

	YALOVA ÜNİVERSİTESİ ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ HİBRİT ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİ PROJESİ	
	<u>DERSİN ÖĞRETİM ELEMANI:</u> Doç. Dr. SUNAY TÜRKDOĞAN	

GÖKÇEADA’NIN ENERJİ İHTİYACININ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ İLE KARŞILANMASI

Göksu ÇIRACI, Salih Burak AKBAŞAK, Can DANIŞMAN

gksrc@gmail.com, salihburak.akbasak@ieee.org, can.dan.man.1@gmail.com

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi

Özet

Bu çalışmada 9,440 kişilik yerleşik nüfusa sahip Gökçeada’nın günlük ortalama 211 MWh enerji ihtiyacını karşılamak için şebekeden bağımsız, %100 yenilenebilir enerji kaynağına sahip hibrit elektrik enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik hesaplamaları yapılmıştır. HOMER(Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) programı üzerinden optimum sistemler analiz edilmiştir. Analizler sonucunda ada üzerindeki yüksek potansiyele sahip rüzgâr enerjisi ve gübre atık potansiyeli kullanılarak biyogaz jeneratörü kullanılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir. Tüm bu yapılan analizler sonucunda birim enerji maliyetinin 0.501 TL/kWh olduğu tespit edilmiştir. Ada üzerindeki nüfusun mevsimsel değişkenliği göz önünde bulundurularak yerleşik olarak yaşayan nüfusun ihtiyacının giderilmesi öncelik olarak alınmıştır. Gökçeada üzerinde yapılan bu çalışma, mevcut ve sonraki çalışmalara destek olması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına ağırlık verilerek, fosil yakıtlı kaynaklardan uzaklaşmanın önemine vurgu yaparak teşvik niteliğinde olması amaçlanmıştır

Anahtar Kelimeler: Hibrit elektrik enerji sistemleri, Gökçeada, yenilenebilir enerji kaynakları, HOMER.

SUPPLY THE ENERGY NEED OF GOKCEADA WITH HYBRID ENERGY SYSTEM

Abstract

In this study, the technical and economic calculations of the hybrid electricity systems off-grid and having 100% renewable energy source were made to supply the daily average energy need of 211 MWh of Gökceada, which has a settled population of 9,440 people. Optimum systems were analyzed using the HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) program. As a result of the analysis, it has been determined that it is appropriate to use a biogas generator by using fertilizer waste potential and the high potential wind energy on the island. As a result of all these analyzes, it has been determined that the unit energy cost is 0.501 TL / kWh. Considering the seasonal variability of the population on the island to supply of the settled population was taken as a priority. This study on Gökceada was carried out to support current and future studies. The aim is to emphasize the importance of moving away from fossil fuel sources using renewable energy sources.

Keywords: Hybrid electrical energy systems, Gökçeada, renewable energy resources, HOMER.

**** (Bu çalışmada ondalık kısımlar (.) ile ayrılmıştır.)*

1. Giriş

Enerji talebi; nüfus artışı, sanayileşme, teknolojik gelişmeler ve bireylerin refah seviyesi ile paralel şekilde artış göstermektedir. Yüksek enerji seviyeleri, uygun maliyetli oluşu ve kolay kullanılıp depolanma gibi avantajlar sebebiyle dünya birincil enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar tüketilmektedir. Ancak fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar, siyasi nedenler ve kısıtlı rezervleri neticesinde alternatif enerji kaynakları arayışı başlamıştır. Bu nedenle tüm dünyada temiz ve sürdürülebilir enerji olan yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Enerji ihtiyacındaki bu artış, elektrik üretim sistemlerinin de çoğalmasına sebep olmaktadır. Fosil kaynaklardan yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılacak olan geçiş, elektrik üretim sistemlerinin çevreye olan zararını düşürecek ve gelişmeyle birlikte sıfıra indirebilecektir. Bu durumun gerçekleşmesi sonucu çevreye olan zarar azaltılsa da enerji ihtiyacına yetişmek bazen mümkün olmayabilir. Buna bağlı olarak da enerji talebinin karşılanabilirliğinin sektöre uğraması elektriğe ulaşım imkânı söz konusu olsa bile, enerjinin verilememesi, olası kesintilerin sıkça ve uzun süre yaşanmasına sebebiyet verebilir. Elektrik üretim, iletim, dağıtım hatlarındaki parametrelerin optimum seviyede kalması için hibrit elektrik enerji sistemlerine ve kendi üretimini yapan birimlere ihtiyaç artmaktadır.

Birden fazla enerji kaynağı kullanılarak oluşturulan hibrit enerji sistemleri şebekeye bağlı veya bağımsız olarak çalışabilmektedir. Enerji iletim hatlarına uzak, kırsal bölgelerde tercih edilen şebekeden bağımsız sistemlerin ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Ancak çevreci ve yerli bir çözüm olduğu için tercih edilmektedirler. Hibrit bir enerji sisteminin performansı, çevresel koşullara bağlı olmakla birlikte, bir bölgeye özgü analiz, maliyet ve bileşenlerin boyutuna bağlıdır. Daha verimli ve uygun sistemler kurmak için yatırım esnasında seçilecek sistemlerin tüm elemanlarını doğru bir biçimde boyutlandırılması oldukça önemlidir.

Bu çalışmada Gökçeada'nın enerji ihtiyacını karşılayabilecek hibrit enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bölgenin coğrafi ve ekonomik koşulları göz önünde bulundurularak çeşitli enerji kaynakları karşılaştırılmış ve en uygunları seçilmiştir. Sistem içerisinde bölgeye uygun olan güneş, rüzgâr ve biyokütle kaynakları değerlendirilmiştir.

Projenin yapılacağı bölge, Çanakkale iline bağlı olan Gökçeada'dır. Gökçeada, 40°14' ila 40°05' Kuzey enlemleri, 25°39' ila 26°00' Doğu boylamları arasında yer almaktadır. Gökçeada'nın nüfusu (2019) 9.440'tır. Gökçeada'nın toplam yüzölçümü 289 km²'dir. Rakım değeri 673 metredir [1,2,3].

Proje için Gökçeada'nın seçilmesindeki sebepler;

- Gökçeada'nın Türkiye sınırları baz alındığında en yüksek rüzgâr potansiyeline sahip olan yerlerden biri olması [4].
- Gökçeada içerisindeki atıkların fazla olması, depolanmıyor olması ve değerlendirilmiyor olması.
- Biyogaz yatırımları için yeterli miktarda ve kalori değeri yüksek tarımsal ve hayvansal atık kapasitesine sahip olması [5].
- Gökçeada ve Bozcaada'nın tüm elektrik ihtiyacının karşılanması için AB Horizon 2020 projesi kapsamında çalışmaların yürütülüyor olması [6].

gibi sebeplerden dolayı proje kapsamı olarak belirlenmiştir.

2. Metodoloji

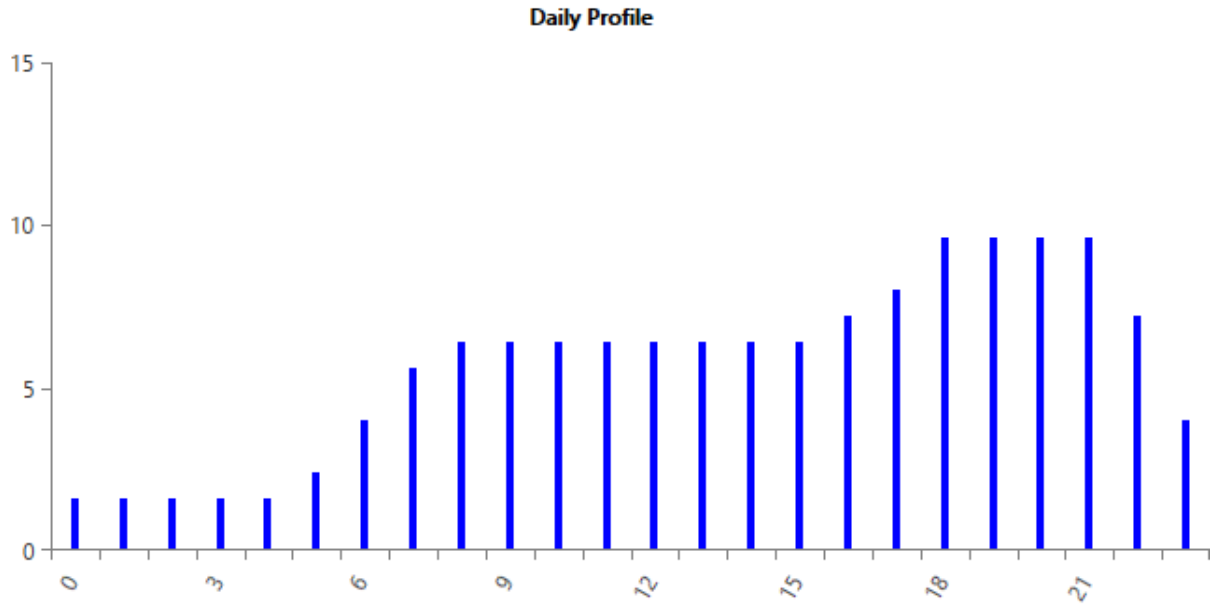
2.1. Tasarlanan Sistem Verileri

Çanakkale ili için yılda kişi başına düşen elektrik tüketimi 8,160 kWh (2018) olarak belirlenmiştir [7]. Bu hesaplama Çanakkale il genelinde yapıldığı için Gökçeada verilerini de içinde barındırmaktadır. Gökçeada nüfusunun 9,440 kişi olduğu göz önüne alındığında nüfusun yıllık toplam tükettiği enerjinin 77,030,400 kWh ve yine toplam nüfusun günlük toplam tükettiği enerjinin 211,042.19 kWh olduğu tespit edilmiştir. Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda Gökçeada'nın her gün ortalama 211 MWh elektrik talebi bulunmaktadır. Gökçeada nüfusun kış ve yaz ayları için ciddi farklar içerdiği bir bölgedir. Yaz aylarındaki nüfusun 2020 yılı sonundaki verilerinin tahminini önceki yıllardaki artış oranı hesabı üzerinden tahmin edildiği zaman yaz aylarında 22,009 kişinin Gökçeada'da bulunduğunu göstermektedir. Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda yaz aylarındaki enerji talebinin ciddi şekilde artacağı görülmektedir. Enerji talebindeki anlık ihtiyaç artışlarının sistemde sorunlar yaşatmaması için sistemin bu verilere göre dizayn edilmesi gerekmektedir.

