile elektrik üretim imkânlarını araştırmıştır. [Baran \(2012\)](#) Malatya için güneş/rüzgâr hibrit sistemi tasarlamak amacıyla bir optimizasyon yapmıştır. Optimizasyon için Malatya Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınan saatlik güneş ve rüzgâr verileri kullanılmıştır. [Dursun ve ark. \(2013\)](#) Edirne'de güneş/rüzgâr hibrit sistemlerinden elektrik elde etme olasılığını araştırdı. Bağımsız bir dizel sisteminin işletilmesinin yüksek maliyetini düşürmeye ve önemli miktarda yakıt tasarrufu elde etmeye çalıştı. [Sharifishourabi ve ark. \(2016\)](#) tarafından İstanbul'da bulunan tipik bir konut için 22 kWh/gün elektrik yükü ve 11.26 kWh/gün ısı yükünü karşılayabilen güneş panelleri, bir rüzgâr türbini, dizel jeneratör, batarya, dönüştürücü ve kazan içeren bir hibrit enerji sistemi önerilmiştir. Hibrit enerji sisteminin enerji üretimi enerji ve ekonomik yönlerden analiz edilmiştir. [Korkmaz \(2016\)](#) yaptığı yüksek lisans tezinde İnönü Üniversitesinin enerji gereksinimini yenilenebilir enerji (güneş, rüzgar, hibrit güneş/rüzgar) sistemleri ile karşılamak amacıyla HOMER yazılımını kullanarak simülasyon çalışmaları yapmıştır. Simülasyonlarda sistem kapasitesi olarak İnönü Üniversitesi yerleşkesinin elektrik yükünün %10'una karşılık gelen 2,966 kWh/gün değeri kullanılmıştır. [Arıkan & Çam \(2017\)](#) Batı Karadeniz bölgesinde yer alan Bartın ilinin küçük bir ilçesi olan Amasra için rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin potansiyel, enerji üretimi ve ekonomik analizlerini web tabanında bir yazılım hazırlayarak yapmıştır. [Jafarzadeh \(2017\)](#) yaptığı yüksek lisans tezinde İTÜ Ayazağa kampüsünde kurulabilecek bir rüzgâr/güneş hibrit enerji santralinin optimizasyonunu yapmış ve yıl içinde bu santraldan elde edilebilecek elektrik enerjisini hesaplamıştır. [Aktar \(2017\)](#) hibrit (güneş/rüzgâr) enerji sisteminin evsel ihtiyacı karşılaması konusunda bir yüksek lisans tez çalışması yapmıştır. [Bozok \(2017\)](#) Düzce ilinde tipik bir konutun elektriksel enerji ihtiyacını karşılayabilecek şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hibrit (güneş/rüzgâr) enerji sistemlerini modellemiştir. Modelde rüzgâr hızı ve ısıtım seviyesi gibi meteorolojik veriler kullanılarak incelenen sistemlerin ekonomik performansı belirlenmiştir. [Mamur ve ark. \(2019\)](#) tarafından Kozlu Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nin elektrik gereksiniminin hibrit güneş/rüzgâr sistemleri ile karşılanması amacıyla bir fizibilite çalışması yapılmıştır. [Akan \(2021\)](#) Tekirdağ ili Süleyman Paşa ilçesindeki güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeline dayalı olarak tasarlanan şebekeden bağımsız bir hibrit sistemin teknik ve ekonomik analizini HOMER Pro yazılımı kullanarak yapmıştır. [Kırbaş & Kocakulak \(2021\)](#) tarafından hibrit (güneş/rüzgâr) sistemlerin Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu kampüsüne kurulması tasarlanmıştır. Tasarım

için Homer Pro simülasyon programı kullanılmıştır. Kampüsün aylık enerji tüketim değerleri kullanılarak farklı güçler için (60 kW, 80 kW, 100 kW) sadece güneş, sadece rüzgâr ve farklı kombinasyonlarda hibrit santrallerin kurulması durumunda enerji verimliliği incelenmiştir. Aydın & Karabey (2023) tarafından Dünya’da ve Türkiye’de bulunan hibrit enerji sistemleri incelenmiştir. Enerji verimliliğinde hibrit güneş/rüzgâr enerji sistemlerinde %11-%18, hibrit güneş-hidrolik enerji sistemlerinde %14-%58 iyileşme olduğu belirlenmiştir. Hibrit sistemlerde enerji verimliliğindeki iyileşmeler sonucunda ülkemizdeki enerji santralleri için farklı hibrit modellerin tasarlanabileceği belirtilmiştir. Erdal ve ark. (2024) İzmir’deki Havza Atık Su Arıtma Tesisi için RT/PV/DJ/batarya içeren hibrit mikro şebeke tasarlamışlardır. Toplam enerji talebi, tasarlanan mikro şebeke tarafından karşılanmış, fazla güç üretilmiştir. Bu gücün şebekeye satılabileceği, tarımsal sulamada kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Bazılarına yukarıda değinilen çalışmalar olmak üzere ülkemizde hibrit güneş/rüzgâr enerji sistemlerine ilişkin çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Ancak Van ilinde yenilenebilir enerjinin kullanılmasına ilişkin araştırmalar sınırlı sayıdadır. Yayla ve ark. (2010a) Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs alanındaki rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi amacıyla kampüs alanına bir adet rüzgâr ölçüm direği kurmuşlardır. Direkt üzerine 30 m yüksekliğe bir anemometre ve rüzgâr yön sensörü takarak bir yıl boyunca (Nisan 2004-Mart 2005) rüzgâr hız ve yön değerlerini ölçerek bölgenin rüzgâr potansiyelini belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs alanındaki rüzgâr hızı ve ilgili parametrelerin ortalamasının Türkiye ortalamasının üzerinde olduğu belirlenmiştir. Rüstemli & Dinçer (2011) Van ilinin yüksek güneş enerjisi potansiyelini dikkate alarak ildeki güneş enerjisi uygulamalarını değerlendirmiş ve güneş enerjisinin kullanımının yaygınlaştırılması için çeşitli öneriler sunmuştur. Yumak ve ark. (2012) Van Gölü’nün kuzeydoğu kıyısının Mamedik rüzgâr koridorunda bulunan rüzgâr potansiyelini bir rüzgâr ölçüm direği kurup rüzgâr hızı sensörlerini yerden 10 m ve 30 m yüksekliğe (AGL) ve 30 m yüksekliğe bir rüzgâr gülü yerleştirerek ölçmüşlerdir. Rüzgâr ve meteorolojik parametreler Mart 2004-Temmuz 2007 arasında 28 aylık bir süre boyunca ölçülmüştür. Ölçülen veriler WAsP yazılımı ile analiz edilerek söz konusu saha için rüzgâr gücü potansiyeli belirlenmiştir. Van Gölü kıyısının rüzgâr enerjisi potansiyelini belirlemek için ölçülen rüzgâr hızlarının Türkiye genelinde tahmin edilen rüzgâr hızlarının ortalamasından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Yeler ve ark. (2016) Van ilinde bulunan seraların ısıtılmasında kullanılabilecek doğal enerji kaynakları arasında olan güneş enerjisi, jeotermal enerji ve biyokütle (biyogaz) enerji kaynaklarının bölgedeki potansiyeli, sera ısıtma sistemlerinde kullanılma olanakları ile ilgili bilgiler vermiş ve karşılaşılabilecek olası sorunları incelemiştir. Yaman ve ark. (2019) tarafından Van ilinin güneş ve hidroelektrik enerji potansiyelleri araştırılmış ve bu enerji potansiyellerinin ilin ekonomisine katkıları incelenmiştir. Van ilinin, güneş enerjisi bakımından Türkiye geneline göre oldukça avantajlı bir konumda olduğu, toplam güneş ışınlamı değerlerine göre üçüncü il, güneşlenme sürelerine göre ise ikinci il durumunda olduğu belirtilmiştir. Yayla & Harmancı (2019) Van ilinin belirli ilçeleri için hesaplanan rüzgâr potansiyellerini karşılaştırmıştır. Yalılı (2021) tarafından lisanslı ve şebekeye bağlı 1 MW gücündeki fotovoltaik GES yatırımının ekonomik analizi yapılarak yatırımın karlılığı araştırılmıştır. Van ili Edremit ilçesinin GES kurulumuna uygun olup olmadığı incelenerek arazi seçimi yapılmıştır. Van ilinde gerçekleştirilecek 1 MW GES yatırımının öz sermaye ile yapılması durumunda uygun olabileceği, ilk yatırım maliyetlerinin tümüyle kredi ile karşılanması durumunda ise yatırımın uygun olmayacağı belirlenmiştir. Matpay (2024) tarafından yapılan çalışmada GES panellerinin yer seçiminde birçok faktörün etkili olduğu ve bu faktörlerin coğrafi bilgi sistemleri yazılımlarına entegre edilerek santralin kurulabileceği yerlerin belirlenebileceği vurgulanmıştır. Van ili için coğrafi bilgi sistemlerinden faydalanılarak çok kriterli karar alma analizi (ÇKKA) yöntemlerinden analitik hiyerarşi süreci (AHY) kullanılarak altı sınıftan oluşan uygunluk haritaları üretilmiş ve on faktör (güneş ışınlamı, yükselti, göl, eğim, bakı, yol, akarsu, enerji hatları, fay hatları, yerleşim yerleri) kullanılarak GES uygunluk haritası hazırlanmıştır.

Van ilinde hibrit (güneş/rüzgâr) enerji sistemlerinden elektrik üretimi konusunda daha önce herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmanın temel amacı, Van ilinin yüksek güneş enerjisi potansiyelini kullanarak rüzgâr, güneş ve hibrit (güneş/rüzgâr) enerji sistemi ile elektrik üretim olanaklarını araştırmaktır. Van ili için şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin tasarımı gerçekleştirilerek ekonomik ve ekolojik analizler yapılmıştır. HOMER yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda toplam net bugünkü maliyet (NPC), birim enerji maliyeti

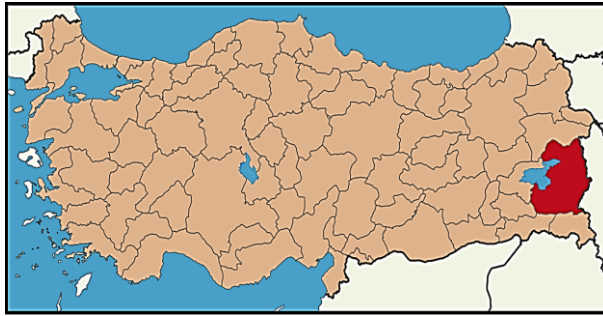
(COE), fazla elektrik miktarı, geri ödeme süresi bakımından uygun sonuçları veren sistemler araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Van ili ve Akdamar Adası

Doğu Anadolu Bölgesi'nin illerinden biri olan Van, 42 derece 40 dakika ve 44 derece 30 dakika Doğu boylamları ile 37 derece 43 dakika ve 39 derece 26 dakika Kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. Van ilinin 2024 yılında nüfusu 1,118,087 olarak tespit edilmiştir (TÜİK, 2025). Van, 19,069 km² yüzölçümü ile Türkiye'nin %2.5'ünü kaplar ve bu özelliğiyle Türkiye'nin 6. en geniş ilidir (Şekil 1a). Doğu Anadolu Bölgesi'nin volkanik dağlarla çevrili çöküntü bölgesinde yer alan Van Gölü'nün doğu kıyısına 5 km mesafede, az eğimli bir arazide kuruludur. Rakımı yaklaşık 1,725 metredir. Türkiye'nin en büyük gölü olan Van Gölü, yüksek dağların ortasında bir çöküntü alanında bulunur ve çevredeki yüksek dağlar Van ilinin sınırlarını çizer. Van, kuzeyde Ağrı ilinin Doğubayazıt, Diyadin ve Hamur ilçeleri; batıda Van Gölü ile Ağrı ilinin Patnos ilçesi, Bitlis'in Adilcevaz, Tatvan ve Hizan ilçeleri; güneyde Siirt'in Pervari, Hakkâri ilinin Beytüşşebap ve Yüksekova ilçeleri ile komşudur. Doğuda ise İran yer almaktadır (KTB, 2025).

Van ili 1,118,087 kişilik nüfusu ile Doğu Anadolu Bölgesinin en büyük ili, yüzölçümü bakımından en büyük ikinci ilidir. Kalkınma Bakanlığı tarafından hazırlanan Bölgesel Gelişme Ulusal Stratejisi'nde "Bölgesel Çekim Merkezi" olarak tanımlanan Van ili çevresindeki merkezleri ekonomik olarak etkileme potansiyeline sahiptir. Ayrıca, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yürütülen Cazibe Merkezlerini Destekleme Programı kapsamında 14 Cazibe Merkezi ilden birisi olarak belirlenmiştir (DAKA, 2023).



(a) Van ili



(b) Akdamar Adası

Şekil 1. Van ili ve Akdamar Adası.

Akdamar Adası, Van Gölü'nün içinde yer alan dört ana adadan ikinci en büyük adadır (Şekil 1b). Van'ın Gevaş ilçesi sınırları içerisinde yer alan ada, 10. yüzyıldan kalma Ermeni Kutsal Haç Katedrali'ne ev sahipliği yapmaktadır ve 1116'dan 1895'e kadar Ahtamar Ermeni Apostolik Katolikosluğu'nun merkezi olmuştur. Yüzölçümü yaklaşık 163,753 metrekare olan ada, kıyı şeridinden yaklaşık 3 km uzaklıktadır. En yüksek noktası deniz seviyesinden 1912 metre yüksekte bulunan adanın batı uçlarında yüksekliği 80 metreye ulaşan dik kayalıklar vardır (Anonim, 2025).

