

Hidrojen Depolamalı Bir Mikroşebekenin Tekno-Ekonomik Analizi: Devegeçidi Sulama Barajı Örneği

Technoeconomic Analysis of a Microgrid with Hydrogen Storage: A Case Study of Devegeçidi Watering Dam

¹Elifnur BAYRAKTAR , ²Faruk BARLAZ , ³Yahya AKIL , ⁴Hüsnügül TEKİN , ⁵Servan MARŞİL ⁶Cem HAYDAROĞLU , ⁷Heybet KILIÇ

^{1,2,4,5}Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, Türkiye

^{3,7}Elektrik Enerjisi ve Enerji Bölümü, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır 21280, Türkiye

⁶Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır 21280, Türkiye

¹elifnurbayraktargunes@gmail.com, ¹faruk.barlaz@dicle.edu.tr

²yahya.akil@dicle.edu.tr, ¹tekin.husnugul@gmail.com

¹serwanmarsil@gmail.com, ³cem.haydaroglu@dicle.edu.tr

²heybet.kilic@dicle.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 8 August 2024

Accepted : 11 November 2024

Keywords:

Devegeçidi Irrigation Dam,
Hybrid Energy System,
Technological and Economic
Analyzes, HOMER Pro
Software

ABSTRACT

Irrigation dams play a vital role in agricultural productivity and water management. Incorporating renewable energy reduces both energy costs and environmental impacts. This study presents a hybrid energy system designed for the Devegeçidi Irrigation Dam in Diyarbakır, analyzed using HOMER Pro software. The photovoltaic system produces 312,678 kWh annually, with a Renewable Fraction (RF) 96,5%. Economic analysis results show a Levelized Cost of Energy (LCOE) of \$0,3442, Net Present Cost (NPC) of \$306,321.20, and CO₂ emissions of 7,166 kg/year. The inverter operates with an annual output of 255,177 kWh and a capacity factor of 29,1%. Hydrogen production reaches 4,260 kg/year, with a year-end storage level of 400 kg. The Internal Rate of Return (IRR) is around 11,39%, while the Return on Investment (ROI) is 14,57%. The system is a sustainable and profitable investment over its 25-year lifespan, utilizing solar and hydrogen technologies.

© 2025 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 8 Ağustos 2024

Kabul : 11 Kasım 2024

Anahtar Kelimeler:

Devegeçidi Sulama Barajı,
Hibrit Enerji Sistemi,
Teknolojik ve Ekonomik
Analizler, HOMER Pro
Yazılımı

ÖZET

Sulama barajları, tarım verimliliği ve su yönetimi için kritik öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji entegrasyonu ise enerji maliyetlerini düşürüp çevresel etkileri azaltır. Bu çalışmada, Diyarbakır'daki Devegeçidi Sulama Barajı için hibrit bir enerji sistemi tasarlanmış ve analiz edilmiştir. HOMER Pro yazılımı ile tasarlanan sistemin analizlerine göre, fotovoltaiik sistem yılda 312,678 kilowatt saat (kWh) enerji üretmiş, Yenilenebilir Enerji Oranı (RF) %96,5 olarak belirlenmiştir. Sistemin Dengelenmiş Enerji Maliyeti (LCOE) \$0,3442, Net Bugünkü Maliyeti (NPC) \$306,321.20 ve CO₂ emisyonu 7,166 kg/yıl olarak kaydedilmiştir. İnvertör %29,1 kapasite faktörüyle yılda 255,177 kWh enerji üretmiştir. Yıllık hidrojen üretimi 4,260 kg olup, yıl sonunda 400 kg depolanmıştır. İç Getiri Oranı (IRR) %11,39, Yatırım Getirisi (ROI) %14,57 olarak hesaplanmıştır. Sistem 25 yıllık proje ömrü ile, güneş ve hidrojen teknolojileriyle birlikte çevresel sürdürülebilirliği ve yüksek ekonomik geri dönüşü olan bir yatırım olarak değerlendirilmektedir.