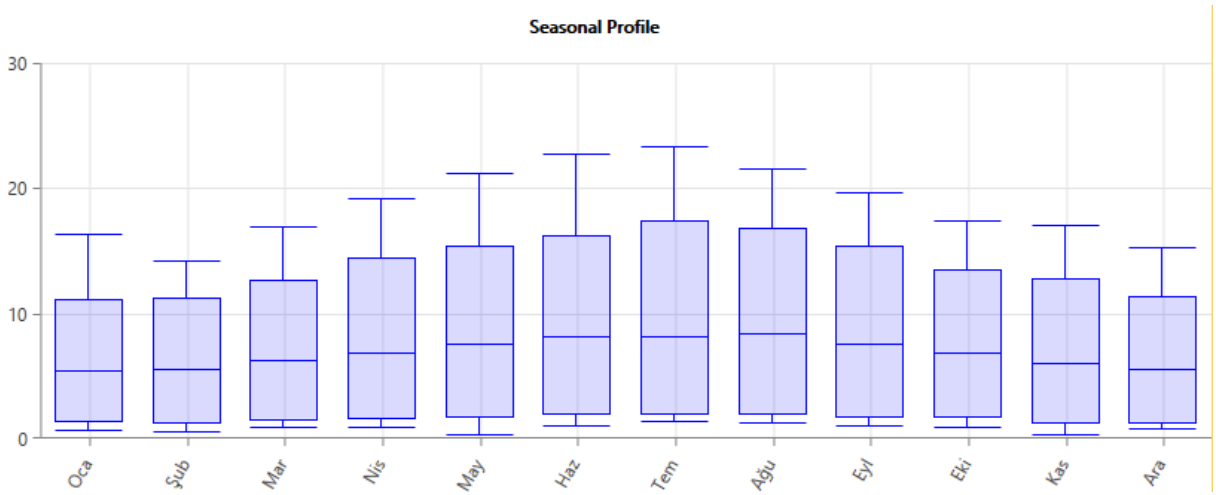
Sistem hesaplamaları TL para birimi üzerinden yapılmıştır. TL para biriminin faiz oranı %17 enflasyon oranı %14.6 olarak baz alınmıştır [8,9]. USD-TL paritesi 7.5 TL/\$ olarak baz alınmıştır. Proje ömrü 25 yıl baz alınmıştır. Kurulan sistemin yıl içinde üretim yapmadığı oran ise %5 olarak girilmiştir.

2.1.1 Elektrik Yük Yapısı:

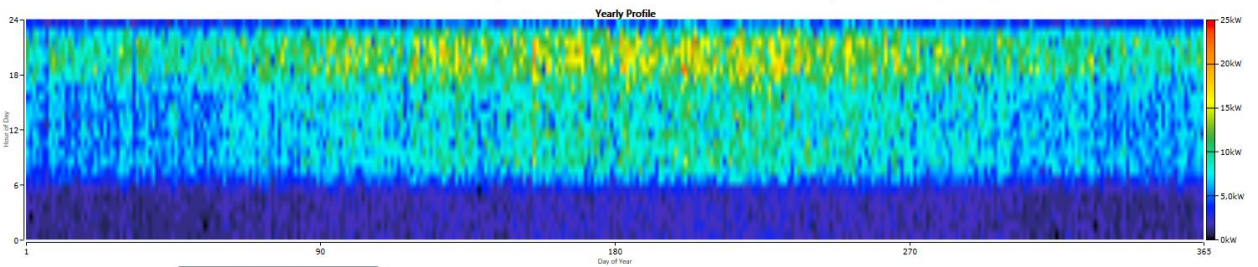
Gökçeada'nın günlük elektrik ihtiyacı (9,440 kişinin) 211 MWh olarak tespit edilmiştir. Gökçeada, ismi üzerinden de anlaşılacağı gibi bir ada ilçesidir. Ada olduğu için yük profili HOMER'da "community" olarak seçilmiştir. İhtiyacın pik yaptığı dönem ise "temmuz ayı" olarak belirlenmiştir. Yaz döneminde 22,000 seviyelerine çıkan ada nüfusu, dikkate alınmalıdır.



Şekil-1: Gökçeada'nın elektrik yük günlük profili.



Şekil-2: Gökçeada'nın elektrik yük mevsimlik profili.

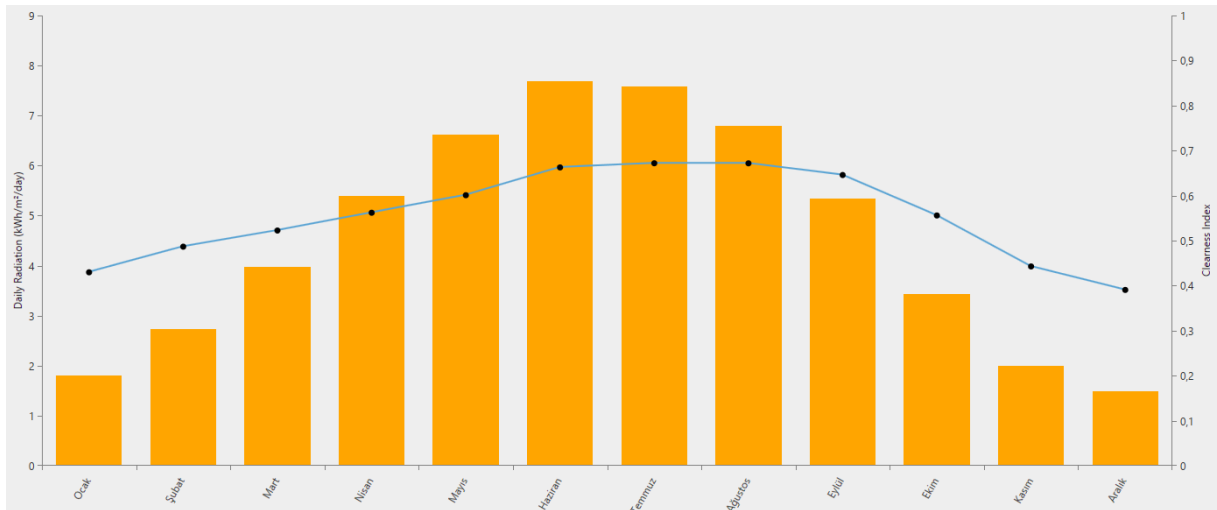


Şekil-3: Gökçeada'nın elektrik yük yıllık profili.

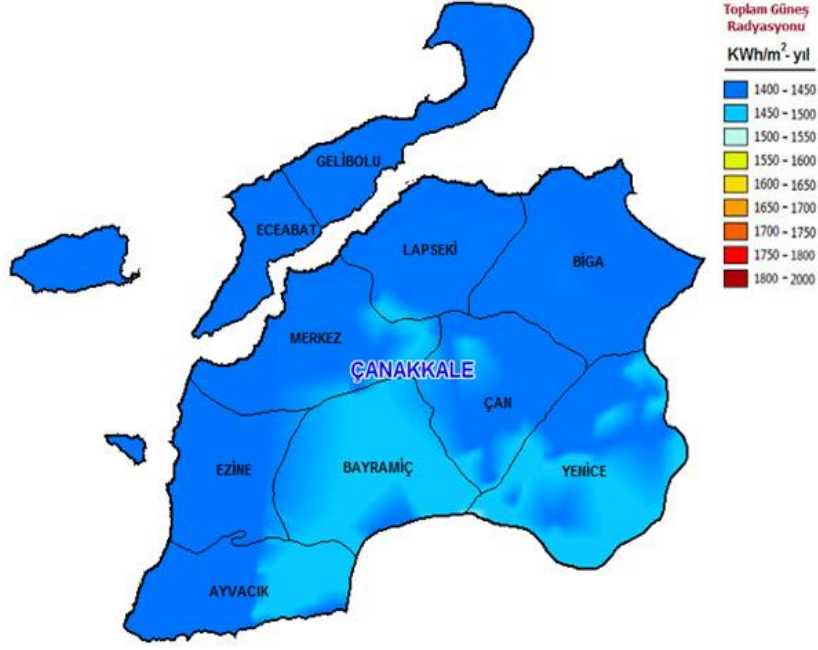
2.1.2. Güneş Enerjisi

Güneş, dünyanın en önemli enerji kaynaklarından biridir. Çevre açısından temiz bir enerji kaynağı özelliği taşıdığı için, fosil yakıtlara alternatif olabilmektedir. Güneş enerjisi, yer ve atmosferdeki fiziksel oluşumları etkileyen bir kaynaktır. Dünyadaki madde ve enerji akışları güneş enerjisi ile mümkündür [10]. Homer programı üzerinde hesaplama yapılırken güneş, rüzgâr ve sıcaklık verileri NASA veri tabanından çekilmiştir. Buna ek olarak TEİAŞ, Enerji Bakanlığı verileri de kullanılmıştır.