2.2. Van ili güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli

Şekil 2'de Van iline ait güneş enerjisi potansiyeli atlası gösterilmiştir. Van ilinin yıllık ortalama güneşlenme süresi 3 068 saat ve toplam güneş ışıınımı değeri 1 635 kWh/m²'dir. Bu değerler Türkiye ortalamasının çok üstündedir, bu da güneş enerjisi üretimi için uygun koşullar sunar. Bu bağlamda toplam güneş ışıınım değerleri ve güneşlenme süresi açısından Van ili en verimli illerden biridir ve eski ismi Tuşba (Güneş Şehri) olan Van'da GES kurulumu için yeterli alan mevcuttur. Van-Gevaş arası, Akdamar Adası ve farklı lokasyonlarda GES bulunmaktadır (Rüstemli & Dinçer, 2011; Yaman ve ark., 2019; DAKA, 2019; Matpay, 2024). Öte yandan 6094 Sayılı Kanun ile izin verilen 600 MW'lık Lisanslı GES (Güneş Enerjisi Santrali) kotası 28 ile tahsis edilmiş ve iller arasında verilen en yüksek (77 MW)

ikinci kota Van İline verilmiştir. Van’da 4000 ha alana sahip Van Güneş Enerjisi İhtisas Endüstri Bölgesi Projesi’nin başlanması için çalışmalar devam etmektedir (DAKA, 2023).

Şekil 3’de Van ili için yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı gösterilmiştir. Yayla ve ark. (2010b) tarafından yapılan çalışmada Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs alanındaki rüzgâr hızı ve ilgili parametrelerin ortalamasının Türkiye ortalamasının üzerinde olduğu belirlenmiştir. Van ili için rüzgâr enerji santrali teorik potansiyelinin 152 MW olduğu belirlenmiştir. Hâlihazırda Gevaş ilçesinde 50 MW kapasitede işletmede olan “Bağlama RES” rüzgâr enerji santrali bulunmaktadır. Çatak ilçesinde 30 MW kapasitede “R3 Van 2 RES” santrali ön lisans almıştır (REPA, 2025). Doğu Anadolu Bölgesi’nin rüzgâr enerjisi potansiyeli düşük olarak görülse de Van ili diğer Doğu illerine nazaran RES Santrali yatırımları ve rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından ilk sıralardadır.

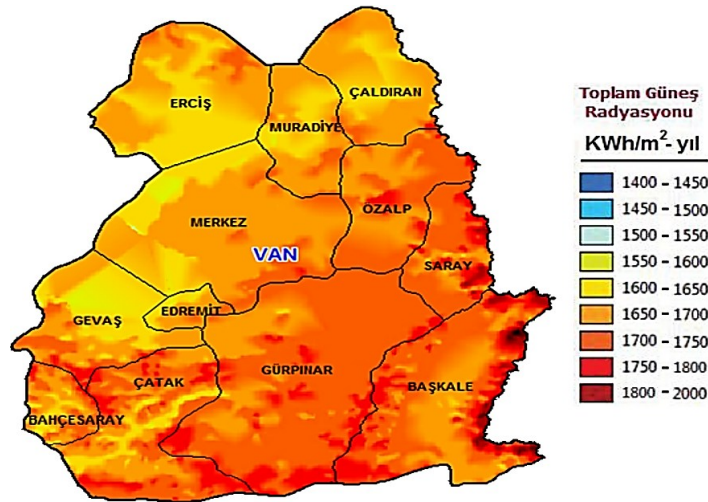
Van ili, teknik, coğrafi ve iklimsel faktörlerin etkisiyle, elektrik enerjisi üretim verimliliği açısından Türkiye’de üst sıralarda yer almaktadır (Aydıncıoğlu, 2019; Yaman ve ark., 2019; DAKA, 2019; DAKA, 2023). Buna örnek olarak son yıllarda Van Gevaş ilçesinde yapılan rüzgâr türbinleri ve güneş enerjisi panelleri yatırımları örnek olarak gösterilebilir. Tüm bu veriler, Van’ın hem güneş hem de rüzgâr enerjisinden faydalanarak hibrit enerji sistemleri için uygun bir bölge olduğunu ortaya koymaktadır.

2.3. Ortalama bir evin elektrik tüketimi

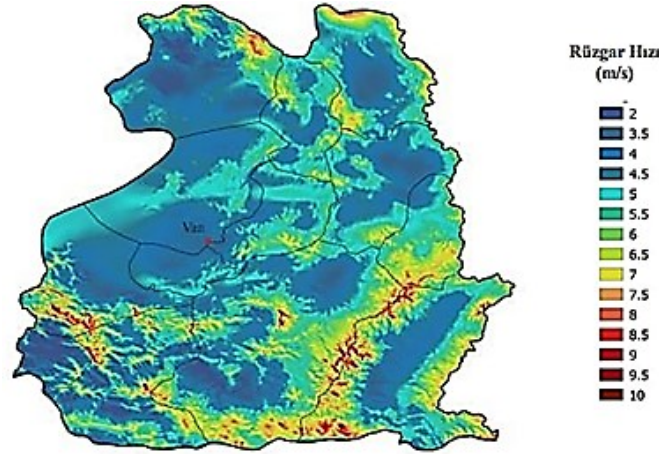
Bir evdeki elektrik tüketimi, evin büyüklüğü, cihazların kullanımı, iklim ve hava koşulları, enerji tasarrufu önlemleri ve benzeri faktörlere bağlıdır. Genel olarak, daha büyük evler, daha fazla enerji tüketir; ancak bir evin günlük elektrik tüketimini belirleyen diğer faktörler arasında, evdeki cihazların sayısı, kullanım sıklığı ve enerji verimliliği de yer alır. Evde kullanılan cihazların her birinin günlük elektrik tüketimi cihazın marka, model, boyut, kullanım sıklığı, enerji verimliliği ve kullanılan enerji kaynağı gibi birçok faktöre bağlıdır. Bununla birlikte, günlük elektrik tüketimleri tahmini olarak Çizelge 1’de olduğu gibi verilebilir. Görüldüğü gibi toplam günlük tüketimi 12.23 kWh ila 32.70 kWh arasında değişmektedir (Anonim, 2024).

Ortalama bir evin enerji ihtiyacı aşağıda verilmiştir:

- Küçük bir dubleks ev (100-150 m²): Günde 10-15 kWh arasında.
- Orta boyutlu bir dubleks ev (150-250 m²): Günde 15-25 kWh arasında.
- Büyük bir dubleks ev (250 m² ve üzeri): Günde 25-40 kWh arasında.



Şekil 2. Van ili güneş enerjisi potansiyeli atlası (GEPA, 2024).



Şekil 3. Van ili için yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı – 100 Metre (REPA, 2025).

Çizelge 1. Evlerde kullanılan cihazların tahmini günlük elektrik tüketimleri (Anonim, 2024)

No	Cihaz Adı	Elektrik Tüketimi	Elektrik Tüketimi
		(kWh) Minimum	(kWh) Maksimum
1	Buzdolabı	1.00	2.00
2	Çamaşır makinesi	1.00	2.00
3	Bulaşık makinesi	1.00	2.00
4	Televizyon	0.10	0.50
5	Ocak	0.50	2.00
6	Fırın	0.50	2.00
7	Mikrodalga fırın	0.10	0.50
8	Kombi	2.00	5.00
9	Dizüstü bilgisayar	0.03	0.20
10	Masaüstü bilgisayar	0.10	0.50
11	Davumbaz veya aspiratör	0.10	0.20
12	Klima	1.00	3.00
13	Çamaşır makinesi	1.00	2.00
14	Kurutma makinesi	2.00	4.00
15	Elektrikli süpürge	0.20	0.50
16	Ütü	0.50	1.50
17	Saç kurutma makinesi	0.10	0.50
18	Tost makinesi	0.10	0.30
19	Su ısıtıcı	0.50	2.00
20	Blender	0.10	0.50
21	Mutfak robotu	0.10	0.50
22	Çay makinesi	0.10	0.50
23	Kahve makinesi	0.10	0.50
	Toplam	12.23	32.70

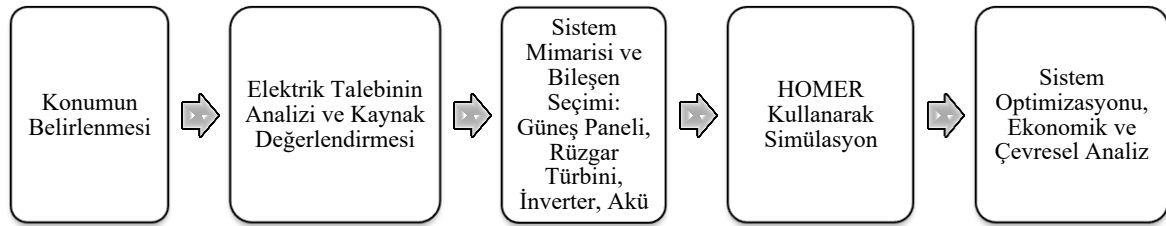
2.4. HOMER ile tasarım ve modelleme

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik üretiminin tasarlanması ve simülasyonlarının yapılmasında çeşitli yazılım programları kullanılmaktadır. Bu yazılımların bazıları GES'lerin tasarımında, bazıları RES'lerin tasarımında kullanılırken hem GES hem de RES tasarımını birlikte yapan yazılımlar da bulunmaktadır. Helioscope, HOMER, PVGIS, PVSOL, PVSyst, Polysun, RetScreen, WAsP, WindFarmer, Windographer, WindPro ve WindSim bu yazılımlar arasındadır. Hibrit sistemlerin tasarımı için HOMER yazılımı sıklıkla kullanılmaktadır (Yılmaz ve ark., 2010; Korkmaz, 2016; Türkdoğan ve ark., 2018 ve 2020; Kırbaş & Kocakulak, 2021; Akan, 2021; Patil ve ark., 2023). Bu çalışmada da HOMER yazılımı kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

HOMER, enerji optimize modeli olarak kurgulanmış ve geniş bir uygulama alanında enerji üretimini değerlendirmek için kullanılan bir bilgisayar yazılımıdır. Bu yazılım, Birleşik Devletler Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından geliştirilmiştir. HOMER, güç sistemlerinin fiziksel özelliklerini modelleyerek, bu sistemlerin çalışma süresindeki maliyet analizlerini gerçekleştirir. Bu

modelleme, sistemin kurulum ve işletme maliyetlerini kapsamaktadır; maliyet analizi ise yatırım maliyeti, toplam net maliyet, birim enerji maliyeti ve işletme giderlerini içerir. HOMER, kullanıcılara teknik ve ekonomik faktörlere göre çeşitli tasarım alternatifleri sunar; veri belirsizliklerini ve değişkenlerini sayısal olarak analiz etmelerine yardımcı olur. Hem şebekeye bağlı hem de bağımsız hibrit ya da tekil enerji sistemlerini modelleyebilen HOMER, dört tür yükü destekler: elektrik yükü, ertelenebilir yük, ısı yük ve hidrojen yükü. HOMER, simülasyon, optimizasyon ve hassasiyet analizini sırasıyla uygular (HOMER, 2025).

HOMER yazılımıyla yürütülen simülasyon çalışmasını gösteren bir akış diyagramı Şekil 4'de sunulmuştur. Önce konum belirlenmektedir. Elektrik talebi analiz edilip yük belirlendikten sonra kaynak değerlendirmesi yapılmaktadır. Sistem mimarisi ve bileşen seçimi aşamasında güneş paneli, rüzgâr türbini, dönüştürücü, akü vb. bileşenlerin tipi ve kapasitesi belirlenmektedir. HOMER yazılımı kullanarak simülasyon gerçekleştirildikten sonra sistem optimizasyonu, ekonomik ve çevresel analiz yapılmaktadır.



Şekil 4. Simülasyon çalışmasının akış diyagramı (Muller ve ark., 2023).

2.4.1. Konumun seçilmesi ve elektrik talebinin belirlenmesi

Rüzgâr, güneş ve hibrit (güneş/rüzgâr) enerji sisteminin kurulacağı konum olarak Van İli Akdamar Adası seçilmiştir. HOMER ile simüle ve analiz edilecek olan bina olarak dubleks bir ev seçilmiştir. “2.3. Ortalama Bir Evin Elektrik Tüketimi” bölümünde verilen bilgiler göz önüne alınarak seçilen dubleks evin elektrik enerjisi tüketiminin 40 kWh/gün olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda seçilen dubleks evin yıllık enerji tüketimi yaklaşık 15,000 kWh olacaktır.

2.4.2. Rüzgâr kaynağı

Rüzgâr hızı verileri, NASA tarafından 1984-2013 yılları arasındaki 30 yıl boyunca elde edilen aylık ortalama rüzgâr hızı verilerine dayanmaktadır. Van ili Akdamar Adası için NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) veri tabanından elde edilen aylık ortalama rüzgâr hızı verileri Çizelge 2’de verilmiştir. Ortalama rüzgâr hızı 3.14 m/s ile 4.21 m/s arasında değişmektedir. Yıllık ortalama rüzgâr hızı değeri ise 3.50 m/s’dir.

Çizelge 2. Van ili Akdamar Adası için aylık ortalama güneş küresel yatay ışıyım ve rüzgâr hızı verileri (HOMER, 2025)

Ay	Açıklık İndeksi	Günlük Işıyım (kWh/m ² -gün)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
Ocak	0.509	2.30	3.28
Şubat	0.548	3.23	3.66
Mart	0.551	4.31	3.89
Nisan	0.532	5.18	4.21
Mayıs	0.557	6.16	3.84
Haziran	0.634	7.34	3.60
Temmuz	0.631	7.13	3.35
Ağustos	0.654	6.67	3.19
Eylül	0.643	5.44	3.27
Ekim	0.578	3.73	3.41
Kasım	0.521	2.51	3.16
Aralık	0.473	1.94	3.14

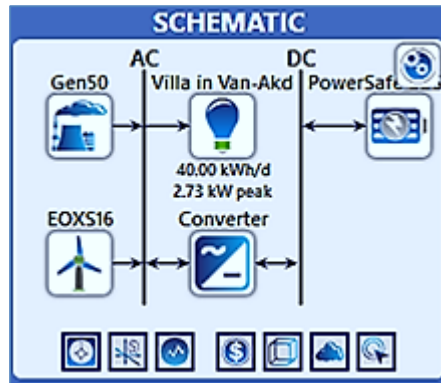
2.4.3. Güneş kaynağı

Işınım verileri, NASA tarafından 1983-2005 yılları arasındaki 22 yıl boyunca elde edilen aylık ortalama güneş küresel yatay ışınlam verilerine dayanmaktadır. Van ili Akdamar Adası için NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) veri tabanından elde edilen aylık ortalama güneş küresel yatay ışınlam verileri Çizelge 2’de verilmiştir. Ortalama güneş ışınlam değeri $1.94 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$ ile $7.34 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$ arasında değişmektedir. Yıllık ortalama günlük ışınlam değeri $4.66 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$ ’dür. Ortalama açıklık endeksi 0.569’dur.