© 2025 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayımlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: ¹0009-0005-3512-9263 ²0009-0003-2703-0234

³0000-0002-7497-6458 ⁴0000-0002-9817-9373

⁵0009-0005-5683-0171 ⁶0000-0003-0830-5530

⁷0000-0002-6119-0886

1. GİRİŞ

Yarı kurak bir iklime sahip olan Türkiye’de, özellikle yaz aylarında yaşanan su kuraklığı tüm canlılar için önem arz etmektedir [1]. Yaşanan su kuraklığı tarımsal işletmelerdeki su ihtiyacı başta olmak üzere yaşamı önemli derecede etkilemektedir. Bu probleme çözüm olarak, su kaynaklarının geliştirilmesi kapsamında sulama barajlarının inşası tarımsal üretim açısından büyük önem taşımaktadır [2]. Sulama barajlarının ana görevi, bölgede var olan tarım alanlarının verimliliğinin artırılmasıdır. Bahsedilen sulama barajları; tarımın sürdürülebilirliği açısından kışın akarsu yataklarındaki suların barajlarda depolanarak ihtiyaç duyulan yaz aylarında sulama amacıyla üreticiye kullandırılması yönünde fayda sağlamaktadır [3]. Sulama barajları tarımsal verimliliği artırarak hem ekonomik yarar sunmakta hem de kırsal alanların sosyo-ekonomik gelişmesi açısından önem taşımaktadırlar [4]. Sulama barajlarının enerji tüketimi, sulama sistemlerinin çalıştırılması ve suyun pompalanması için gerekli olan enerji ile ilgilidir. Bahsedilen enerji tüketimi; barajın büyüklüğüne, sulama alanının genişliğine, kullanılan sulama yöntemlerine ve barajın coğrafi konumuna bağlı olarak değişiklik gösterebilir [5].

Sulama barajlarının birçok faydası olmasına rağmen; çevresel etkiler, sosyoekonomik etkiler, teknik ve yapısal sorunlar ve su kullanımı yönetimi gibi çeşitli olumsuz yönleri de bulunmaktadır [6].

Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları temiz, çevre dostu ve daha sürdürülebilir olmasından dolayı kullanıma teşvik için yeni stratejilerin dikkate alınması gerekmektedir [7]. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı’nın (IRENA) Yenilenebilir Kapasite İstatistikleri Mayıs 2024 raporuna göre, yenilenebilir enerji projelerinin kapasitesi geçen yıl 3 bin 869 Gigawatt (GW)’a ulaşarak son beş yılda %52 artmıştır. Mayıs 2024 itibarıyla yenilenebilir enerji kurulu gücü; rüzgar gücü: 46,42 GW, güneş enerjisi: 84,27 GW, biyokütle/kojenerasyon: 10,35 GW, küçük hidroelektrik enerjisi: 5 GW, büyük hidroelektrik enerjisi: 46,92 GW olarak belirtilmiştir [8].

Fotovoltaik sistemler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren teknolojik sistemlerdir. Güneş panelleri olarak da bilinen bu sistemler, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları arasında popülerdir [9]. Hidroelektrik santraller, suyun potansiyel enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren enerji üretim tesisleridir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidroelektrik santraller, dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Hidrojen teknolojisi; hidrojenin üretimi, depolanması ve kullanımı ile ilgilenen bir dizi yenilikçi teknoloji ve süreçleri kapsar. Hidrojen, temiz enerji üretimi için büyük bir potansiyele sahiptir çünkü yanması yalnızca su buharı üretir ve çevresel etkileri minimum düzeydedir [11].

Bahsedilen tüm bu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasın yanı sıra hidrojenin enerji sağlayıcı olarak kullanılmasının alternatif bir yol olabileceği düşünülmektedir. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha çevreci ve fosil yakıtlara bağımlılığı sıfıra indirecek bir teknolojidir [12].

Bahsedilen yenilenebilir enerji kaynaklarını uygulama sahası olan Diyarbakır genelinde değerlendirecek olursak; Diyarbakır’ın kırsal bölgelerinin elektrifikasyonuna yönelik çeşitli çalışmalarda, hidrojen enerjisinin sürekli artan yük talebine güvenilirlikle güç kaynağı sağlayabilen ve geleneksel güç kaynaklarının yerine etkili bir şekilde alternatif bir yol olabilen bir enerji olduğu saptanmıştır [13]. Dünya genelinde hibrit sistem analizi, Diyarbakır’da da baskın olarak kullanılması gereken çok yönlü yöntemlerden biri olup hibrit sistem tekniği, yenilenebilir enerji kaynaklarının birçok sistem konfigürasyonunu içermektedir [14-15]. Bahsedilen çalışma HOMER Pro yazılımı kullanılarak hibrit enerji santralleri ile elektrik üretiminin maliyetinin optimize edilmesiyle ilgilidir.