Gökçeada güneş radyasyon verilerine bakıldığında değerlerin enerji üretimi için ortalamanın altında kaldığı görülmektedir. Ancak bölgeye kurulacak sistemin hibrit bir enerji sistemi oluşu güneşin bu açığını kapatmakta ve bölge için güneşi tercih edilebilir bir hale getirmektedir. Çanakkale GEPA verileri üzerinden Gökçeada'nın yıllık güneş radyasyonu değeri 1400-1450 kWh/m² arasındadır. [11].



Şekil-4: Gökçeada'nın ortalama günlük radyasyon miktarı.



Şekil-5: Çanakkale Güneş Enerji Potansiyeli Atlası (GEPA) [4].

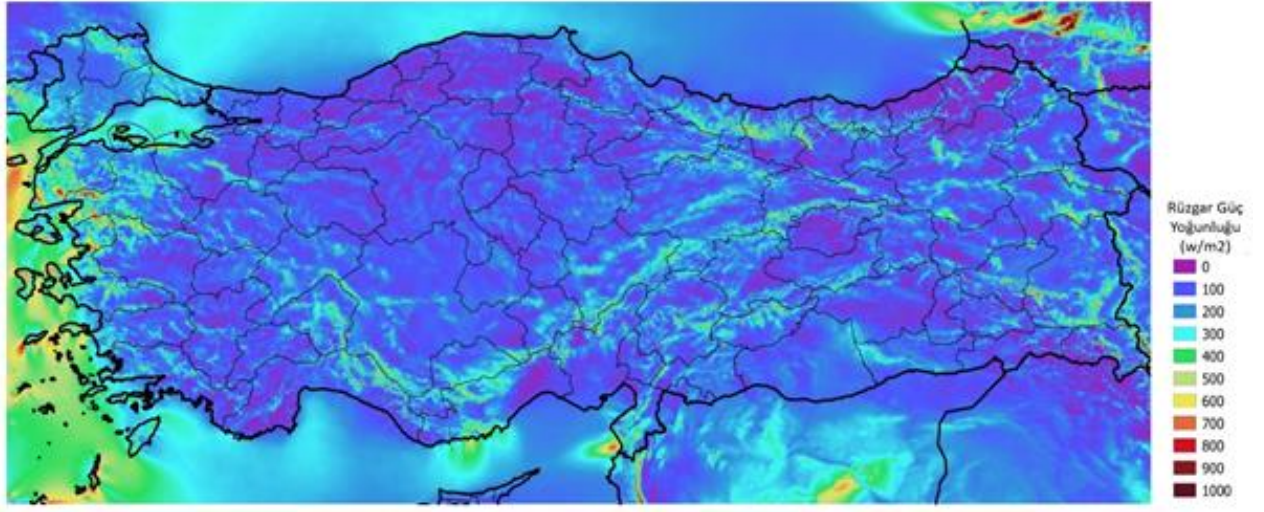
Sistemde kullanılan güneş panelleri herhangi bir hareketli aksana sahip olmadan sabit şekilde konumlandırılmıştır. HOMER programında kullanılan güneş paneli maliyeti 1,374.7 \$/kW olarak baz alınmıştır. Tasarlanan sistemde 1 kW'lık *Generic flat plate* güneş panelleri kullanılmıştır. Güneş panelinin bakım-onarım maliyeti 13 \$/kW/yıl olarak belirlenmiştir [12].

2.1.3. Rüzgâr Enerjisi

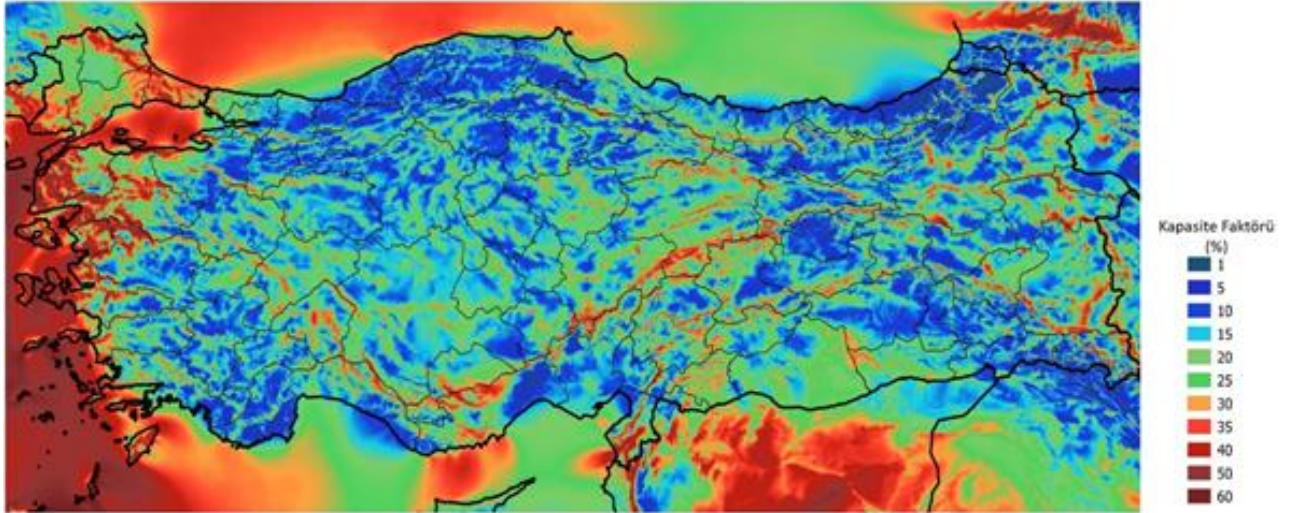
Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir özelliğe sahip, taşıma sorunu bulunmayan ve enerji üretimi için çok yüksek teknoloji gerektirmeyen bir enerji kaynağıdır. Ayrıca, bu enerji kaynağı atmosferde serbest ve bol bir şekilde bulunmakta ve çevre kirliliği oluşturmamaktadır [13].

Gökçeada, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi bakımından en fazla potansiyele sahip olduğu tespit edilen bölgelerindendir. Adanın mevcut bitki örtüsü, rüzgâr türbinlerine herhangi bir olumsuz etki yapmayacak durumdadır. Yıllık ortalama rüzgâr hızı verileri incelendiğinde 7.5 m/s hızları gözlemlenmektedir. Rüzgâr güç yoğunluğu haritası incelendiğinde, Gökçeada'nın farklı bölgelerinde 300 W/m², 600 W/m² ve 800 W/m² dolaylarında farklı güç yoğunluğu değerleri tespit edilmiştir. Bu değerlerin ortalaması alındığında 567 W/m² değeri olduğu

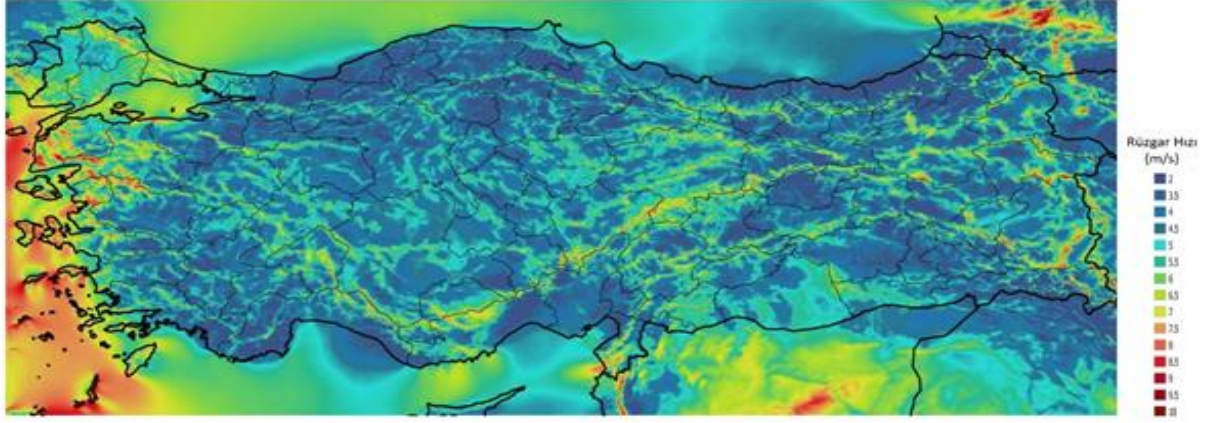
saptanabilmektedir. Kapasite faktörü dağılım haritası incelendiğinde ise, %50 seviyelerinde olduğu görülmektedir.