2.4.4. Rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin konfigürasyonu

Akdamar Adası’nda dubleks bir evin elektrik ihtiyacının karşılanmasına yönelik bu çalışmada, rüzgâr enerjisi sistemi, güneş enerjisi sistemi ve hibrit enerji sistemi (rüzgâr/güneş) şebekeden bağımsız olarak simülasyonla modellenmiştir. Simülasyonda hibrit sisteme ek olarak bir dizel jeneratör de dâhil edilmiştir.

Şebekeden bağımsız (off-grid) rüzgâr enerji sistemi Şekil 5’te şematik olarak verilmiştir. Rüzgâr enerji sisteminde rüzgâr türbini olarak Eocycle EOX S-16 model rüzgâr türbini, jeneratör olarak Generic Small Genset jeneratör, dönüştürücü olarak System Converter, batarya olarak EnerSys PowerSafe SBS 1800 marka batarya seçilmiştir. Rüzgâr enerji sistemi için elektrik yükü 40 kWh/gün , maksimum yük miktarı ise 2.73 kW olarak seçilmiştir. Çizelge 3’de rüzgâr türbini teknik özellikleri, Çizelge 4’de dizel jeneratör teknik özellikleri, Çizelge 5’de dönüştürücü teknik özellikleri, Çizelge 6’da batarya teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 5. Şebekeden bağımsız rüzgâr enerjisi sistemi HOMER şematik görünümü.

Çizelge 3. Rüzgâr türbini teknik özellikleri (HOMER, 2025)

Parametre	Değeri
Adı	Eocycle EOX S-16 (EOXS16)
Nominal Kapasite	30 kW
Türbin Göbek Yüksekliği	23.80 m
Yaşam Süresi	30 yıl
Kaynak Yatırımı ve Yerleştirme Giderleri	25,000 \$
Üretici Firma	Eocycle

Çizelge 4. Dizel jeneratör teknik özellikleri (HOMER, 2025)

Parametre	Değeri
Adı	Generic Small Genset (Gen50)
Kapasite	10 kW
Minimum Yük Oranı	%25
Yaşam Süresi	15,000 saat
Kaynak Yatırımı ve Yerleştirme Giderleri	1,800 \$
Üretici Firma	Generic

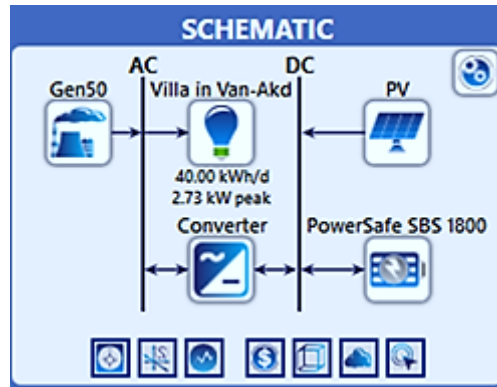
Çizelge 5. Dönüştürücü teknik özellikleri (HOMER, 2025)

Parametre	Değeri
Adı	System Converter
Kapasite	124 kWh
Yaşam Süresi	25 yıl
Verimlilik	%95
Kaynak Yatırımı ve Yerleştirme Giderleri	2,000 \$

Çizelge 6. Batarya teknik özellikleri (HOMER, 2025)

Parametre	Değeri
Adı	EnerSys PowerSafe SBS 1800
Nominal Voltaj	12 V
Nominal Kapasite	24.8 kWh
Maksimum Kapasite	2,060 Ah
Kapasite Oranı	0.298
Yaşam Süresi	15 yıl
Başlangıç Şarj Durumu	%100
Minimum Şarj Durumu	%30
Kaynak Yatırımı ve Yerleştirme Giderleri	2,700 \$

Şekil 6 şebekeden bağımsız (off-grid) güneş enerjisi sistemini göstermektedir. Güneş enerji sisteminde PV panel olarak Generic flat plate PV paneli, jeneratör olarak Generic Small Genset jeneratör, dönüştürücü olarak System Converter, batarya olarak EnerSys PowerSafe SBS 1800 marka batarya seçilmiştir. Güneş enerji sistemi için elektrik yükü 40 kWh/gün, maksimum yük miktarı ise 2.73 kW olarak seçilmiştir. Çizelge 7’de PV dizisi teknik özellikleri verilmiştir.

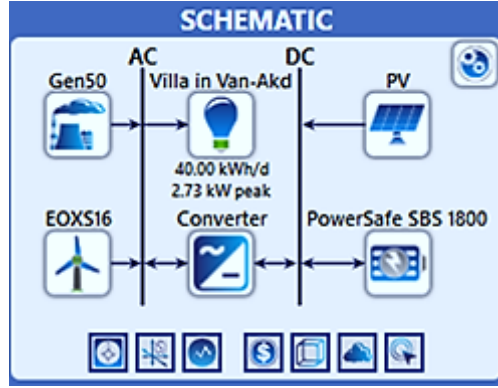


Şekil 6. Şebekeden bağımsız güneş enerjisi sistemi HOMER şematik görünümü.

Çizelge 7. PV dizisi teknik özellikleri (HOMER, 2025)

Parametre	Değeri
Adı	Generic flat plate PV
Panel Tipi	Düz plaka
Kapasite	1 kW
Yaşam Süresi	25 yıl
Kaynak Yatırımı ve Yerleştirme Giderleri	7,500 \$
Üretici Firma	Generic

Hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemine ait şematik resim Şekil 7’de gösterilmiştir. Şebekeden bağımsız hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemi; Eocycle EOX S-16 rüzgâr türbini, Generic flat plate PV dizisi, Generic Small Genset jeneratör, System Converter dönüştürücü ve EnerSys PowerSafe SBS 1800 bataryadan oluşmaktadır. Hibrit enerji sistemi için elektrik yükü 40 kWh/gün, maksimum yük miktarı ise 2.73 kW olarak seçilmiştir.



Şekil 7. Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemi HOMER şematik görünümü.

2.4.5. Ekonomik analiz

Enerji sistemlerinde ekonomik amaç fonksiyonunu oluşturmak için birim enerji maliyeti (COE), toplam net bugünkü maliyet (NPC), işletme maliyeti (OC) ve başlangıç maliyeti (IC) hesaplanmalıdır. En önemli endeks olan COE, birim enerji üretim maliyetidir ve şu şekilde hesaplanır (Aydın & Çoban, 2024):

$$COE \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{TYM(\$ / yıl)}{TYE(kWh / yıl)} \quad (1)$$

burada, TYM toplam yıllık maliyeti, TYE yıllık toplam enerji üretimini temsil etmektedir.

Toplam net bugünkü maliyet (NPC) şu şekilde hesaplanır:

$$NPC \left(\frac{\$}{yıl} \right) = \frac{TYM(\$ / yıl)}{CRF} \quad (2)$$

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

burada, CRF, sermaye geri kazanım faktörünü; i, faiz oranını (%); n, bileşenlerin ömrünü (yıl) göstermektedir.

3. Bulgular

Akdamar Adası'nda dubleks bir evin elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla rüzgar enerji sistemi, güneş enerji sistemi ve hibrit enerji sistemi (rüzgar/güneş) şebekeden bağımsız olarak simülasyonla modellenmiştir. İlk önce şebekeden bağımsız (off-grid) rüzgâr enerji sistemi (RT-1), şebekeden bağımsız (off-grid) güneş enerji sistemi (PV-1) ve şebekeden bağımsız (off-grid) hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemi (HT-1) modelleri yapılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu modeller “temel senaryolar” olarak adlandırılmıştır. Ardından farklı kapasitelerde rüzgâr türbini ve PV panelleri içeren simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bunlar ise “alternatif senaryolar” olarak adlandırılmıştır. Bu nedenle bulgular “Temel Senaryoların Analizi” ile “Alternatif Senaryoların Analizi” başlıkları altında kategorize edilerek sunulmuştur.

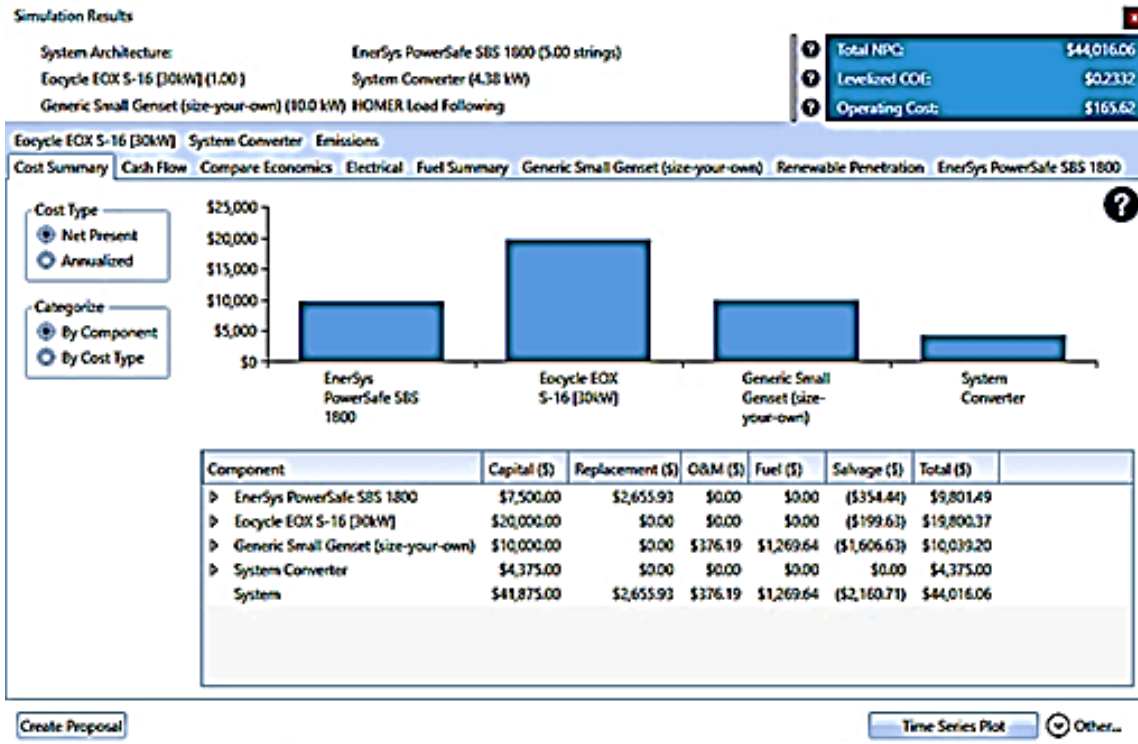
3.1. Temel senaryoların analizi

3.1.1. Şebekeden bağımsız (off-grid) rüzgâr enerji sisteminin (RT-1) analizi

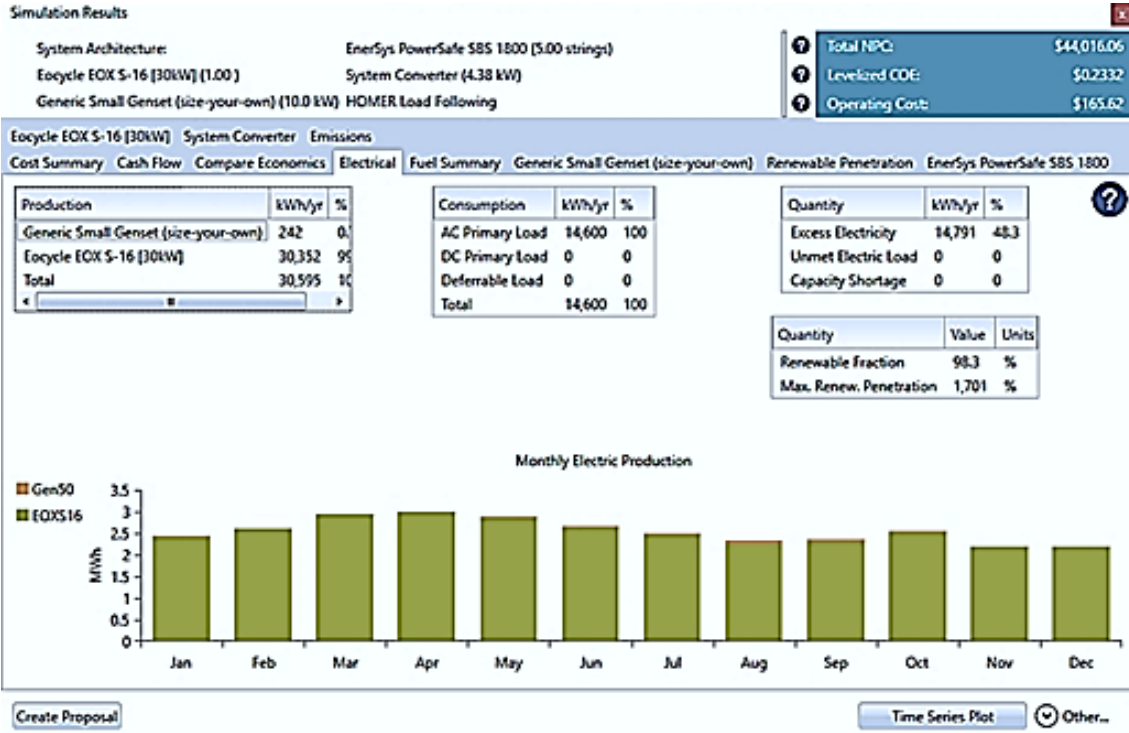
Şebekeden bağımsız rüzgâr enerji sistemi; Eocycle EOX S-16 rüzgâr türbini (30 kW), EnerSys PowerSafe SBS 1800 batarya (5 adet), Generic Small Genset jeneratör (10 kW) ve dönüştürücüden (4.38 kW) oluşmaktadır. Rüzgâr enerji sistemi için elektrik yükü 40 kWh/gün, maksimum yük miktarı ise 2.73 kW olarak belirlenmiştir. Rüzgâr enerji sistemine ait sistem düzeni bilgileri ve simülasyon sonucunda elde edilen maliyetler Çizelge 8’de verilmiştir. Şekil 8’de rüzgâr enerjisi sistem bileşenlerinin ve tüm sistemin maliyetini gösteren toplu ekran çıktısı sunulmuştur. Toplam net bugünkü maliyet ilk yatırım, değiştirme, işletme/bakım, yakıt ve hurda maliyetlerinin toplamından oluşmaktadır. Şekil 9 ve Şekil 10 ise sırasıyla aylık ortalama elektrik üretimini ve rüzgâr türbininin aylık ortalama rüzgâr hızını göstermektedir. Simülasyonu yapılan bu sistem incelendiğinde, toplam net bugünkü maliyetin (NPC) ve birim enerji maliyetinin (COE) sırasıyla 44,016.06 \$ ve 0.2332 \$/kWh olduğu görülmektedir (Çizelge 8). Şekil 9’un incelenmesi ideal sistemdeki fazla elektrik yükünün %48 olduğunu göstermektedir; başka bir deyişle üretilen elektriğin yaklaşık yarısı fazla olarak kalmaktadır. Sistem kendisine yapılan bu toplam maliyete %45.7’lik yatırım dönüşü olarak cevap vermekte ve kendisini 2.1 yılda amorti etmektedir (Çizelge 9).