Bu çalışmada, mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarına alternatif oluşturabilecek ve bu kaynakların yerini alabilecek yenilenebilir enerji kullanımının teşvik edilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada HOMER Pro yazılımını kullanarak Diyarbakır Devegeçidi Sulama Barajı civarındaki arazi için hidrojen ve güneş enerji teknolojilerinin tekno-ekonomik analizini yapmak ve yenilenebilir enerji sistemlerini optimize etmek asıl hedeftir. Bu araştırmanın yeniliği; hidrojen enerjisi ve güneş enerjisi sistemlerinin optimizasyonuna ve var olan hidroelektrik enerji sisteminin konfigürasyonlarına odaklanmasıdır. Bu analizde, Diyarbakır’ın 20 kilometre kuzeybatısında yer alan “Devegeçidi Sulama Barajı”, hidroelektrik santral bulunan şebekeye güç yedeği ve hidrojen depolama sisteminin tekno-ekonomik analizi için seçilmiştir.

2. METERYAL VE METOD

HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources), enerji sistemlerinin tasarımı, optimizasyonunu ve ekonomik analizini gerçekleştirmek için kullanılan bir yazılımdır [16]. Bu platform, yenilenebilir enerji kaynaklarını, şebeke bağlantılarını, enerji depolama sistemlerini ve diğer güç kaynaklarını bir arada incelemektedir [17]. Elektrik üretim sistemleri, mikro şebekeler ve hibrit enerji sistemlerinin simülasyonunda etkili bir araçtır [16-17]. Bu çalışmada HOMER Pro’nun tercih edilme sebebi, sistemin çeşitli bileşenlerini (PV, hidroelektrik, elektrolizör, invertör, hidrojen depolama gibi) optimize etmesi ve bu bileşenlerin ekonomik performansını analiz edebilmesidir. HOMER Pro, karmaşık enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik analizini yaparak, maliyet etkinliği ve çevresel etkiler gibi önemli veriler sunmaktadır [18]. Ayrıca, enerji kaynakları ve depolama çözümlerinin performansını en iyi şekilde değerlendirebilecek gelişmiş bir simülasyon ortamı sağlamaktadır [17-18]. HOMER Pro üzerinde şemalandırılmış hibrit yenilenebilir enerji sisteminde kullanılan bileşenler aşağıdaki görselde gösterilmiştir. Bu çalışma için seçilen tesis Devegeçidi Sulama Barajı (38°3.5 N ve 39°59.2 E), Kayapınar Mahallesi, Diyarbakır’dır ve baraj sulama amacıyla kullanılmaktadır [19].

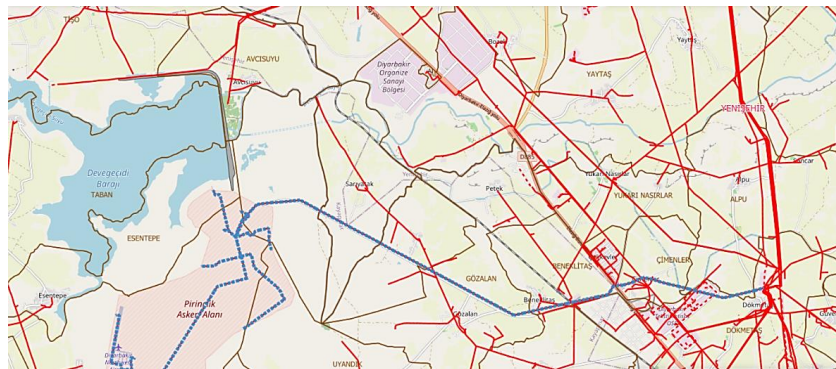
Baraj, sulama amaçlı olarak kaya topuklu toprak dolgu tipinde inşa edilmiş ve 1972 yılında işletmeye açılmıştır [20]. Barajın aktif hacmi 211,80 hm³, maksimum işletme kotu 757 m ve minimum işletme kotu 739,50 m'dir ve baraj 12 bin 80 hektarlık alanın sulanması planlanarak tasarlanmıştır [19-20].

Ayrıca akarsu yatağından yüksekliği 32,80 m normal su kotunda göl hacmi 202,32 hm³ ve normal su kotunda göl alanı 32,14 km²’dir [21]. Önerilen sistemin değerlendirileceği saha, Devegeçidi Sulama Barajı civarındaki boş arazide aşağıda Şekil 1’de belirtilen görselde yer almakta olup sırasıyla 38°3.5 N ve 39°59.2 E koordinatlarına sahiptir [19].