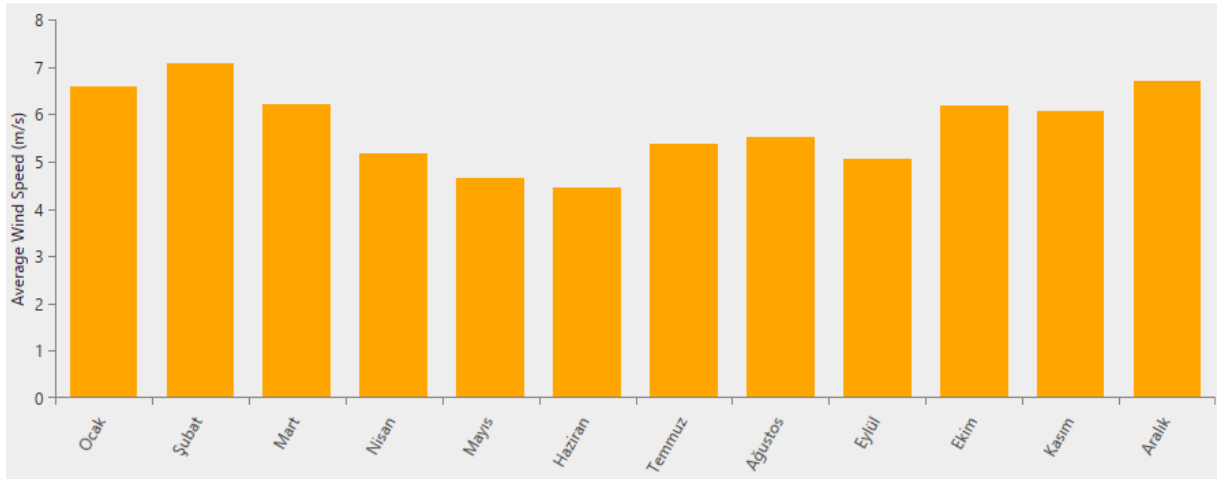
Şekil-6: Türkiye yıllık ortalama rüzgâr güç yoğunluğu dağılım haritası [1].



Şekil-7: Türkiye rüzgâr kapasite faktörü dağılım haritası [1].



Şekil-8: Türkiye yıllık ortalama rüzgâr hızı haritası [1].



Şekil-9: Gökçeada ortalama rüzgâr hızı tablosu.

Tasarlanan sistemde 1.5 MW'lık Generic marka rüzgâr türbinleri kullanılmıştır. Rüzgâr türbinlerinin CAPEX (yatırım maliyeti) değeri 1.3 M \$/MW'tır. Rüzgâr türbinlerinin bakım-onarım maliyeti kullanım ömrü olan 20 yıllık süreç baz alınmıştır. Bakım-onarım maliyetinin 20 yıllık ortalaması 21,740 \$/türbin, 21.74\$ /kW ve 1,459.54 \$/yıl olarak baz alınmıştır. Yenileme maliyeti 12,427\$ /türbin ve 12.43\$ /kW olarak alınmıştır [14,15].

2.1.4. Biyokütle Enerjisi

Hayvansal atıklar, besin endüstrisi atıkları, organik evsel atıklar, su bitkileri, orman atıkları, kentsel organik atıklar gibi organik atıkların tümü biyokütle olarak adlandırılmaktadır [16].

Biyogaz biyokütlenin oksijensiz fermentasyonu ile oluşan gaz formunda bir yakıt türüdür. Renksiz, kokusuz ve havadan hafiftir. Bileşimindeki metan gazı sayesinde kaliteli bir yakıt olarak kullanılabilir. Isıl değeri içeriğindeki metan oranına göre değişiklik göstermektedir (17-25 MJ/ arasında). Biyogaz daha çevreci bir seçim olarak doğal gazın kullanıldığı her yerde kullanılabilir. 1 m³ biyogazın etkili ısısı 5.70 kWh enerjiye karşılık gelmektedir [17].

Gökçeada'nın toplam elverişli tarım arazisi 33,500 dekar (daa)'dır. Orman ve fundalık arazisi ise 68,690'dır. Bu alanlar biyokütle enerjisi için değerlendirilebilir (enerji ormanları). Ayrıca adanın tüm atıkları da biyoyakıt enerjisi üretmek için kullanıma uygundur. Adadaki çöplerin düzenli depolanması halinde bu atıklardan da biyogaz elde edilebilmektedir [18]. Bölgedeki tarım ve hayvancılık sektörünün ön planda olması, geçim kaynakları olarak devam etmesi, atıkların depolanma ihtiyacı gibi nedenler biyogaz üretim tesisi ihtiyacını ön planda tutmaktadır [19].

Çanakkale'nin ilçeleri incelendiğinde hayvansal atıkların enerji değeri (TEP/yıl) sıralamasında Gökçeada 2. sıradadır. Bitkisel atıkların değeri (TEP/yıl) 2. sıradadır. Kentsel organik atıkların enerji değeri (TEP/yıl) 1. sıradadır. Bu verilere ve Gökçeada da günlük toplanabilecek potansiyel gübre miktarına bakıldığında gübreden biyogaz üretimi için oldukça uygun bir bölge olduğunu görmekteyiz.

Biyogaz tesisi kurulumunda tesisin kapasitesi, ham maddeye olan uzaklığı (konum), kullanılan hammadde çeşidi gibi özelliklere dikkat edilmelidir. Bu özelliklerin tümü maliyeti doğrudan etkiler. Kapasite seçimi yapılırken elektrik ihtiyacı iyi hesaplanmalı ve ihtiyacın üzerinde kapasite seçiminden kaçınılmalıdır. Bunun nedeni sonradan ihtiyaç olması dahilinde tesise eklemeler yapılarak tesis büyütülebilir ancak ihtiyacın üzerinde kapasite seçimi yapıldığında tesisin istenilenden az elektrik üretmesi maliyeti arttırır ve geri ödeme süresinin uzamasına neden olmaktadır [20]. HOMER programında yapılan optimum hesaplamalara göre kurulacak tesis kapasitesi 500 kW olarak belirlenmiştir. Belirlenen kapasiteye göre kurulacak biyogaz tesisinin yatırım maliyeti, gelir ve giderleri ortalama olarak aşağıda verilmiştir;

- Yatırım maliyeti

Tesis kapasitesi = 500 kW

Yatırım maliyeti toplam = 3,516,253.606 TL

Birim Fiyat = 4,011.18 TL/kW

- Tesis Giderleri

Kojenerasyon Bakım Giderleri = 0.024 TL/kWh'dan hesaplanırsa; 288 TL/gün → 103,680 TL/yıl

Genel Bakım Maliyeti = 0.018 TL/kWh 'ten hesaplanırsa; 216 TL/gün → 77,760 TL/yıl

İlk Devreye Alma Maliyeti = 2 kez/10 yıl → 10,000.00 TL / yıl

5 Yıllık Arayla Bakım Maliyeti = 1 kez/10 yıl → 15,000.00 TL / yıl

- Tesis Geliri

Tarım açısından zengin olan Gökçeada da kurulacak olan biyogaz tesisinde biyogaz üretimi sırasında yan ürün olarak çıkan organik gübre satışından gelir elde edilebilir [21].

Katı Gübre Satış Geliri = 100 TL/ton

Gökçeada gübreden biyogaz potansiyelinin belirlenmesi için öncelikle hayvan sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Hayvanlardan elde edilen gübre miktarları hayvanların cinsine göre değişiklik göstermektedir [22].

Hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyelinin hesaplanmasında kullanılabilecek kabuller ise şu şekilde belirtilmektedir:

- 1 adet büyükbaş hayvandan 3.6 ton/yıl yaş gübre
- 1 adet küçükbaş hayvandan 0.7 ton/yıl yaş gübre
- 1 adet kümes hayvanından 0.022 ton/yıl yaş gübre [23].

Bu değerlerden yola çıkarak;

- Bir ton sığır gübresinden 33 m³/yıl biyogaz,
- Bir ton koyun gübresinden 58 m³/yıl biyogaz,
- Bir ton kümes hayvanından 78 m³//yıl biyogaz elde edilebilir.

Bu kabuller doğrultusunda yapılan hesaplamalarla aşağıda verilen tablo verilerine ulaşılır:

Tablo-1: Gökçeada büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanları teorik gübre ve biyogaz potansiyeli tablosu.

Gökçeada	Hayvan Sayısı (adet)	Teorik Gübre Potansiyeli (ton/yıl)	Teorik Biyogaz Potansiyeli (m ³ /yıl)
Büyükbaş	1,228	4,420.8	145,886.4
Küçükbaş	86,394	60,475.8	350,7596.4
Kümes	3,420	75.24	5,868.72
TOPLAM	91,042	64,971.84	3,659,351.52

Gökçeada ilçesinde bir yılda elde edilebilecek toplam biyogaz miktarı şu şekildedir: $145,886.4 + 3,507,596.4 + 5,868.72 = 3,659,351.52 \text{ m}^3$

Bitki atıkları ve organik çöp atıkları bu çalışma içine dahil edilmemiştir. Aşağıda Gökçeada’da ortalama biyokütle maliyeti ve toplam gübre maliyeti hesaplanmıştır.