Çizelge 8. Şebekeden bağımsız rüzgâr enerji sistemine ait sistem düzeni bilgileri ve maliyet analizi

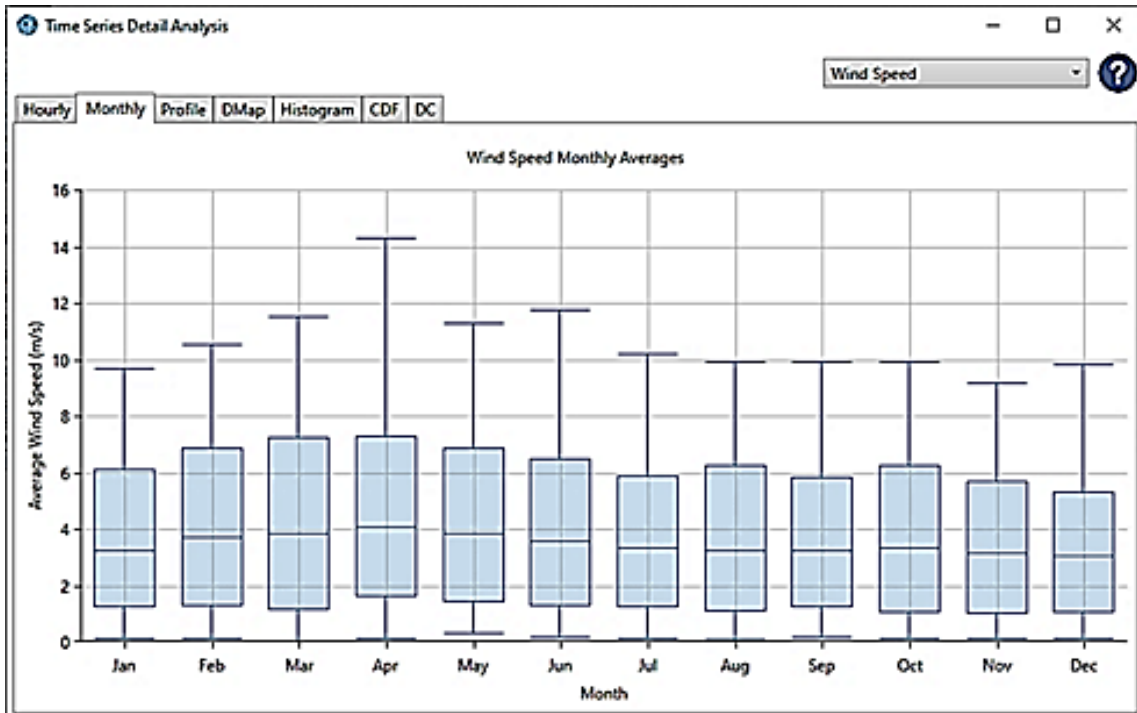
Sistem Düzeni	
Rüzgâr Türbini	30 kW
Dizel Jeneratör	10 kW
Batarya	5 adet
Dönüştürücü	4.38 kW
Maliyet	
Toplam Net Bugünkü Maliyet	44,016.06 \$
Birim Enerji Maliyeti	0.2332 \$/kWh
İşletme Maliyeti	165.62 \$



Şekil 8. Şebekeden bağımsız rüzgâr enerjisi sistem elemanları ve sistemin tümüne ait maliyet.



Şekil 9. Şebekeden bağımsız rüzgâr enerji sistemi aylık ortalama elektrik üretimi.



Şekil 10. Şebekeden bağımsız rüzgâr türbini aylık rüzgâr hızı ortalamaları.

Çizelge 9. Şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hibrit enerji sistemlerinin ekonomik açıdan çıktıları

Nicelik	Rüzgâr Enerji Sistemi	Güneş Enerji Sistemi	Hibrit Enerji Sistemi
Bugünkü maliyet (\$)	171,983 \$	104,514 \$	66,337 \$
Yıllık maliyet (\$/yıl)	13,304 \$	8,085 \$	5,131 \$
Yatırım geri ödemesi (%)	45.7	55.3	59.2
Dâhili getiri oranı (%)	46.4	59.4	63.1
Basit geri ödeme (yıl)	2.10	1.68	1.63
İskontolu geri ödeme (yıl)	2.39	1.82	1.82

3.1.2. Şebekeden bağımsız (off-grid) güneş enerji sisteminin (PV-1) analizi

Şebekeden bağımsız güneş enerji sistemi; Generic flat plate PV dizisi (13.5 kW), EnerSys PowerSafe SBS 1800 batarya (5 adet), Generic Small Genset jeneratör (10 kW) ve dönüştürücüden (2.96 kW) oluşmaktadır. Güneş enerji sistemi için elektrik yükü 40 kWh/gün, maksimum yük miktarı ise 2.73 kW olarak belirlenmiştir. Güneş enerji sistemine ait sistem düzeni bilgileri ve simülasyon sonucunda elde edilen maliyetler Çizelge 10'da verilmiştir. Şekil 11'de güneş enerjisi sistem bileşenlerinin ve tüm sistemin maliyetini gösteren toplu ekran çıktısı sunulmuştur. Toplam net bugünkü maliyet ilk yatırım, değiştirme, işletme/bakım, yakıt ve hurda maliyetlerinin toplamından oluşmaktadır. Şekil 12 ve Şekil 13'de sırasıyla aylık bazda elektrik üretimi ve PV panel güç çıkışı aylık ortalamaları gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, ideal sistemdeki fazla elektrik yükünün %26 olduğu görülmektedir (Şekil 12). Başka bir deyişle üretilen elektriğin yaklaşık dörtte biri fazla olarak kalmaktadır. Simülasyonu yapılan bu sistem incelendiğinde, toplam net bugünkü maliyetin (NPC) ve birim enerji maliyetinin (COE) sırasıyla 20,365.13 \$ ve 0.1079 \$/kWh olduğu görülmektedir (Çizelge 10). Bu parametreler ve çıktılarına göre optimum sistemin ihtiyaç duyduğu batarya sayısı 5 ve beklenen yaşam süresi 14.9 yıldır. Sistem kendisine yapılan bu toplam maliyete %55.3'lik yatırım dönüşü olarak cevap vermekte ve kendisini 1.68 yılda amorti etmektedir (Çizelge 9).

Çizelge 10. Şebekeden bağımsız güneş enerji sistemine ait sistem düzeni bilgileri ve maliyet analizi

Sistem Düzeni	
PV Serisi	13.5 kW
Dizel Jeneratör	10 kW
Batarya	5 adet
Dönüştürücü	2.96 kW
Maliyet	
Toplam Net Bugünkü Maliyet	20,365.13 \$
Birim Enerji Maliyeti	0.1079 \$/kWh
İşletme Maliyeti	284.22 \$

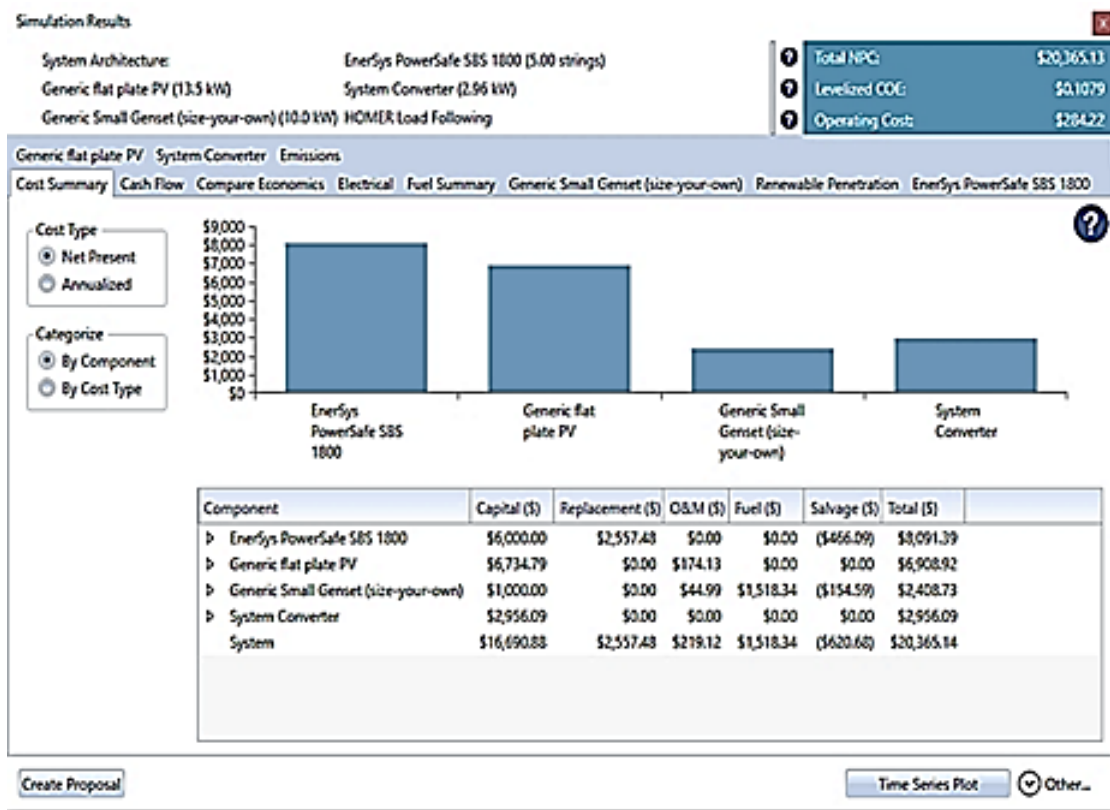
3.1.3. Şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin (güneş/rüzgâr) (HT-1) analizi

Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemi; Eocycle EOX S-16 rüzgâr türbini (30 kW), Generic flat plate PV dizisi (3.03 kW), EnerSys PowerSafe SBS 1800 batarya (4 adet), Generic Small Genset jeneratör (10 kW) ve dönüştürücüden (2.96 kW) oluşmaktadır. Hibrit enerji sistemi için elektrik yükü 40 kWh/gün, maksimum yük miktarı ise 2.73 kW olarak belirlenmiştir. Hibrit enerji sistemine ait sistem düzeni bilgileri ve simülasyon sonucunda elde edilen maliyetler Çizelge 11'de verilmiştir. Şekil 14'de hibrit enerji sistem bileşenlerinin ve tüm sistemin maliyetini gösteren toplu ekran çıktısı sunulmuştur. Toplam net bugünkü maliyet ilk yatırım, değiştirme, işletme/bakım, yakıt ve hurda maliyetlerinin toplamından oluşmaktadır. Şekil 15'de aylık ortalama elektrik üretimine ilişkin veriler yer almaktadır. Şekil 16, 17, 18 ve 19 ise sırasıyla hibrit sistemdeki rüzgâr türbini, PV dizisi, dizel jeneratör ve toplam güç çıkışı aylık ortalamalarını sunmaktadır. Simülasyonu yapılan bu sistem incelendiğinde, toplam net bugünkü maliyetin (NPC) ve birim enerji maliyetinin (COE) sırasıyla 32,184.14 \$ ve 0.1705 \$/kWh olduğu görülmektedir (Çizelge 11). Şekil 14'ün incelenmesi ideal sistemdeki fazla elektrik yükünün %55 olduğunu göstermektedir; başka bir deyişle üretilen elektriğin yaklaşık yarısı fazla olarak