Şekil 1. Devegeçidi barajının HOMER Pro ile Türkiye üzerindeki konumu ve tesisin harita görünümü.

Devegeçidi Sulama Barajı'nın bağlı olduğu Devegeçidi fiderinin teknik bilgileri Dicle Elektrik A.Ş. tarafından kullanılan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) aracılığıyla sağlanmıştır. CBS, yeryüzüne ait bilgileri belirli bir amaca yönelik olarak toplama, bilgisayar ortamında depolama, güncelleştirme, kontrol etme, analiz etme ve görüntüleme gibi işlemlere olanak sağlayan bir karar destek sistemidir [22]. Devegeçidi fiderinin CBS sisteminde yer alan görüntüsü Şekil 2'de mavi çizgilerle belirtilmiştir.



Şekil 2. Devegeçidi fiderinin CBS sisteminde yer alan görüntüsü.

CBS kullanımının sağladığı avantajlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- **Arıza Yönetimi:**
CBS ile hangi hattın arızalandığı anında tespit edilerek, ekiplerin yönlendirilmesi gereken bölge hızla belirlenebilir [22].
- **Bakım:**
CBS, bakım ihtiyacı olan hatları veya trafo merkezlerini izleyerek enerji akışında kesinti yaşanmamasını sağlar [22].
- **Yük Yönetimi:**
Farklı bölgelerdeki elektrik tüketimini takip ederek trafo merkezlerinin yük dengesini optimize eder, böylece enerjinin daha verimli kullanılmasına katkı sağlar [22].

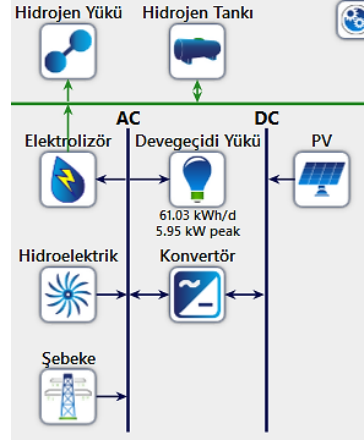
Devegeçidi fiderinin bağlı olduğu trafo merkezinin CBS sistemindeki görüntüsü Şekil 3’de mavi çizgi ile belirtilmiştir.

Devegeçidi Sulama Barajı'nın bağlı olduğu Devegeçidi fiderinin; müşteri tesislerinde o ay içinde 15 dakikalık (periyot süresi ayarlanabilir) periyotlarda çekilen en büyük anı gücü (kilowatt -kW- cinsinden) demand olarak ifade edilmekte olup bu veriler aşağıdaki görselde yer almaktadır [23]. Veriler yine Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş. tarafından Inavitas denilen sistem aracılığıyla sağlanmıştır. Inavitas; enerji yönetimi ve izleme çözümleri sunan bir platform olup elektrik dağıtım ağları, endüstriyel tesisler, güneş enerjisi santralleri ve binalar için akıllı enerji yönetim sistemleri geliştirir [24]. Bu sistemler, enerji tüketimini izleyip optimize eder, verimliliği artırır ve maliyetleri düşürmeye yardımcı olur ve kullanıcıların enerji kaynaklarını daha etkin kullanmalarını sağlar ve operasyonel mükemmellik hedefler.

Enerji üretimi, dağıtımı ve tüketimini daha verimli hale getirerek çevresel sürdürülebilirliği destekler [24].

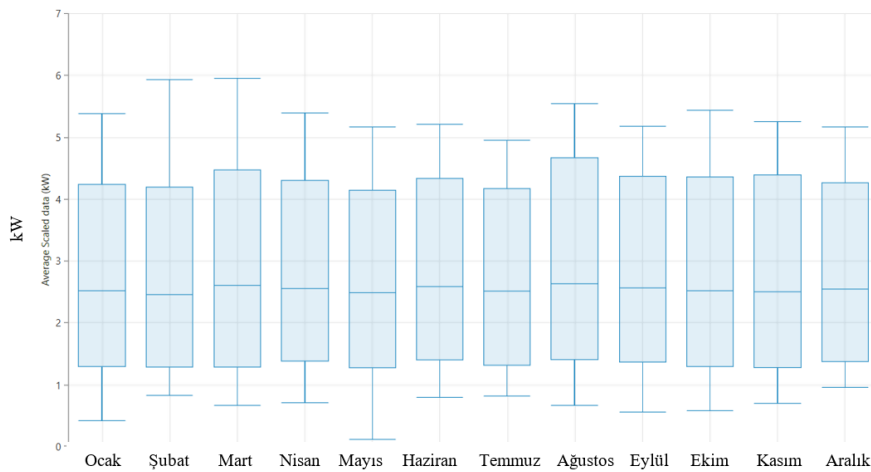
Tablo 1. Devegeçidi fiderine ait demand verileri