Toplam günlük ortalama atık miktarı: 191.70 ton/gün

Atık taşıyacak vidanjörün taşıma kapasitesi: 16 ton

Sefer sayısı: $(191.70 \text{ ton/gün}) * (16 \text{ ton}) = 11.98 \sim 12 \text{ sefer}$

Tesisin merkezden uzaklığı (atığın taşınacağı mesafe): 10 km

Km başına taşıma maliyeti: 3 TL/km

Günlük atık maliyeti: $(12 \text{ sefer}) * (10 \text{ km}) * (3 \text{ TL/km}) * (2 \text{ sefer}) = 720 \text{ TL/gün}$

Toplam atık maliyeti: $(191.70 \text{ ton/gün}) / (720 \text{ TL/gün}) = 3.755 \text{ TL/ton}$

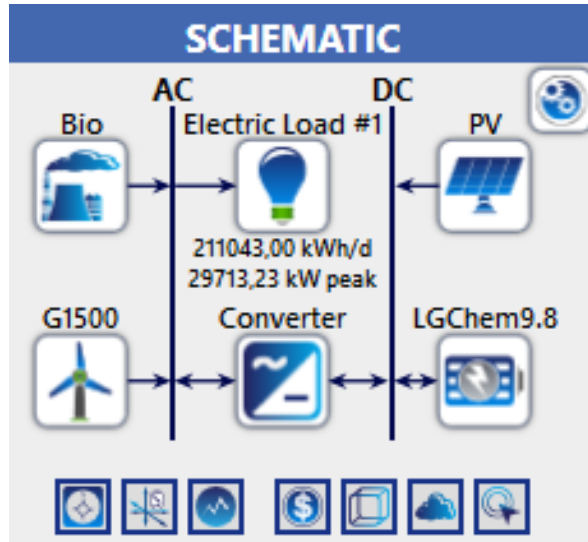
Toplam atık maliyeti değeri, HOMER programı kısmında “resources” sekmesinde “biomass” kaynağında yer alan “average price” kısmını; toplam günlük ortalama atık miktarı ise, HOMER programında “resources” sekmesinde “biomass” kaynağında yer alan “scaled annual average” kısmını ifade etmektedir. İlgili verilen buraya girilmiştir.

2.1.5. Batarya

Tasarlanan sistemde kimyasal enerji depolama seçeneği olarak Li-ion bataryalar tercih edilmiştir. Sistemde LG Chem. RESU-10 modeli olan 9.8 kWh kapasiteye sahip Li-ion batarya tercih edilmiştir. Kullanılan batarya günümüz koşullarında 137 \$/kWh olarak baz alınmıştır [24]. Seçilen bataryanın derin deşarj yüzdesi %80.80'dir. Bu değer bataryanın ne kadar verimli kullanılacağını, yaşam ömrünü ve hatta ikinci yaşam ömrünü de etkileyen bir kriterdir.

2.2. Tasarlanan Hibrit Sistem Modeli

Gökçeada'nın enerji ihtiyacına karşılık verilebilmesi için öncelikli olarak bölgedeki potansiyeli yüksek olan enerji kaynaklarına yönelik bir sistem tasarlamak ve hibrit şekilde kurulumak daha efektif bir sonuç elde edilmesinde yardımcı olacaktır. Bölgede yer alan yüksek potansiyeldeki enerji kaynakları incelendiğinde rüzgâr ve biyokütle enerji kaynaklarının ön plana çıktığı tespit edilmiştir. Hibrit sistem tasarımında rüzgâr, güneş ve biyokütle enerji kaynakları kullanılarak depolamalı (şebekeden bağımsız) olacak şekilde bir kurgu oluşturulmuştur. Bu tasarlanan sistem değerlendirilmiş ve analizleri yapılmıştır.



Şekil-10: HOMER simülasyonunun şema gösterimi.

Rüzgâr türbinleri adanın sahil kesimlerine ve gerekli yükseltinin sağlandığı bölgelere konumlandırılmıştır. Biyogaz tesisi merkeze yakın (lojistiğin kolay sağlanabileceği) uygun bir araziye konumlandırılmıştır. Paneller güneşlenme etkisini yüksek seviyede yararlanılabilmesi

açısından arazi eğimleri dikkate alınarak, güneşin en dik gelebilecek bölgeye konumlandırılmıştır. Simüle edilen hibrit enerji sisteminde rüzgâr türbinlerinde ve biyogaz tesisinde AC elektrik üretim yapacak şekilde ve şebekeye doğrudan enerji sağlayacağı şekilde sisteme entegre edilmiştir. PV paneller ise, DC baraya bağlanarak DC-AC dönüşüm gerçekleştikten sonra şebeke ihtiyacını karşılayacak şekilde entegre edilmiştir. Batarya depolamayı DC formda gerçekleştirdiği için DC bara bağlantısıyla sisteme entegre edilmiştir. Rüzgâr enerji kaynağı, güneş enerji kaynağı, biyokütle enerji kaynağı ve depolama için batarya içeren hibrit sistemin en optimum seçeneği, maliyet açısından en uygun seçeneğin hepsinin birlikte değerlendirilebilmesi için birçok hassasiyet durumu sisteme girdi olarak sağlanmıştır. Güneş panellerinin azaltma faktörü değeri, rüzgâr türbin kule yüksekliği, biyogaz tesisinin minimum yük oranı, batarya minimum depolama ömrü, yük profilindeki değişiklikler, türbin ve paneller için farklı konumlandırmalar gibi çeşitli değişkenler sisteme tanımlanarak hesaplama yapılmıştır.

3. Sistem Simülasyon Sonuçları ve Analizi

Yapılan simülasyon çalışması sonucunda Gökçeada'ya kurulabilecek hassasiyet analizleri de dahil edilerek birçok sistem tespit edilmiştir.

Architecture										Cost				System	
															
PV (kW)		PV-MPPT (kW)		G1500	Bio (kW)	LGChem9.8	Converter (kW)	Dispatch	COE (€)	NPC (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	
				43	500	59.216	29.091	LF	€0,501	€716M	€11,7M	€490M	100	613	
				46	500	45.970	29.645	CC	€0,512	€732M	€11,7M	€507M	100	1.930	
				47		47.685	38.442	CC	€0,516	€738M	€11,4M	€517M	100	0	
				47		49.073	32.151	CC	€0,520	€744M	€11,5M	€522M	100	0	

Şekil-11: Simülasyon sonucunda geliştirilen 4 simülasyon.

Şekil-11'de yer alan simülasyon sonuçlarına göre en optimum sonuç ilk sırada yer alan biyogaz tesisi, rüzgâr türbini, batarya seçeneğinin bir arada olduğu hibrit sistem uygun olarak seçilmiştir. Hassasiyet değerleri içinde incelendiğinde birçok parametre değeri girilmiştir. En optimum sistem için bakıldığında biyogaz tesisindeki ortalama kütle 182.11 ton/gün, güneş panelinin azalma faktörü %70, bataryanın ömrü 10 yıl, rüzgâr türbini ortalama 5.7525 m/s olarak baz alındığı sistem üzerinde görülmüştür.

En optimum sistemde birim enerji maliyeti (COE) 0.501 TL olarak bulunmuş, en optimum seçeneğe güneş paneli eklendiğinde birim enerji maliyeti 0.512 TL olarak tespit edilmiştir. En

optimum sistemde; 1.5 MW’lık rüzgâr türbini, 500 kW’lık biyogaz tesisi, 9.8 kWh’lik Li-ion batarya ve 29 MW’lık dönüştürücü içermektedir. İkinci optimum seçenekte tek fark güneş panelinin eklenmiş halidir. Tüm optimizasyon sonuçlarındaki modeller, en optimum seçenek dahil olmak üzere yenilenebilir enerji faktörü %100’dür. Sistem tümüyle %100 yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışmaktadır. Program içerisinde batarya dolum komutu iki farklı formda gerçekleşmektedir; LF ve CC. En optimum sistem tasarımında batarya dolum formatı (dispatch) LF (load following) yani jeneratörün tam kapasitede çalışmayıp bataryayı doldurmaması seçeneğidir. Batarya diğer enerji kaynaklarından üretilen elektrik ile şarj edilmektedir. Toplam biyogaz yakıtı göz önüne alındığında 613 L/yıl olarak biyogaz yakıtı elde edilerek yakılmaktadır. İlk kurulum maliyeti ilk sistem seçeneğine göre daha ikinci seçenekte daha yüksektir. Bunun sebebi PV paneller ile birlikte MPPT’ler de sisteme entegre edilmiştir. Özellikle Gökçeada gibi en düşük seviyede güneş radyasyonu alan bir bölge için çok ideal bir yatırım olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	111	kg/yr	Carbon Dioxide	348	kg/yr
Carbon Monoxide	1,23	kg/yr	Carbon Monoxide	3,86	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr	Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr	Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr	Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0,767	kg/yr	Nitrogen Oxides	2,41	kg/yr

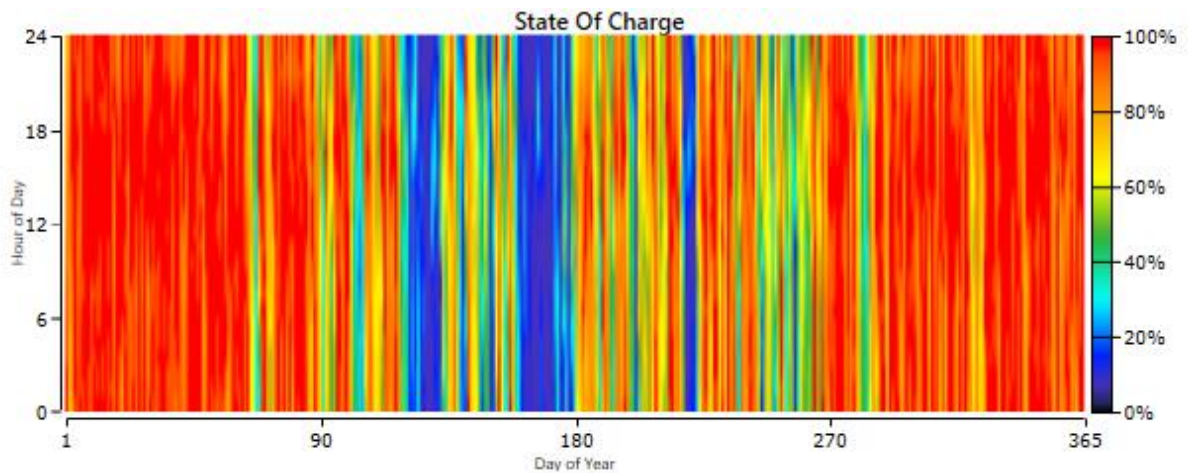
Şekil-12: Emisyon Değerleri (solda en optimum sistem, sağda ikinci optimum sistem).