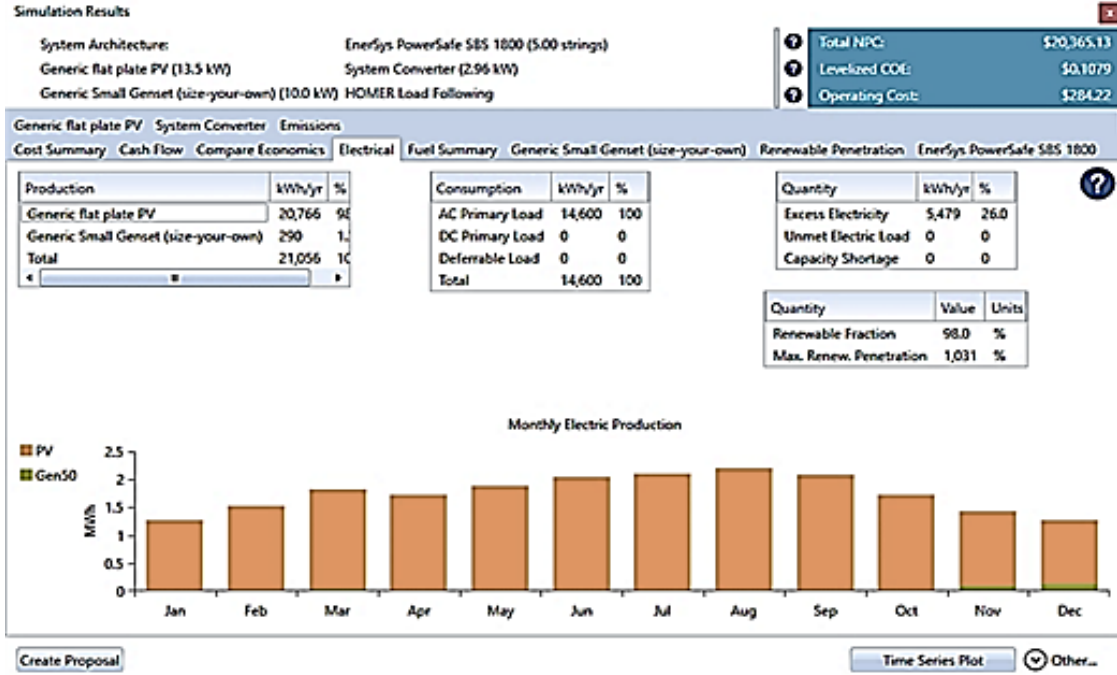
kalmaktadır. Çizelge 9’da görüldüğü gibi sistem kendisine yapılan bu toplam maliyete %59.2’lik yatırım dönüşü olarak cevap vermekte ve kendisini 1.63 yılda amorti etmektedir.

Çizelge 11. Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemine ait sistem düzeni bilgileri ve maliyet analizi

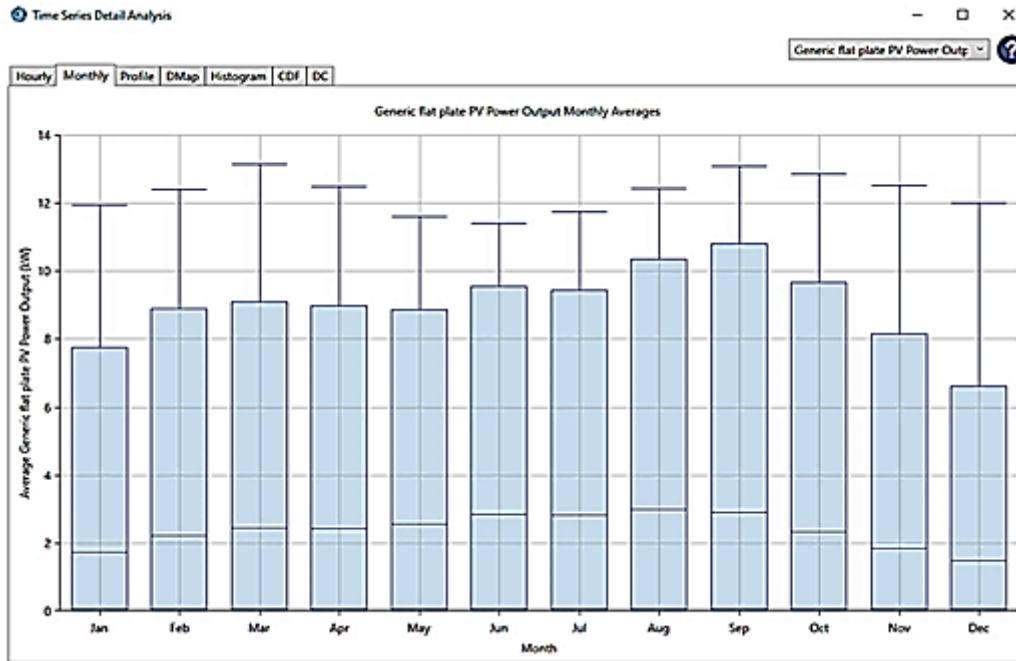
Sistem Düzeni	
Rüzgâr Türbini	30 kW
PV Dizi	3.03 kW
Dizel Jeneratör	10 kW
Batarya	4 adet
Dönüştürücü	2.96 kW
Maliyet	
Toplam Net Bugünkü Maliyet	32,184.14 \$
Birim Enerji Maliyeti	0.1705 \$/kWh
İşletme Maliyeti	147.71 \$



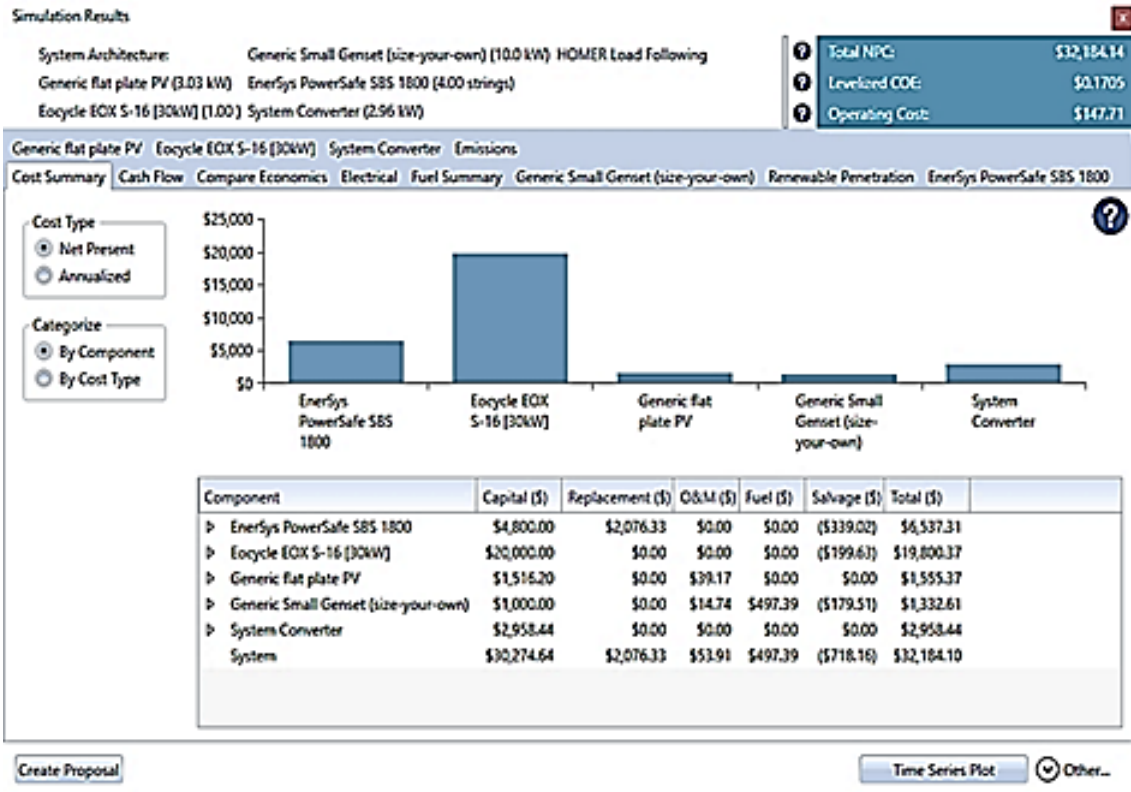
Şekil 11. Şebekeden bağımsız güneş enerji sisteminin elemanlarına ve sistemin tümüne ait maliyet.



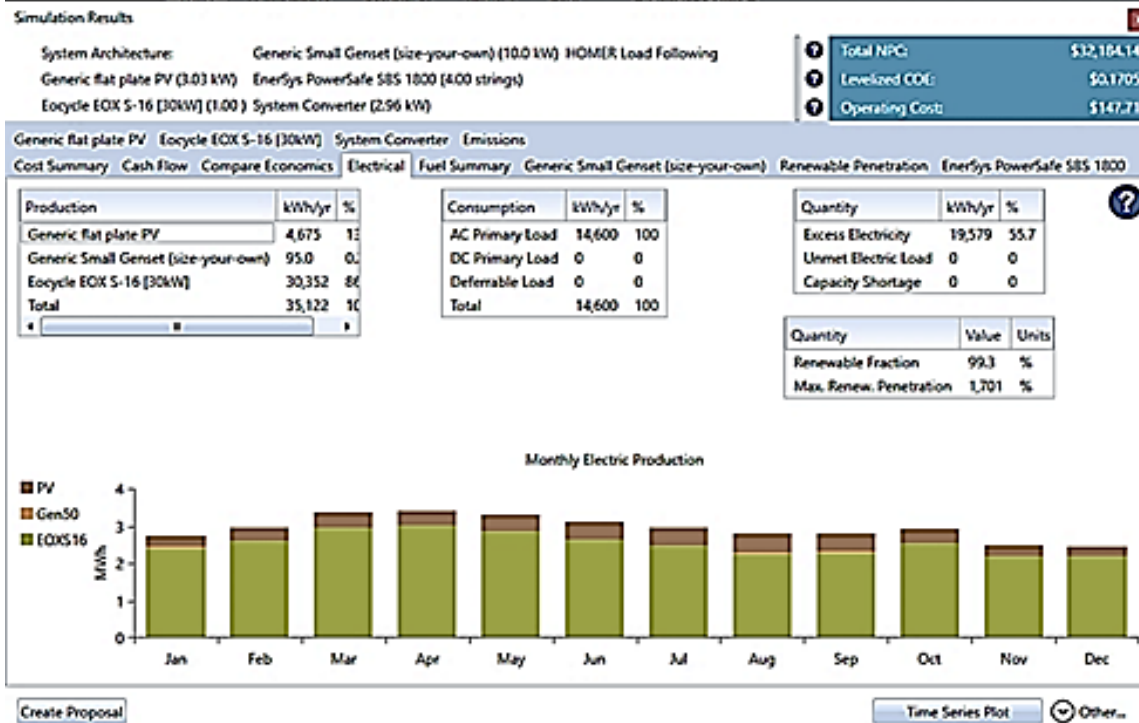
Şekil 12. Şebekeden bağımsız güneş enerji sisteminin aylık ortalama elektriksel üretimi.



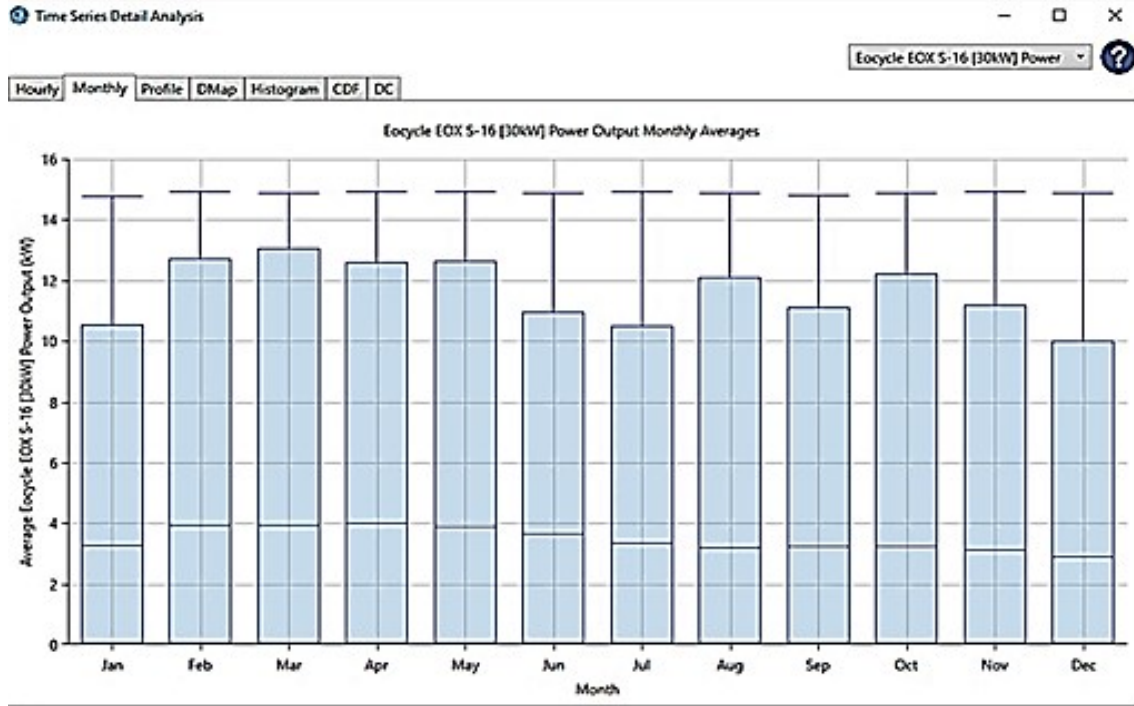
Şekil 13. Şebekeden bağımsız güneş enerji sisteminin PV dizisi güç çıkışı aylık ortalamaları.