Ay	Tüketim
Ocak 2023	400,266 MWh
Şubat 2023	380,440 MWh
Mart 2023	286,990 MWh
Nisan 2023	230,191 MWh
Mayıs 2023	212,096 MWh
Haziran 2023	240,877 MWh
Temmuz 2023	291,835 MWh
Ağustos 2023	319,699 MWh
Eylül 2023	245,120 MWh
Ekim 2023	186,362 MWh
Kasım 2023	257,868 MWh
Aralık 2023	310,580 MWh

**Şekil 5.** HOMER Pro yazılımı ile oluşturulmuş hibrit yenilenebilir enerji sistemi konfigürasyonu

3.1. Ortalama Elektrik Yüğü Talebi

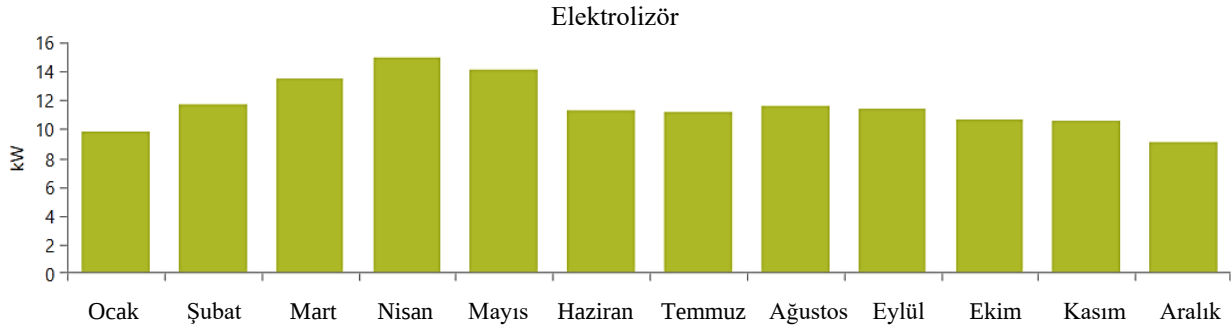
Bu hibrit yenilenebilir enerji sistemi için, en iyi çıktıya ve en düşük maliyete sahip optimize edilmiş sistemi belirlemek amacıyla, 2023 yılı Ocak ayını baz alarak veri seti kullanılmıştır. Bu veriler, HOMER Pro programında girilen elektrik yüküne dayalı olarak sistemin ortalama yük talebini tahmin etmek için kullanılır [26]. Ortalama elektrik yükü HOMER Pro'da hesaplanmış olup, sistem sonuçlarına göre yük profili gün boyunca sabah saatlerinden itibaren artış göstermekte ve akşam saatlerinde de en yüksek değere ulaşmaktadır. Ortalama yük 0.67 kW civarında olup, genelde düşük yükte çalışmaktadır. Adanın aylık ortalama elektrik yükü Şekil 6'da sunulmaktadır.

**Şekil 6.** Devegeçidi sulama barajının aylık ortalama elektrik yükü.

3.2. Elektrolizör Analizi

Elektrolizör, hidrojen üretiminin merkezi elemanıdır [27]. Sistemde kullanılan elektrolizör 250 kW'lık kapasitesi ile bu değer maksimum giriş gücünü ifade etmektedir. Elektrolizörün yıl boyunca ortalama giriş gücü 22,6 kW olarak gözlemlenmiştir. Elektrolizörün ortalama hidrojen üretimi saatte 0,486 kg olarak hesaplanmıştır. Yıl boyunca üretilen toplam hidrojen miktarı 4,260 kg olarak ortaya çıkmıştır. Aşağıda Şekil 7'deki grafikte

elektrolizörün yıl boyunca farklı zaman dilimlerinde ne kadar enerji harcadığı gözlemlenmektedir. Giriş gücü genellikle 20-60 kW arasında seyretmiş, nadiren daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Giriş gücünün belirli dönemlerde arttığı ve azaldığı gözlemlenmiştir. Bu, yenilenebilir enerji kaynaklarının (örneğin PV sisteminin) üretim düzeyine ve enerji talebine bağlı olarak elektrolizörün çalışma sıklığını gösterir. Aylara göre hidrojen üretimi Şekil 7’de sunulmaktadır.