Yukarıdaki şekil incelendiğinde en optimum seçeneğin daha az emisyonla sahip olduğu görülmektedir. Bunun en temel sebebi; dispatch seçiminin farklı olmasıdır. En optimum seçimde LF (load following) seçeneği baz alındığı için biyogaz tesisi yani biyogaz jeneratörü bataryayı doldurmayacak ve dolayısıyla ona göre üretim yapacak sadece ihtiyaç kadar çalışacaktır. Ancak ikinci optimum sistemde CC (cycle charging) seçeneği baz alındığı için biyogaz jeneratör tam kapasite çalışacak ve fazla olan üretimi bataryaya depolayacak. Bataryayı depolamak için de bir üretim süreci devreye girdiği için emisyon değeri artmaktadır.

3.1. Bataryanın Kullanımının Sistem Üzerindeki Etkisi:

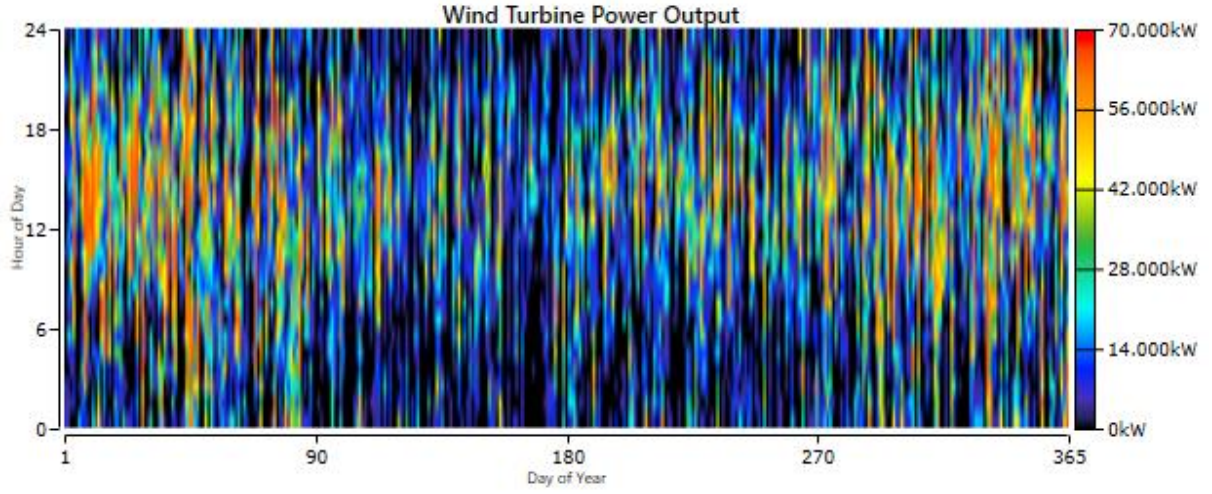
Batarya kullanımı her zaman geri durulan bir durumdur. Özellikle şebekeden bağımsız sistemler için vazgeçilmez bir komponent olan batarya, sistem maliyetini artırmaktadır. Ancak sistemde batarya kullanımı maliyeti yükseltse de üretimin düşük olduğu veya pik seviyedeki enerji taleplerine rahatlıkla cevap verebilmenin önünü de açmaktadır. Özellikle 137 \$/kW değerlerine kadar düşen batarya maliyeti sistemlerde kullanımı daha cazip kılmaktadır.

Aşağıdaki yıllık bazda şarj durumu grafiği görülmektedir. Grafikte ilk 3 ay ve son 3 ayda batarya şarj durumunun %100'lere çok yakın hatta %100 olduğu dönemler olduğu görülmektedir. Özellikle bu süre dışında %0 ve civarındaki seviyelerin yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi; kış aylarında rüzgâr hızının, güç yoğunluğunun artışa geçmesi, buna bağlı olarak dispatch kısmında LF seçeneğiyle işleyen sistemin jeneratörün bataryayı doldurmadığı kısımları rüzgâr türbininden üretilen enerjinin doldurmaya çalışmasıdır. Kış aylarında bu oranın artarken, yaz aylarında azalmaktadır. Bu da dolaylı yoldan batarya şarj durumunu etkilemektedir. Tüm bu durumların sonucu olarak, bataryanın şarj durumu ne kadar az seviyelerde olursa ihtiyaç durumlarında cevap verme durumu o derecede azalacak veya artacaktır. Diğer taraftan bataryanın CC (cycle charging) seçeneğinde çalışması, ortalama rüzgâr hızının 8 m/s olarak baz alınarak üretimin sadece rüzgâr türbininden yapıldığı hassasiyet analizinde, birim enerji maliyeti %51 oranında azalma göstermektedir. Bunun temel sebebi, CC seçeneğinde bataryanın şarj seçeneğinde olmasıdır. Rüzgâr türbinine göre az üretim yapan jeneratör devreden çıktığı için birim enerji maliyeti düşmüştür. Çünkü jeneratörün olduğu hassasiyet analizinde LF seçeneğinde dispatch durumu baz alınmıştır.

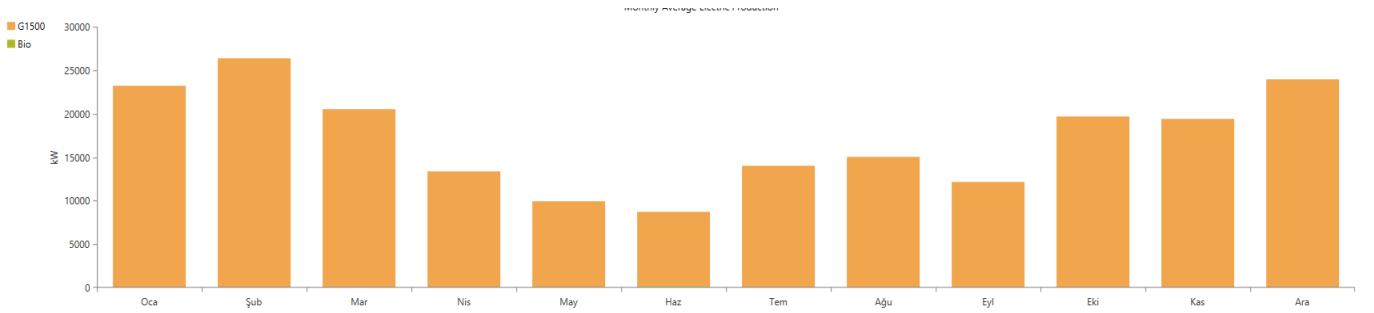


Şekil-13: Yıllık bazda günün her saati için batarya şarj seviyesi oranları.

3.2. Rüzgâr Hızının Sisteme Olan Etkisi:



Şekil-14: Yıllık bazda günün her saati için rüzgâr enerji üretimi.

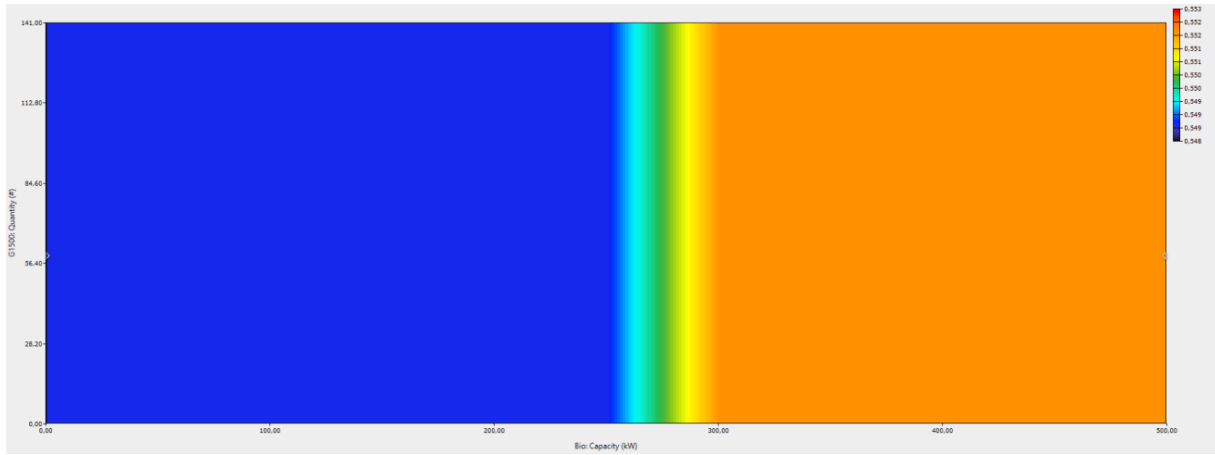


Şekil-15: Yıl boyunca rüzgâr türbinin elektrik üretimi.