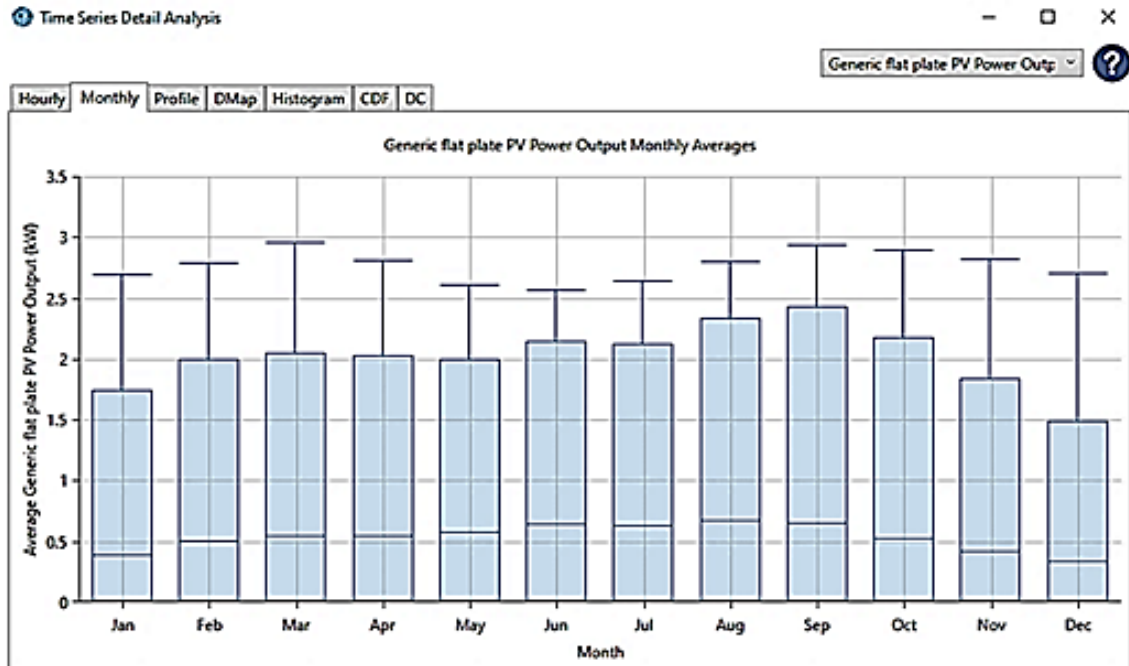
Şekil 14. Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemi (güneş/rüzgâr) elemanlarına ve sistemin tümüne ait maliyet.



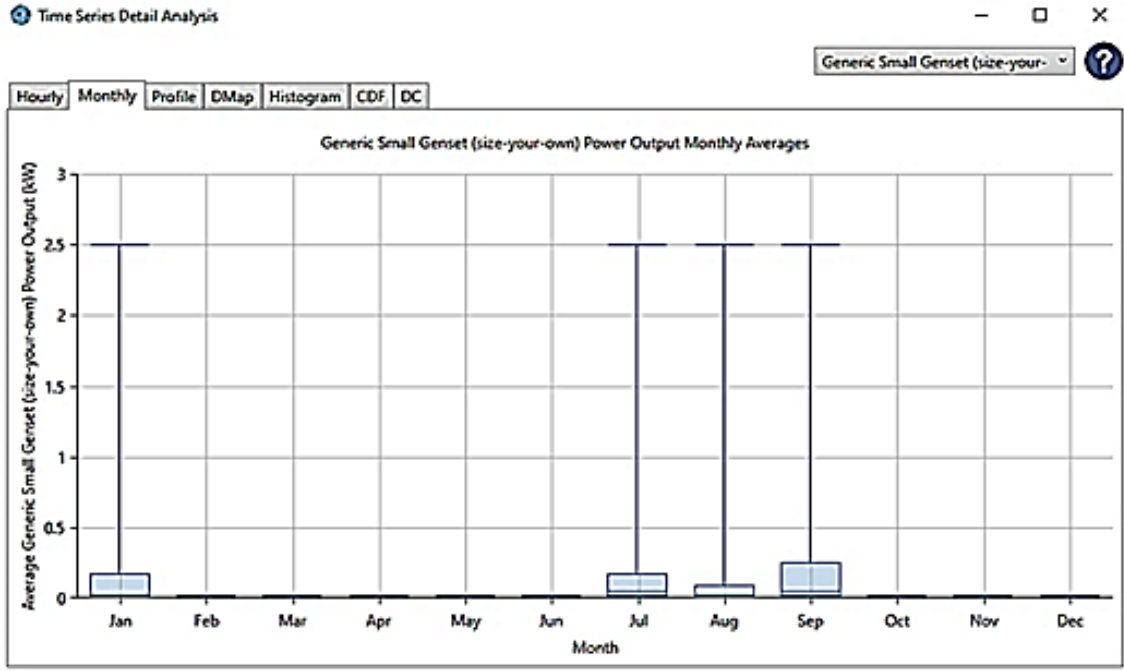
Şekil 15. Şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin aylık ortalama elektriksel üretimi.



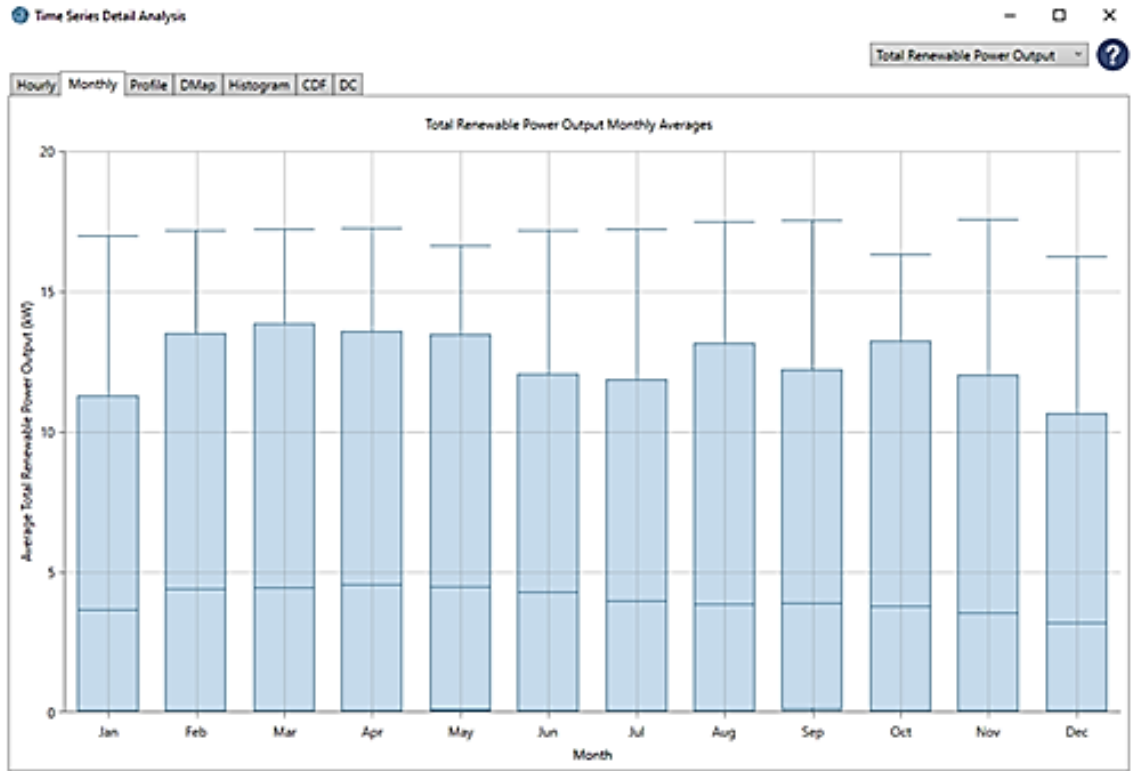
Şekil 16. Şebekeden bağımsız rüzgâr türbini güç çıkışı aylık ortalamaları.



Şekil 17. Şebekeden bağımsız PV dizisi güç çıkışı aylık ortalamaları.



Şekil 18. Şebekeden bağımsız dizel jeneratör sisteminin güç çıkışı aylık ortalamaları.



Şekil 19. Şebekeden bağımsız toplam güç çıkışı aylık ortalamaları.

3.2. Temel senaryoların sonuçlarının karşılaştırılması

Bu çalışmada analiz edilen temel senaryolara (RT-1, PV-1, HT-1) ait sonuçlar Çizelge 12'de toplu olarak sunulmuştur. Temel senaryolara ait model sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

- Sistemler içerisinde en yüksek birim enerji maliyetine (0.2332 \$/kWh) sahip olan sistem rüzgâr enerji sistemi, en düşük birim enerji maliyetine (0.1079 \$/kWh) sahip olan sistem güneş enerji sistemidir. Hibrit enerji sisteminin (rüzgâr/güneş) birim enerji maliyeti (0.1705 \$/kWh) bu iki sistem arasında yer almaktadır.
- En düşük birim enerji maliyetine (0.1079 \$/kWh) sahip olan sistemin güneş enerji sistemi olmasında Van ilinin güneşlenme süresinin yüksek olması etkili olmuştur. Şebekeden bağımsız güneş enerjisi sisteminde 13.5 kW gücünde PV panel kullanılmış ve fazla elektrik oranı %26.00 olmuştur. Sistem yaz aylarında daha fazla enerji üretirken kış aylarında enerji üretim miktarı azalmıştır. Fazla elektrik miktarını azaltmak için farklı kapasiteli PV paneller kullanılıp simülasyonlar yapılarak optimum çözüm aranabilir.
- Ülkemizde Şubat 2025 tarihi itibarıyla mesken aboneleri için 1 kWh elektrik fiyatı aylık toplam 240 kWh'e kadar 2.0723 TL/kWh (0.0575 USD/kWh), 240 kWh'ten fazlası için 3.1085 TL/kWh (0.0863 USD/kWh)'tir. Bu tarih için USD kuru 36.02 TL/USD alınmıştır. Bu tutarlara tüm vergiler (enerji bedeli, dağıtım bedeli, elektrik tüketim vergisi ve katma değer vergisi) dâhildir (EPDK, 2025). Öte yandan uluslararası bazda Türkiye için birim elektrik fiyatı 0.045 USD/kWh'tir (GlobalPetrolPrices, 2025). Bu değer (0.045 USD/kWh) temel alındığında şebekeden bağımsız tüm enerji sistemleri için birim enerji fiyatları bu fiyatın üzerinde gerçekleşmiştir.
- Şebekeden bağımsız hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sisteminde elektrik üretimine en fazla katkırı rüzgâr türbinleri (%86.42) sağlamıştır. Güneş panellerinin elektrik üretimine katkısı oldukça azdır (%13.31).
- Şebekeden bağımsız enerji sistemlerinde fazla elektrik miktarı %26.00 ile %55.70 arasında değer almıştır. En yüksek fazla elektrik miktarı (%55.70) şebekeden bağımsız hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sisteminde, en düşük fazla elektrik miktarı (%26.00) şebekeden bağımsız güneş enerji sisteminde meydana gelmiştir. Şebekeden bağımsız rüzgâr enerji sisteminde fazla elektrik miktarı %48.30 olarak gerçekleşmiştir. Şebekeden bağımsız enerji sistemlerinde fazla enerji miktarlarının fazla olması (%26.00-%55.70) daha düşük kapasiteli rüzgâr türbinleri ve güneş panelleri kullanılarak incelenen dubleks evin elektrik gereksiniminin karşılanabileceği anlamına gelmektedir.
- Şebekeden bağımsız enerji sistemlerinde fazla elektrik miktarını azaltmak için rüzgâr türbini kapasitesi ve güneş panellerinin kapasitesi azaltılarak baha fazla batarya ve daha yüksek kapasitede dönüştürücü kullanılabilir. Ancak bu tasarımın birim enerji maliyetini önemli ölçüde artırabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Çizelge 12. Temel senaryo sonuçlarının karşılaştırılması

Sistem Tipi	RT (kW)	PV (kW)	DJ (kW)	Batarya (Adet)	Dnştrc. (kW)	NPC (\$)	COE (\$/kWh)	Fazla Elekt. (%)
Senaryo 1 (RT-1)	30	-	10	5	4.38	44,016.06	0.2332	48.30
Senaryo 2 (PV-1)	-	13.50	10	5	2.96	20,365.13	0.1079	26.00
Senaryo 3 (HT-1)	30	03.03	10	4	2.96	32,184.14	0.1705	55.70

3.3. Alternatif senaryoların analizi ve temel senaryolar ile karşılaştırılması

Temel senaryo analiz sonuçları göz önüne alınarak temel senaryo kapasitelerinden farklı rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemleri kapasitelerine sahip 12 senaryo daha simüle edilerek analiz edilmiştir. 3 adet temel senaryo haricinde (RT-1, PV-1, HT-1) ek olarak 4 adet rüzgâr enerji sistemi senaryosu (RT-2, RT-3, RT-4, RT-5), 4 adet güneş enerji sistemi senaryosu (PV-2, PV-3, PV-4, PV-5) ve 4 adet hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemi senaryosu (HT-2, HT-3, HT-4, HT-5) senaryosu analiz edilmiştir. Bu senaryolar alternatif senaryolar olarak adlandırılmıştır. 3 adet temel senaryo ve 12 adet alternatif senaryo olmak üzere toplam 15 adet senaryoya ait sonuçlar toplu olarak Çizelge 13'de

verilmiştir. Temel ve alternatif senaryolara ait model sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

- Rüzgâr enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1681-0.4457 arasında değişmektedir. Rüzgâr enerji sistemlerinde en düşük birim enerji maliyeti (0.1681 \$/kWh) olan sistem RT-4 sistemidir. Bu sistemde rüzgâr türbininin gücü 10 kW, batarya sayısı 5 adet, dönüştürücü gücü 4.30 kW'tır. Öte yandan RT-5 sisteminde rüzgâr türbininin gücü 5 kW olmasına rağmen birim enerji maliyeti en yüksektir (0.4457 \$/kWh). Bu durum batarya sayısının az olmasına ve dönüştürücü gücünün yüksek olmasına bağlanabilir.
- Rüzgâr enerji sistemlerinde fazla elektrik miktarı %0.07 ile %64.50 arasında değişmektedir. En düşük fazla enerji miktarı rüzgâr türbini gücünün en düşük olduğu (5 kW) RT-5 sisteminde elde edilmiştir.
- Güneş enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1079-0.3987 arasında değişmektedir. Güneş enerji sistemlerinde en düşük birim enerji maliyeti (0.1079 \$/kWh) olan sistem PV-1 sistemidir. Bu sistemde PV panellerinin gücü 13.5 kW, batarya sayısı 5 adet, dönüştürücü gücü 2.96 kW'tır. En yüksek PV gücüne sahip olan PV-2 sisteminin birim enerji maliyeti en yüksek (0.3987 \$/kWh) bulunmuştur.
- Güneş enerji sistemlerinde fazla elektrik miktarı %0.25 ile %56.90 arasında değişmektedir. En düşük fazla enerji miktarı PV panel gücünün en düşük olduğu (2.48 kW) PV-5 sisteminde elde edilmiştir. PV panellerinin sayısının azalması ile fazla enerji miktarı azalmaktadır.
- Hibrit enerji sistemlerinin COE değerleri 0.0804-0.2108 arasında değişmektedir. Hibrit enerji sistemlerinde en düşük birim enerji maliyeti (0.0804 \$/kWh) olan sistem HT-2 sistemidir. Bu sistemde rüzgâr türbininin gücü 11 kW, PV panellerinin gücü 8 kW, batarya sayısı 3 adet, dönüştürücü gücü 2.94 kW'tır.
- Hibrit enerji sistemlerinde fazla elektrik miktarı %03.20 ile %55.70 arasında değişmektedir. En düşük fazla enerji miktarı HT-4 sisteminde elde edilmiştir.
- Rüzgâr enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1681-0.4457 arasında, güneş enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1079-0.3987 arasında, hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin COE değerleri 0.0804-0.2108 arasında değişmiştir. Rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemleri arasında genel bir karşılaştırma yapıldığında en düşük birim enerji maliyetine sahip sistemlerin hibrit enerji sistemleri olduğu görülmektedir.