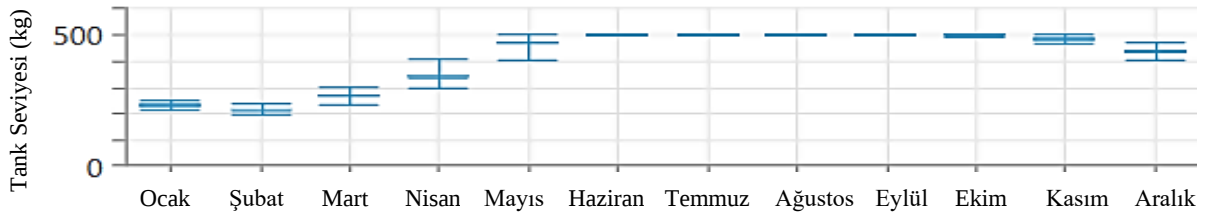


Şekil 7. Aylara göre kullanılan elektrolizörün kW cinsinden değerleri.

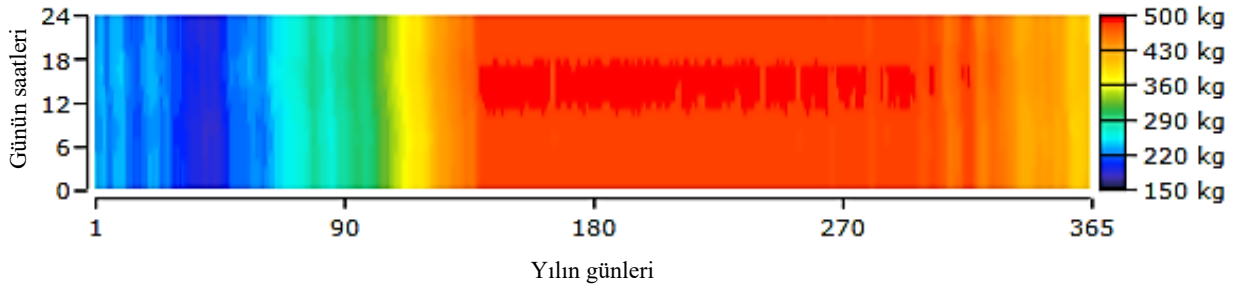
3.3. Hidrojen Tankı Analizi

Hidrojen tankı, hidrojen gazını güvenli bir şekilde depolamak amacıyla özel olarak tasarlanmış bir kaptır [25]. Bu tanklar, hidrojenin yanıcı ve patlayıcı özellikleri göz önünde bulundurularak son derece dayanıklı ve güvenlik donanımlarıyla güçlendirilmiştir [25]. Hidrojen tanklarda üç şekilde depolanır; sıkıştırılmış hidrojen, sıvılaştırılmış hidrojen ve metal hidritler olarak depolanabilmektedir [26].

Yapılan simülasyonda elektrolizör tarafından üretilen hidrojen, 500 kg’lık bir hidrojen tankında depolanmıştır. 500 kg’lık hidrojen, yaklaşık 16 bin 667 kWh enerji depolama kapasitesine karşılık gelmektedir. Bu enerji, daha sonra elektrik üretimi veya başka bir enerji ihtiyacı için kullanılabilir [25-26]. Tank Otonomisi yani hidrojen tankının tam dolu halde sistemin enerji talebini karşılayabileceği süre, 6 bin 554 saat olarak hesaplanmıştır [26]. Şekil 8 ve Şekil 9’daki görsele göre; yıl sonuna kadar hidrojen tankı dolu kalmış ve üretim ile tüketim dengesi sağlanmıştır. Yıl başında 250 kg olan hidrojen, yıl sonunda 400 kg’a yükselmiştir. Hidrojen tankına ait spesifikasyon parametreleri Şekil 8 ve Şekil 9’da gösterilmektedir.



Şekil 8. Hidrojen tankının aylara göre doluluk oranı.