Rüzgâr türbinleri farklı rüzgâr hızı potansiyeline sahip alanlara konumlandırılarak 3 m/s, 5.75 m/s ve 8 m/s hızlarında ayrı ayrı simüle edilmiştir. Ortalama rüzgâr hızı en optimum simülasyon seçeneği için 5.75 m/s olarak baz alınmıştır. Yukarıda yer alan şekilde görüldüğü üzere rüzgâr potansiyelinin yüksek olduğu durumlarda sistemdeki enerji üretiminin %100'e yakını rüzgâr türbini tarafından tek başına karşılanmaktadır. Gün içerisindeki saatlerde 17-18 m/s deki hızları gördüğü de tespit edilmiştir. Rüzgâr türbininden olan üretim çok yüksek olması birim enerji maliyetini düşürmektedir. Bu oran %51 (0.501 TL'den 0.281 TL'ye düşüş) seviyelerindedir. Yarı yarıya birim enerji maliyet düşüşü sistemin kurulum maliyetlerini de etkileyecektir.

3.3. Biyogaz Jeneratörünün Sisteme Olan Etkisi:

Aşağıdaki grafik incelendiğinde, birim enerji maliyetinin biyokütle tesis kapasitesine diğer bir ifadeyle biyogaz jeneratörüne bağlı olarak değişmektedir. Biyokütle tesis kapasitesi 250 kW değerinden sonra 0.549 TL birim enerji maliyetini aşmaktadır. 300 kW üstündeki kapasitelerde 0.552 TL olduğu görülmektedir. 250-300 kW değerleri arasında bir kapasite seçmenin çok mantıklı olmadığı görülmektedir. Çünkü sistem en ufak kapasite değişikliğinde birim enerji maliyetinde değişikliklere sebep olmaktadır. Kapasite artsa da birim enerji maliyetinin belli sınırlar içinde sabit kalması optimum seviyelerde çalışmada ekonomik açıdan fayda sağlayacaktır. Ayrıca, biyokütle tesislerinde gerekli olan kapasiteden fazlasının tasarlanması ekonomik açıdan sıkıntı teşkil etmektedir. Kapasiteden az yapılması söz konusu olduğunda, diğer bir ifadeyle, kapasitenin yeterli gelmeyip artırılma durumu söz konusu olduğunda ekonomik zararı söz konusu değildir. Biyokütle tesislerinde sistem üzerindeki en önemli etkilerinden biri de budur.



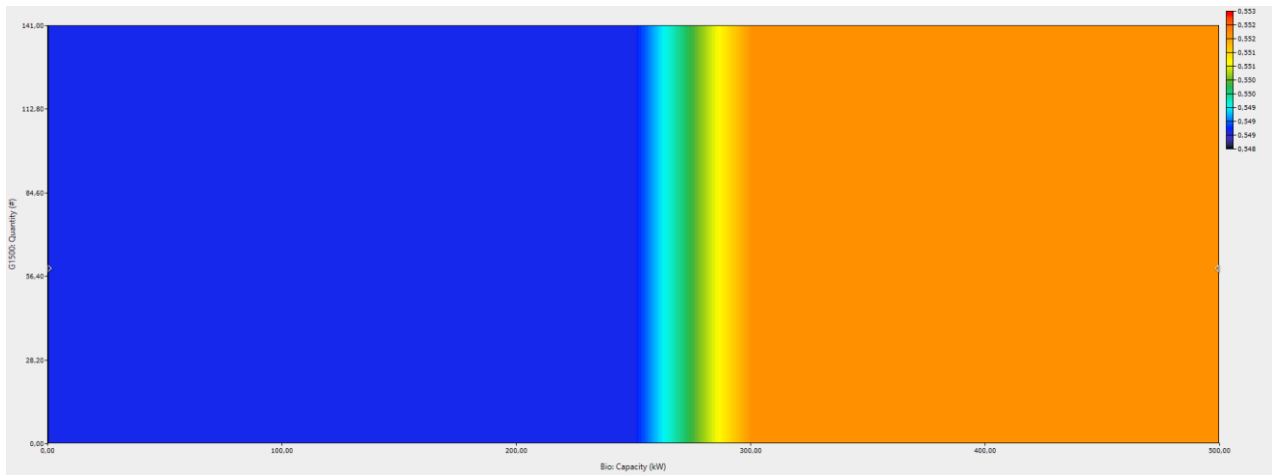
Şekil-16: Birim enerji maliyetinin, biyokütle üretim kapasitesi optimizasyon hassasiyet grafiği.

4. Tüm Optimizasyon ve Hassasiyet Verileri için Analiz

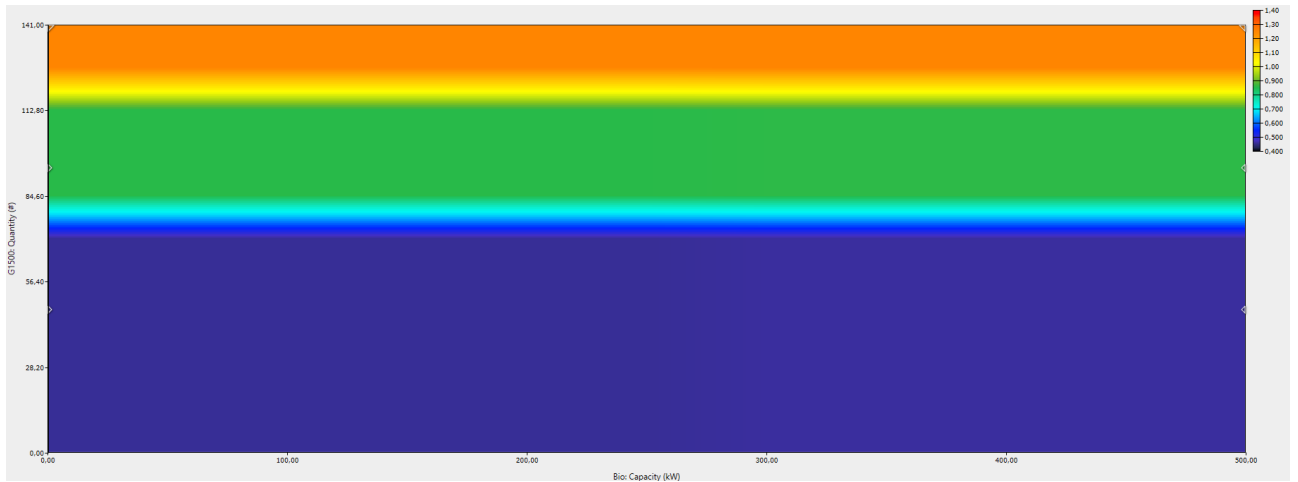
Sensitivity				Architecture										Cost				System	
LGChem9.8 Minimum Lifetime (years)	PV Derating (%)	Wind Scaled Average (m/s)	Biomass Scaled Average (tonne/day)				PV (kW)	PV-MPPT (kW)	G1500	Bio (kW)	LGChem9.8	Converter (kW)	Dispatch	COE (t)	NPC (t)	Operating cost (t/yr)	Initial capital (t)	Ren. Frac. (%)	Total Fuel (L/yr)
10.0	80.0	5.75	182						43	500	59.216	29.091	LF	€0.501	€716M	€11.7M	€490M	100	613
10.0	80.0	8.00	182						23	500	25.480	27.069	CC	€0.258	€370M	€5.83M	€258M	100	0
5.00	80.0	5.75	182						43	500	59.216	29.091	LF	€0.501	€716M	€11.7M	€490M	100	613
5.00	80.0	8.00	182						23	500	25.480	27.069	CC	€0.258	€370M	€5.83M	€258M	100	0
10.0	80.0	5.75	192						43	500	59.216	29.091	LF	€0.501	€716M	€11.7M	€490M	100	613
10.0	80.0	8.00	192						23	500	25.480	27.069	CC	€0.258	€370M	€5.83M	€258M	100	0
5.00	80.0	5.75	192						43	500	59.216	29.091	LF	€0.501	€716M	€11.7M	€490M	100	613
5.00	80.0	8.00	192						23	500	25.480	27.069	CC	€0.258	€370M	€5.83M	€258M	100	0
10.0	80.0	5.75	201						43	500	59.216	29.091	LF	€0.501	€716M	€11.7M	€490M	100	613
10.0	80.0	8.00	201						23	500	25.480	27.069	CC	€0.258	€370M	€5.83M	€258M	100	0
5.00	80.0	5.75	201						43	500	59.216	29.091	LF	€0.501	€716M	€11.7M	€490M	100	613
5.00	80.0	8.00	201						23	500	25.480	27.069	CC	€0.258	€370M	€5.83M	€258M	100	0

Şekil-17: Farklı batarya ömrü, rüzgâr hızı, biyokütle hassasiyet analizi sistem verileri.

Yukarıdaki tablo incelendiğinde farklı hassasiyet verilerinin yer aldığı durumların olduğu görülmektedir. PV azaltma faktörünün hassasiyeti sistemi en optimum seçenek için etkilememektedir. Çünkü PV kullanımı uygun değildir. Batarya ömrünün hassasiyeti ise, sistemi birim enerji maliyeti, rüzgâr türbini kullanım sayısı ve üretim miktarı, biyogaz jeneratörünün elektrik üretim miktarı gibi parametreleri etkilememektedir. Bunun sebebi, en optimum sistemde elektrik üretiminin %99.9 kadarlık kısmı rüzgar türbinlerinde sağlandığı için jeneratörün payının çok az olmasıdır. Çünkü jeneratörün tam kapasitede çalışıp fazla miktarı bataryaya doldurup doldurmama durumu (LF veya CC) sistemi bütünsel olarak etkileyecek derecede etki göstermemektedir.