Çizelge 13. Farklı kapasiteler içeren alternatif rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemleri sonuçlarının karşılaştırılması

Sistem Tipi	RT (kW)	PV (kW)	DJ (kW)	Batarya (Adet)	Dnştrc. (kW)	NPC (\$)	COE (\$/kWh)	Fazla Elekt. (%)
Rüzgâr Enerji Sistemleri (RT)								
Senaryo 1 (RT-1)	30	-	10	5	4.38	44,016.06	0.2332	48.30
Senaryo 2 (RT-2)	25	-	10	4	3.83	37,683.40	0.2006	61.60
Senaryo 3 (RT-3)	20	-	10	4	3.05	32,934.94	0.1745	64.50
Senaryo 4 (RT-4)	10	-	10	5	4.30	31,734.32	0.1681	45.30
Senaryo 5 (RT-5)	05	-	10	2	8.26	84,118.28	0.4457	00.07
Güneş Enerji Sistemleri (PV)								
Senaryo 6 (PV-1)	-	13.50	10	5	2.96	20,365.13	0.1079	26.00
Senaryo 7 (PV-2)	-	20.00	10	3	3.73	75,247.89	0.3987	56.90
Senaryo 8 (PV-3)	-	08.25	10	4	5.26	25,588.28	0.1356	03.43
Senaryo 9 (PV-4)	-	04.40	10	2	4.87	60,478.20	0.3204	01.05
Senaryo 10 (PV-5)	-	02.48	10	2	2.09	63,720.17	0.3376	00.25
Hibrit (Rüzgâr/Güneş) Enerji Sistemleri (HT)								
Senaryo 11 (HT-1)	30	03.03	10	4	2.96	32,184.14	0.1705	55.70
Senaryo 12 (HT-2)	11	08.25	10	3	2.94	15,173.55	0.0804	47.30
Senaryo 13 (HT-3)	05	07.00	10	4	2.94	39,793.72	0.2108	05.95
Senaryo 14 (HT-4)	06	04.40	10	3	2.93	30,825.74	0.1633	03.20
Senaryo 15 (HT-5)	20	01.94	10	3	2.95	22,806.30	0.1208	67.10

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip Van ilinde rüzgâr, güneş ve hibrit (güneş/rüzgâr) enerji sistemi ile elektrik üretim olanakları araştırılmıştır. Van ili için rüzgâr, güneş ve hibrit (güneş/rüzgâr) enerji sistemlerinin tasarımı gerçekleştirilerek ekonomik ve ekolojik analizler yapılmıştır. HOMER yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda toplam net bugünkü maliyet (NPC), birim enerji maliyeti (COE), fazla elektrik miktarı, geri ödeme süresi bakımından makul sonuçları veren sistemler araştırılmıştır.

4.1. Tartışma

Rüzgâr enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1681-0.4457 arasında, güneş enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1079-0.3987 arasında, hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin COE değerleri 0.0804-0.2108 arasında değişmiştir. Rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemleri arasında genel bir karşılaştırma yapıldığında en düşük birim enerji maliyetine sahip sistemlerin hibrit enerji sistemleri olduğu görülmektedir. Toplam net bugünkü maliyet (NPC), sistem bileşenlerinin maliyetinin toplamından oluşmaktadır. Rüzgâr enerji sisteminin bileşenleri rüzgâr türbini, batarya, jeneratör ve dönüştürücü; güneş enerji sisteminin bileşenleri PV panelleri, batarya, jeneratör ve dönüştürücü; hibrit enerji sisteminin bileşenleri rüzgâr türbini, PV panelleri, batarya, jeneratör ve dönüştürücüdür. Her bir bileşenin toplam net bugünkü maliyeti ilk yatırım, değiştirme, işletme/bakım, yakıt ve hurda maliyetlerinin toplamından oluşmaktadır. Rüzgâr türbininin gücü, PV panellerinin gücü, batarya sayısı ve dönüştürücü gücü toplam net bugünkü maliyeti önemli oranda etkilemektedir.

Rüzgâr enerji sistemlerinde fazla elektrik miktarı %0.07-%64.50, güneş enerji sistemlerinde fazla elektrik miktarı %0.25-%56.90, hibrit enerji sistemlerinde fazla elektrik miktarı %03.20-%55.70 arasında değişmiştir. Fazla elektrik miktarı rüzgâr türbini gücüne, PV panelleri gücüne, batarya gücüne dönüştürücü gücüne ve jeneratör gücüne bağlıdır. Her bir konfigürasyonda bileşenlerin sayısı ve güçleri çok farklı değerler içerdiğinden fazla elektrik miktarı geniş bir aralıkta değişim göstermiştir. Yapılan simülasyonlar rüzgâr türbin gücünün ve PV panellerinin sayısının azalması ile fazla enerji miktarının azaldığını göstermektedir.

Tüm bunlarla birlikte fazla elektriğin temel nedeninin bataryaların yüksek fiyatları olduğu söylenebilir. HOMER, sistemi en düşük maliyete sahip olacak şekilde optimize ettiğinden, bataryada depolamak yerine daha fazla elektrik üretme eğilimindedir. Bataryaların yüksek maliyetlerinin hibrit sistemlerin tasarımında önemli bir sorun olduğu iddia edilebilir. Batarya fiyatlarının önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde düşmesi beklendiğinden, toplam maliyetin önemli ölçüde azalacağı ve böylece hibrit sistemlerin gelecekte daha uygulanabilir ve yaygın olacağını söylemek mümkündür.

Sonuç olarak, bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının optimize edilmesi konusunda değerli iç görüler sunarak, optimum sürdürülebilirlik ve maliyet tasarrufu elde etmek için güneş ve rüzgâr dengelemenin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bulgular, rüzgâr, güneş ve dizel çözümlerini içeren hibrit sistemlerin uygulanmasını güçlü bir şekilde desteklemektedir. Hibrit sistemler, gelişmiş güvenilirlik, çevresel faydalar ve ekonomik avantajlar sunarak, iklim ve hava kirliliği etkilerini azaltırken kentlerimizin elektrik ağları için uygulanabilir, sürdürülebilir çözümler sunarlar.

4.2. Diğer literatürle karşılaştırma

Çizelge 14 bu çalışma sonuçlarının literatürdeki bazı hibrit enerji sistemi çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu çalışmada rüzgâr enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1681-0.4457 arasında, güneş enerji sistemlerinin COE değerleri 0.1079-0.3987 arasında, hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin COE değerleri 0.0804-0.2108 arasında değişmiştir. Çizelge 14'ün incelenmesinden görülebileceği gibi diğer çalışmalarda COE değerlerinin bazıları bu çalışmadaki değerlerden küçük iken bazıları daha yüksektir. Örneğin Taghavifar & Zomorodian (2021) İran'da bir eğitim binası için COE değerini 0.0272 gibi küçük bir değer bulmuşlardır. Öte yandan Li ve ark. (2013) Urumqi/Çin'de bir konut binası için COE değerini 1.045 gibi çok yüksek bir değer bulmuşlardır. Kolhe ve ark. (2013) tarafından Sri Lanka'da kırsal bir bölge için 20 kW güneş paneli, 40 kW rüzgâr türbini, 20 kW dizel jeneratör seti ve 40 akü bankasına sahip PV/RT/DJ/akü konfigürasyonunun en ekonomik konfigürasyon olduğu ve bu sistemin birim enerji maliyetinin 0.36 \$/kWh olduğu belirlenmiştir. Tawfik ve ark. (2018)

Mısır'ın Noubarya kentindeki bir çiftliğe kurulan bir tuzdan arındırma ünitesi için gereken enerjiyi karşılamak üzere çeşitli PV, RT, DJ ve bataryalardan oluşan şebekeden bağımsız hibrit sistemlerinin olası konfigürasyonların performansını araştırdıkları çalışmada optimizasyon sonunda birim enerji maliyeti (COE) 0.17 \$/kWh belirlemişlerdir. Zhang ve ark. (2022) tarafından İran'ın Ardabil kentindeki bir sanayi bölgesinde orta büyüklükteki bir atölye için en iyi PV dizisi, rüzgâr türbini, jeneratör, dönüştürücü ve batarya konfigürasyonu belirlenmiş ve bu konfigürasyonun birim enerji maliyetinin 0.462 \$/kWh olduğu bulunmuştur.

Hibrit sistemlerin COE değerlerinin geniş bir aralıkta değişmesi enerji maliyeti üzerinde birçok parametrenin etkili olmasına bağlanabilir. Gerçek COE değerleri incelenen binanın enerji talebine, bina tipi ve konumuna, güneş ve rüzgâr kaynağı verilerine, diğer sistem tasarım ve yapılandırma parametreleri ile işgücü maliyetine bağlıdır. Bu parametreler sistemin yatırım, işletme ve bakım maliyetleri üzerinde önemli etkilere sahiptir.

Çizelge 14. Bu çalışma sonuçlarının literatürdeki bazı hibrit enerji sistemi sonuçlarıyla karşılaştırılması

Kaynak	İncelenen Yer	Şehir/Ülke	Enerji Sistemi	COE (\$/kWh)
Kolhe ve ark. (2013)	Kırsal Bölge	Sri Lanka	PV/RT/DJ	0.3600
Li ve ark. (2013)	Konut Binası	Urumqi/Çin	PV, RT, PV/RT	PV/RT: 1.045
Baek ve ark. (2016)	Metropol şehir	Busan/Güney Kore	PV/RT	0.3990
Korkmaz (2016)	Üniversite Kampüsü	Malatya/Türkiye	PV, RT, PV/RT, PV/RT/DJ	RT: 0.9130 PV: 2.050 PV/RT: 0.9020 PV/RT/DJ: 0.4520
Okonkwo ve ark. (2017)	Ticari Bina	Ürdün	PV/RT	0.331
Singh ve ark. (2017)	Ada	Kavaratti/ Lakshadweep/Hindistan	PV/RT	0.10995
Arıkan & Çam (2017)		Amasra/Bartın/Türkiye	PV, RT, PV/RT	RT: 0.190 TL/kWh PV: 0.580 TL/kWh PV/RT: 0.243-0.280 TL/kWh
Haratian ve ark. (2018)	Üniversite Laboratuvarı	İsfahan/İran	PV, PV/RT	PV: 0.546 PV/RT: 0.620
Tawfik ve ark. (2018)	Tuzdan arındırma ünitesi	Noubarya/ Mısır	PV/RT/DJ	0.17
Abdin & Mérida (2019)	-	Colorado/USA	PV/RT/Hidrojen	0.50
Jenkins ve ark. (2019)	Üniversite Binası	Al-Marj, Libya	PV/RT	0.2000
Kayıkçı (2020)	Konut Binası	Didim/Aydın/Türkiye	PV, RT, PV/RT	PV: 0.015-0.414 TL/kWh RT: 0.510 TL/kWh PV/RT: 0.1120-0.4040 TL/kWh
Taghavifar & Zomorodian (2021)	Eğitim Binası	İran	PV/RT/DJ	0.0272
Akan (2021)	Konut Binası	Süleymanpaşa/TEKİRDAĞ	PV/RT	0.409-0.521 TL/kWh
Zhang ve ark. (2022)	Atölye	Ardabil/İran	PV/RT/DJ	0.4620
Muller ve ark. (2023)	Üniversite Kampüsü	Manipal/ Karnataka/Hindistan	PV/RT	0.0780
Erdal ve ark. (2024)	Havza Atık Su Arıtma Tesisi	İzmir/Türkiye	PV-RT/DJ	0.0782, 0.1400
Aydın & Çoban (2024)	Üniversite Kampüsü	Ardahan	PV/RT/DJ	0.0287-0.516
Bu çalışma (2025)	Konut Binası	Van/Türkiye	RT/DJ	0.1681-0.4457
Bu çalışma (2025)	Konut Binası	Van/Türkiye	PV/DJ	0.1079-0.3987
Bu çalışma (2025)	Konut Binası	Van/Türkiye	PV/RT/DJ	0.0804-0.2108

4.3. Öneriler

Bu çalışmada Van ili için şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin tasarımı ve karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Konuya yönelik gelecekteki araştırmalar aşağıdaki konular üzerine yoğunlaşabilir:

- Van ili için şebekeye bağlı rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin tasarımı ve karşılaştırmalı analizi yapılabilir.
- Van ili için şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı rüzgâr, güneş ve hibrit (rüzgâr/güneş) enerji sistemlerinin karşılaştırmalı analizi yapılarak en uygun sistem belirlenebilir.
- Çalışmada incelenen kapasitelerden farklı rüzgâr türbini kapasiteleri ve PV paneli kapasiteleri kullanılıp optimizasyon yapılarak en uygun sistem belirlenebilir.