Şekil 9. Hidrojen tankının yılın günleri ve günün saatlerine göre değerleri.

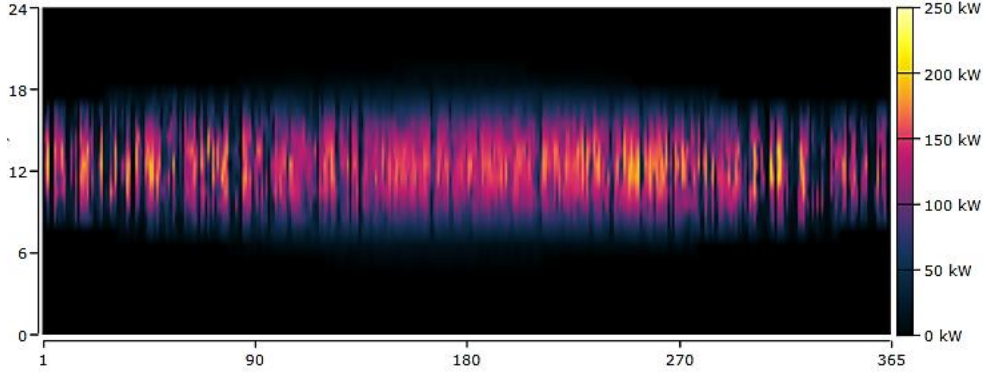
3.4. Güneş Paneli Analizi

Bir PV dizisinin güç üretimi aşağıdaki gibi ifade edilir [28].

$$P_{PV} = n_{PV} U_{PV} i_{PV} \quad (1)$$

Tasarlanan sistemde; Nominal kapasite (sistemin maksimum gücü) 200 kW, yıl boyunca sistemin ortalama güç çıkışı 35,7 kW, PV sistem günlük ortalama 85,7 kWh elektrik üretmiştir. PV sistemi, yıl boyunca toplam 312,678 kWh enerji üretmiştir. Bu değer, sistemin yenilenebilir enerji üretim kapasitesini gösterir ve şebekeye verilen enerji

miktarına katkı sağlar [28]. Kapasite faktörü, sistemin kurulu kapasitesine kıyasla ne kadar süre maksimum verimde çalıştığını gösterir. Sistemdeki %17,8 kapasite faktörü, PV sisteminin güneş ışığı alımına bağlı olarak yılda %17,8 oranında tam kapasite çalıştığını ifade eder ve güneş enerjisi sistemleri için bu oranın oldukça iyi olduğu yapılan araştırma ve yorumlara dayalı olarak doğrulanmıştır [18]. PV sistemi, yıl boyunca toplam 4,384 saat çalışmıştır. Bu, güneşin olduğu saatlerde sistemin aktif olarak enerji ürettiğini gösterir [29]. Şekil 10'daki grafik; yıl boyunca PV sisteminden elde edilen güç çıkışı saatlik bazda gösterir. Özellikle yaz aylarında ve günün en yoğun güneş ışığı alan saatlerinde maksimum güç üretimi gözlemlenir. Kış aylarında ise üretim düşük kalmakta, ancak yine de önemli bir enerji katkısı sağlamaktadır. Bahsedilen tüm çıktılar aşağıda Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Kullanılan güneş paneline ait veriler.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bir sistemin uygulanabilirliğini değerlendirirken teknik, ekonomik ve çevresel faktörleri göz önünde bulundurmak önemlidir [29]. Sistemdeki teknik uygulanabilirlik açısından yorum yapılacak olursa; PV sistemi oldukça verimli çalışmakta, yıllık 312,678 kWh enerji üretmekte ve sistemin %96,5'lik bir yenilenebilir enerji katkısı sağlamaktadır. Teknik açıdan PV sisteminin uygulanabilirliği oldukça yüksektir. Hidrojen üretimi düzenli şekilde gerçekleşiyor ve enerji depolama açısından da sistem yeterli kapasiteye sahiptir. Ancak, hidroelektrik bileşeni tam olarak aktif çalışmadığı için (bunun sebebi de bölgedeki yük talebini diğer enerji kaynakları (PV ve hidrojen) karşıladığı için) hidroelektrik bileşeni aktif olmamaktadır. Ekonomik açıdan değerlendirilirse; LCOE düşük seviyede olup (\$0,3442/kWh), bu da sistemin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu gösteriyor [32]. İnvertörün yıllık enerji üretimi 255,177 kWh olarak hesaplanmış ve kapasite faktörü %29,1 olarak belirlenmiştir. Bu sistem invertör cihazının verimli bir şekilde çalıştığını ve sürekli enerji gösterdiğini göstermektedir [30]. Sistem için Net Bugünkü Maliyet (NPC) 306,321,20 \$ olarak belirlenmiş olup, bu da yatırımın başlangıç sermayesi ve işletme giderlerini kapsamaktadır [31]. Yatırım Getirisi (ROI) %14,57 ve İç Getiri Oranı (IRR) %11,39 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, sistemin ekonomik açıdan sürdürülebilir olduğunu ve yatırımın geri dönüşünün olumlu olduğunu göstermektedir [32]. Yedekleme maliyeti ve sermaye maliyetleri makul seviyelerde, bu da sistemin yatırım açısından uygulanabilirliğini artırır. Sistemi çevresel ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirecek olursak; sistem, yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük oranda dayanıyor, bu da çevresel sürdürülebilirlik açısından yüksek uygulanabilirlik sağlar. Karbon ayak izini azaltan hidrojen üretimi ve PV kullanımı, çevresel faydaları destekler [33]. Sistem, 25 yıllık bir proje ömrü ile ekonomik sürdürülebilirliği olan bir yatırım olarak değerlendirilmektedir [33]. Yüksek elektrik enerjisi oranı ve düşük emisyon değerleri sayesinde, sistem uzun süre arzu edilen çevre dostu bir enerji çözümü sunmaktadır. Tüm bu yorumlar ışığında simüle edilen çözümlerin ortalama %80'inin uygulanabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışması yapılan sahada tüm elektrik talebi kategorilerinin tasarımına hidrojen üretmek için elektrolizin ve hidrojen tankının eklenmesinin çözümlerin fizibilitesini arttırdığı fark edilmiştir. HOMER Pro'daki hesaplama raporunu özetlemek, uygulanabilirlik ve teknolojik analiz bakımından önemlidir [29]. (bkz. Tablo 2.)