Şekil-18: Birim enerji maliyetinin, rüzgâr türbin sayısı ve biyokütle üretim kapasitesi karşılaştırmasındaki optimizasyon hassasiyet grafiği (batarya dizisi: 12,953 adet)



Şekil-19: Birim enerji maliyetinin, rüzgâr türbin sayısı ve biyokütle üretim kapasitesi karşılaştırmasındaki optimizasyon hassasiyet grafiği (batarya dizisi: 25,906 adet)

Bataryanın sistemin bütünü üzerindeki etkisini gözlemlemek için hassasiyet tablosu yerine optimizasyon hassasiyet grafiği incelenerek bataryanın dizi sayısının hangi parametrelerde olduğu görülebilmektedir. Şekil-18 ve şekil-19 karşılaştırması yapıldığında dizi sayısının az olması durumunda, birim enerji maliyeti rüzgâr türbin sayısı yerine biyokütle tesis kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Biyokütle tesis kapasitesi 250-300 kW arasında bir geçiş yaşamaktadır. 250 kW öncesinde 0.549 TL iken, 300 kW üstündeki kapasitelerde 0.552 TL olduğu görülmektedir. Bu da biyokütle kapasite tesisinin büyüklüğüne bağlı olduğu için maliyeti yükselttiği görülebilmektedir. Birim enerji maliyetinin daha düşük seviyelerde olması ve üretimin emisyon değerlerini düşürmek için rüzgâr türbin üzerinden üretimin Gökçeada için en iyi seçenek olduğu bilgisini ortaya koymaktadır.

Diğer seçenek olan batarya dizisinin 12,953 adet koşulu seçildiği zaman (şekil-20) bu sefer biyokütle tesis kapasitesi yerine rüzgâr türbini kapasitesine bağlı olarak birim enerji maliyeti değişmektedir. Biyokütle tesisi kapasitesi arttıkça birim enerji maliyeti de artmaktadır. 75 adet rüzgâr türbinine kadar 0.6 TL olurken, 75-120 adet arasında bir geçiş eğrisi olmaktadır. 120 adetten sonra 1.30 TL seviyelerine çıktığı tespit edilmiştir. Fazla rüzgâr türbini maliyeti fazla artırmaktadır. Çünkü rüzgâr türbini kurulum maliyetleri ve bakım-onarım maliyetleri yüksek olduğu için biyokütle tesis kapasite etkisinden daha fazla artış oranına sebep olmaktadır.



Şekil-20: Rüzgâr hızı ve biyokütle ton/gün değerine bağlı hassasiyet analizinin grafiği

Yukarıdaki grafik incelendiğinde 7.5 m/s ortalama rüzgar hızına kadar rüzgar türbini-biyogaz jeneratörü-batarya sisteminin uygun olduğunu, 7.5 m/s ortalama rüzgar hızından sonraki kısımda rüzgar türbinin ürettiği elektrik gücünün ihtiyacı rahatlıkla karşılayabilmesi sebebiyle biyogaz jeneratörüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu durum emisyon değerlerini sıfıra çekmek

için ideal bir sistem olabilir. Ancak bunun için ortalama rüzgâr hızının sürekli 7.5 m/s ve üzerindeki değerlerde olması gerekmektedir. Gökçeada ortalama rüzgâr hız potansiyeli 7.5 m/s seviyesini sağladığı için bu ideal durum devreye sokulabileceğı görölmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada elektrik şebekesinden uzakta olan, Türkiye ana kara parçasından uzakta olan bir adanın ihtiyaının karşılanması, kendi kendine ihtiyaını karşılayabilecek durumda tasarlanması için yapılmıştır. Güneş radyasyon değerleri, rüzgâr hız değerleri, biyokütle değerleri ve kullanılacak komponentlerin gerekli verileri HOMER programına tanımlanarak hassasiyet verileri ile birlikte simölasyon analizleri yapılmıştır. Ortaya çıkan simölasyon sonuçlarına göre kurgulanan bu sistemin en optimum sonucu “rüzgâr türbini, biyogaz tesisi, batarya, konverter” komponentleri içeren sistemin uygun olduğı görölmüştür. En optimum sistemin birim enerji maliyeti 0.501 TL, bugünkü net fiyatı 716 milyon TL, yatırım maliyeti 490 milyon TL, operasyon maliyeti 11.7 milyon TL olarak tespit edilmiştir. Mevcut durumda Gökçeada içerisinde şebeke hattı olması şebekeden ihtiyaç olduğunda karşılanabilmekteyken, yapılan bu çalışma sonrası şebeke hattı bakım-onarım, arızalara yapılacak müdahaleler, hat yenileme gibi çeşitli harcamaları ortadan kaldırarak kendi ihtiyaını karşılayabilecek %100 yenilenebilir bir sistem kurgulanmıştır. Gökçeada’nın Türkiye sınırları içerisinde en yüksek rüzgâr potansiyele sahip bir bölge olması gerektiğinde sadece rüzgâr türbinlerinden elektrik üretimi yapılarak enerji ihtiyaına karşılık verebileceğı de görölmüştür. İlk yatırım maliyetinin rüzgâr türbinleri için yüksek olması sistemin toplam maliyet değerini de oldukça yükseltmektedir. Birim maliyetlerin düşmesi ilerleyen yıllarda toplam maliyeti düşürecektir. Yenilenebilir enerjinin kullanımı ne kadar çok artarsa, yaygınlaşma oranına paralel olarak maliyeti de ters orantıyla düşürecektir. Teşvikler, yenilenebilir enerjiyi desteklediğı sürece bu oran da artacak ve maliyet düşürölmesine destek sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- [1]Gökçeada Rehberi (2019). Gökçeada nüfus dağılımı. (<https://www.gokceadarehberim.com/nm-N%C3%BCfus-cp-91>)
- [2]Gökçeada Rehberi (2019). Gökçeada coğrafiyası. (<https://www.gokceadarehberim.com/nm-Co%C4%9Frafya-cp-90>)

- [3] Yılmaz, U., Demirören, A., Zeynelgil, L.H., (2010). Gökçeada'da Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyelinin Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 13(3); 215-223.
- [4] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Resmî Web Sitesi (<https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>)
- [5] Güney Marmara Kalkınma Ajansı, Çanakkale Enerji Sektörü Yatırım Rehberi 2014-2023.
- [6] Anadolu Haber Ajansı, 2020 (https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/gokceada-ve-bozcaada-kendi-elektrigini-uretecek/1873030?fbclid=IwAR0WLCrK2-PG_A_DZHLKIXRjU364uLiKSaXM095XLo123j3LuL9wh1PGj8o)
- [7] TEDAŞ 2019 Türkiye Elektrik Dağıtım Sektör Raporu.
- [8] T.C. Merkez Bankası
(<https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+menu/istatistikler/enflasyon+verileri>).
- [9] T.C. Merkez Bankası
(<https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB%20TR/Main%20Menu/Duyurular/Basin/2020/DUY2020-75>).
- [10] Taktak, F., İli, M., (2018). Güneş Enerji Santrali (GES) Geliştirme: Uşak Örneği. *Geomatik Dergisi*, 3(1); 1-21.
- [11] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı YEGM Web Sitesi (<https://www.yegm.gov.tr>).
- [12] U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018, National Renewable Energy Laboratory (NREL)
- [13] Şenel, M.C., Koç, E., (2015). Dünyada ve Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi Durumu- Genel Değerlendirme, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 56(663); 46-56.
- [14] “Weather Guard” (<https://weatherguardwind.com/how-much-does-wind-turbine-cost-worth-it/>)
- [15] Development of an Operations and Maintenance Cost Model to Identify Cost of Energy Savings for Low Wind Speed Turbines, National Renewable Energy Laboratory (NREL)
- [16] Bayraç, H.N., Özarslan, B., (2018). Biyokütle Enerjisi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkinin Ampirik Bir Analizi: Türkiye Örneği. *Yalova Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(17); 1-17.
- [17] Gülen, J., Arslan, H., (2005). Biogaz, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 4(1), 121-129.
- [18] TC. Gökçeada Belediyesi, Evsel Katı Atık Tarifelerinin Belirlenmesine Yönelik Rapor (2010).
- [19] Güney Marmara Kalkınma Ajansı - Bozcaada & Gökçeada Değerlendirme Raporu (2012).
- [20] Arslan, H., Bircan, H., Eleroğlu, H., (2018). Aras ve Copras Yöntemleriyle Yozgat İlinde Kurulabilecek Biyogaz, Kompost, Vermikompost Tesislerinin Optimallik Sıralaması. *Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(12): 1844-1852.

- [21] Ahiler Kalkınma Ajansı, Kırşehir İlinde Hayvansal Gübreden Biyogaz ve Enerji Potansiyelinin Araştırılmasına Yönelik Saha Etüt Raporu (2017).
- [22] Çevik, A., (2016). Çanakkale İlindeki Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Değerlendirilmesi. Onsekiz Mart Üniversitesi *Yüksek Lisans Tezi*.
- [23] Salihoğlu, N.K., Teksoy, A., Altan, K., (2019). Büyükbaş ve Küçükbaş Hayvan Atıklarından Biyogaz Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi: Balıkesir İli Örneği, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 8(1), 31-47. doi: 10.28948/ngumuh.516798.
- [24] Bloomberg NEF, 2020 (<https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>).