- (d) Enerji karışımını çeşitlendirmek ve genel dayanıklılığı artırmak için hibrit yapılandırmalara biyokütle veya jeotermal gibi diğer yenilenebilir kaynakları dâhil edilebilir.
- (e) Bakım, kullanım ömrü ve devre dışı bırakmayı göz önünde bulundurarak çeşitli hibrit sistemlerin uzun vadeli finansal uygulanabilirliğini ve çevresel etkilerini değerlendirmek için ayrıntılı ekonomik analizler ve yaşam döngüsü değerlendirmeleri yapılabilir.
- (f) Hibrit enerji sistemlerine dâhil edilebilecek yeni enerji depolama teknolojileri araştırılabilir.
- (g) Hibrit enerji sistemlerine en son kontrol sistemlerinin ve yapay zekanın entegre edilmesiyle enerji üretimi ve tüketiminin gerçek zamanlı optimizasyonu yapılabilir.

Kaynakça

- Abdin, Z., & Mérida, W. (2019). Hybrid energy systems for off-grid power supply and hydrogen production based on renewable energy: A techno-economic analysis, *Energy Convers. Manag.* 196, 1068–1079. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.068>
- Ahmed, M.M., Das, B.K., Das, P., Hossain, M.S., & Kibria, M.G. (2024). Energy management and sizing of a stand-alone hybrid renewable energy system for community electricity, fresh water, and cooking gas demands of a remote island. *Energy Conversion and Management*, 299, 117865. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117865>
- Akan, A.E. (2021). Techno-economic analysis of an off-grid hybrid energy system with Homer Pro. *Icontech International Journal of Surveys, Engineering, Technology*, 5(3), 56-61. <https://doi.org/10.46291/ICONTECHvol5iss3pp56-61>
- Aktar, A.K. (2017). *Bir meskenin elektrik ihtiyacının rüzgâr türbini ve güneş panellerinden oluşan hibrit sistem ile sağlanması*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye.
- Anonim. (2024). Ortalama bir evde günlük elektrik harcaması kaç kW olabilir? Erişim tarihi: 15.12.2024. <https://www.elektromarketim.com/>
- Anonim. (2025). Wikipedia. Erişim tarihi: 20.04.2025. https://en.wikipedia.org/wiki/Akdamar_Island
- Ariaei, A.R., Fakhr, M.H., Ahmadi, R., & Jahangiri, M., (2024). Comparative analysis of hybrid and single-source power systems for sustainable electricity generation for remote areas: A case study in Zahedan. *International Journal of Photoenergy*, 2024, 1929512. <https://doi.org/10.1155/2024/1929512>
- Arıkan, Y., & Çam, E. (2017). Rüzgâr ve güneş enerjisi sistemlerinin fizibilite analizlerinin web tabanında gerçekleştirilmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.29137/umagd.346161>
- Aydın, K., & Çoban, H.H. (2024, December). *Bir üniversite kampüsü için hibrit enerji sisteminin optimizasyonu ve maliyet analizi*. 4th International World Energy Conference, December 06-08, 2024, Kayseri, Türkiye, 702-717.
- Aydın, S., & Karabey, A. (2023). *Sürdürülebilir enerji üretiminde hibrit modellerin analizi*. 11th International Congress on Engineering, Architecture and Design, İstanbul, Türkiye, 10 - 12 Haziran 2023, 1293-1302.
- Aydıncıoğlu, M. (2019). Van ili güneş enerji santralleri raporu, Van ve Ticaret Sanayi Odası, Van.
- Baek, S., Park, E., Kim, M., Kwon, S.J., Kim, K.J., Ohm, J.Y., & Pobil, A.P. (2016). Optimal renewable power generation systems for Busan metropolitan city in South Korea. *Renewable Energy*. 88, 517-525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.058>
- Baran, B. (2012). *Güneş - rüzgâr hibrit sistemlerin maliyet optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, Türkiye.
- Bozok, M.N. (2017). *Düzce ilinde tipik bir konut için rüzgâr-güneş hibrit enerji sistemlerinin modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce, Türkiye.
- DAKA. (2019). *Güneş enerjisi sektörel analiz raporu*. Doğu Anadolu Kalkınma Ajansı, Van. Erişim tarihi: 12.11.2024. <https://www.daka.org.tr/>
- DAKA. (2023). *Van ili yatırım potansiyeli*. Doğu Anadolu Kalkınma Ajansı, Van. Erişim tarihi: 05.11.2024. <https://www.daka.org.tr/>

- Dursun, B., Gokcol, C., Umut, I., Ucar, E., & Kocabey, S. (2013). Techno-economic evaluation of a hybrid PV-wind power generation system. *International Journal of Green Energy*, 10, 117-136. <https://doi.org/10.1080/15435075.2011.641192>
- EPDK. T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2025). Erişim tarihi: 01.02.2025. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>
- Erdal, S., Aydın, E., & Andiç, C. (2024). Design of a stand-alone hybrid solar/wind/battery/diesel microgrid for a wastewater treatment plant in İzmir using HOMER Pro software. *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 4(1), 26-39. <https://doi.org/10.5152/tepes.2024.24002>
- GEPA. (2024). *Güneş enerjisi potansiyel atlası*. Erişim tarihi: 08.10.2024. <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/65.aspx>
- GlobalPetrolPrices. (2025). Erişim tarihi: 03.02.2025. <https://www.globalpetrolprices.com/>
- Haratian, M., Tabibi, P., Sadeghi, M., Vaseghi, B., & Poustdouz, A. (2018). A renewable energy solution for stand-alone power generation: a case study of KhshU Site-Iran. *Renewable Energy*, 125, 926-935. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.078>
- HOMER. (2025). *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*. Erişim tarihi: 17.01.2025. <https://www.homerenergy.com/>
- Jafarzadeh, N. (2017). *Analysis of hybrid wind-solar power plant for İTÜ Ayazaga Campus*. M.Sc. Thesis, İTÜ, Energy Institute, Energy Science and Technology Division, İstanbul, Türkiye.
- Jenkins, P., Elmnifi, M., Younis, A., & Emhamed, A. (2019). Hybrid power generation by using solar and wind energy: case study. *World Journal of Mechanics*, 9, 81-93. <https://doi.org/10.4236/wjm.2019.94006>
- Kayıkçı, B. (2020). *Aydın ili Didim ilçesindeki kırsal bölgede yer alan bir konutun elektrik ihtiyacının hibrit güneş-rüzgâr enerji sistemi ile karşılanmasının analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, Türkiye.
- Kırbaş, İ., & Kocakulak, T. (2021). Hibrit sistemler ile enerji üretimi: MAKU-TBMYO örneği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 12(1), 127-135. <https://doi.org/10.29048/makufebd.889146>
- Kolhe, M., Iromi Udumbara Ranaweera, K.M., & Sisara Gunawardana, A.G.B. (2013). *Techno-economic optimum sizing of hybrid renewable energy system*. IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 1898-1903, <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699421>
- Korkmaz, E.E. (2016). *İnönü Üniversitesinin elektrik enerji ihtiyacının hibrit sistemle modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, Türkiye.
- Köse, G. (2010). *Hibrit (güneş + rüzgâr) enerji sisteminden elektrik üretimi: Kütahya örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, Türkiye.
- KTB. (2025). Kültür ve Turizm Bakanlığı, Van İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü Web Sitesi. Erişim tarihi: 06.01.2025. <https://van.ktb.gov.tr/TR-52093/genel-bilgiler>
- Li, Ch., Ge, X., Zheng, Y., Xu, Ch., Ren, Y., Song, Ch., & Yang, Ch. (2013). Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi. China. *Energy*, 55, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.084>
- Mamur, H., Yakar M.C., & Zerafet A. (2019). Bir kamu binası için hibrit enerji sistemi fizibilitesi. *International Journal of Technological Sciences*, 11(1), 51-58.
- Matpay, B. (2024). Coğrafi bakımdan güneş enerji santrali (GES) için uygun yerlerin belirlenmesi: Van ili örneği. *Türk Coğrafya Dergisi*, 85, 7-19. <https://doi.org/10.17211/tcd.1442528>
- Muller, D.C., Selvanathan, S.P., Cuce, E., & Kumarasamy, S. (2023). Hybrid solar, wind, and energy storage system for a sustainable campus: A simulation study. *Science and Technology for Energy Transition*, 78, 1-12. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000618832>
- Nassar, Y.F., Abdunnabi, M.J., Sbeta, M.N., Hafez, A.A., Amer, K.A., Ahmed, A.Y., & Belgasim, B. (2021). Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system: A case study, *Energy Convers. Manag.*, 229, 113744. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113744>

- Nazari-Heris, M., Esfehankalateh, A.T., & Ifaei, P. (2023). Hybrid energy systems for buildings: a techno-economic-enviro systematic review. *Energies*, 16, 4725, 1-15. <https://doi.org/10.3390/en16124725>
- Okonkwo, E.C., Okwose C.F., & Abbasoglu S. (2017) Technoeconomic analysis of the potential utilization of a hybrid PV-wind turbine system for commercial buildings in Jordan. *Int. J. Renew. Energy Res.* 7 (2), 908–914.
- Patil, A, A., Arora, R., Arora, R., & Sridhara, S, N. (2023). Performance analysis of hybrid renewable energy using Homer software. *Journal of Propulsion Technology*, 44(3), 2832-2853. <https://doi.org/10.52783/tjpt.v44.i3.811>
- REPA. (2025). *Rüzgâr enerjisi potansiyel atlası*. Erişim tarihi: 06.01.2025. <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/iller/VAN-REPA.pdf>
- Roy, D., Zhu, S., Wang, R., Mondal, P., Ling-Chin, J., & Roskilly, A.P. (2024). Techno-economic and environmental analyses of hybrid renewable energy systems for a remote location employing machine learning models. *Applied Energy*, 361, article 122884. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122884>
- Rüstemli, S., & Dinçer, F. (2011). Van ili elektrik üretiminde güneş enerjisinin mevcut durumu ve geleceği. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16 (1), 22-33.
- Sharifishourabi, M., Alimoradiyan, H., & Atikol, U. (2016). Modeling of hybrid renewable energy system: The case study of Istanbul, Turkey. *Journal of Thermal Engineering, Yildiz Technical University Press, Istanbul, Turkey*, 2(6), Special Issue 5,990-994.
- Singh, G., Baredar, P., Singh, A., & Kurup, D. (2017). Optimal sizing and location of PV, wind and battery storage for electrification to an island: A case study of Kavaratti, Lakshadweep. *Journal of Energy Storage*, 12, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.04.003>
- Taghavifar, H., & Zomorodian, Z.S. (2021) Techno-economic viability of on grid micro-hybrid PV/wind/Gen system for an educational building in Iran. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 143, 110877. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110877>
- Tawfik, T.M., Badr, M.A., El-Kady, E.Y., & Abdellatif, O.E. (2018). Optimization and energy management of hybrid standalone energy system: a case study. *Renewable Energy Focus*, 25, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.03.004>
- TÜİK. (2025). *İstatistik veri portalı*. Türkiye İstatistik Kurumu. Erişim tarihi: 14.02.2025. <https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=n%C3%BCfus>
- Türkdoğan, S., Dilber, S., & Çam, B. (2018). Hibrit enerji sistemlerinin şebekeden bağımsız bir çiftlik evinde uygulanabilirliğinin ekonomik ve teknik açıdan incelenmesi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 52-65.
- Türkdoğan, S., Mercan, M.T., & Çatal, T. (2020). Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri kullanılarak 40 hanelik bir topluluğun elektrik ve termal yük ihtiyacının karşılanması: teknik ve ekonomik analizleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 476-485. <https://doi.org/10.31590/ejosat.688048>
- Yalılı, M. (2021). Lisanslı fotovoltaik güneş enerji santrali yatırımının finansal analizi: Van ili örneği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10 (3), 1055-1074. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.901218>
- Yaman, A., Yakın, A., & Behçet, R. (2019). Van ili güneş ve hidroelektrik enerji potansiyelleri ve ilin ekonomisine katkıları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 243-250.
- Yayla, S., & Harmancı, E. (2019, Nisan). *Van ili belirli ilçeleri için hesaplanan rüzgâr potansiyellerinin karşılaştırılması*. 2nd International Congress on Engineering and Architecture (ENAR), Muğla, Türkiye, 22 – 24, 1-16.
- Yayla, S., Yumak, H., & Bayram, A. (2010a). Yüzüncü Yıl Üniversitesi Kampüs Alanının rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15 (1), 17-23.
- Yayla, S., Yumak, H., & Almalı, M.N. (2010b). *Vangölü kıyısı üzerinde bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesi*. 8. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Bursa, Turkey, 159-166.
- Yeler, O., Aslantaş, P., & Karabey, A. (2016, October). *Van ili iklim koşullarında seralarda kullanılabilecek yenilenebilir enerji kaynaklı sistemler*. 3. International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, Antalya, Turkey.

- Yılmaz, U., Demirören, A., & Zeynelgil, H.L. (2010). Gökçeada'da yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üretim potansiyelinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 215-223.
- Yumak, H., Ucar, T., & Yayla, S. (2012). Wind energy potential on the coast of Lake Van. *International Journal of Green Energy*, 9 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/15435075.2011.617017>
- Zhang, G., Xiao, C., & Razmjoooy, N. (2022). Optimal operational strategy of hybrid PV/wind renewable energy system using homer: a case study. *Int. J. Ambient Energy*, 43 (1), 3953–3966. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1861087>