Tablo 2, sistemin maliyet yapısını detaylı bir şekilde göstermektedir. Yatırım maliyetlerinin (sermaye) yanı sıra, işletim, bakım ve değiştirme maliyetlerinin de dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Özellikle, Elektrolizör ve 10 kW Hidroelektrik Kaynak bileşenlerinin yüksek işletim maliyetlerine sahip olması, bu bileşenlerin düzenli bakım gerektirdiğini ve sistemin verimli çalışması için kesintisiz kullanımının önemli olduğunu vurgulamaktadır. Hidrojen tankı ve PV bileşenleri ise daha düşük maliyetli ve bakım gereksinimi az olan parçalardır, bu da sistemin ekonomik verimliliğine katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak sistemin uygulanabilirliği oldukça yüksektir; ancak işletim ve bakım maliyetlerinin dikkatli bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Tablo 3, Homer Pro'dan alınan emisyon verilerini göstermektedir. Oluşturulan sistemin karbon emisyonları ve diğer zararlı gazlar açısından çevresel etkileri analiz edilmiştir. Bahsedilen veriler aşağıda Tablo3'de bulunmaktadır.

Toplam karbon dioksit emisyonu 7,166 kg/yıl, bu değer fosil yakıtların kullanımının bir göstergesidir ancak düşük emisyon oranları sistemin büyük ölçüde çevre dostu olduğunu gösteriyor. Diğer emisyonlar (SO₂, NO_x): Kükürt dioksit ve azot oksit emisyonları mevcut, ancak bunlar da oldukça düşük seviyelerdedir. Bu sonuçlara göre, sistem

çevre dostu olarak sınıflandırılabilir, ancak fosil yakıtlardan kaynaklanan bir miktar emisyon hala mevcuttur. Bu emisyonları sıfıra indirmek için yenilenebilir enerji payını artırmak faydalı olacaktır [30].

Tablo 2. HOMER Pro ile sisteme girilen komponentlerin \$ bazında değerleri

Bileşen	Sermaye (\$)	Değiştirme (\$)	İşletme ve Bakım (\$)	Yeniden Kullanma (\$)	Toplam (\$)
10 kW Hidroelektrik Kaynak	80,000.00	0,00	31,026.04	0,00	111,026.04
Elektrolizör	75,000.00	15,910.27	32,318.79	2,994.47	120,234.59
Genel Düz Plakalı Fotovoltaik (PV)	15,000.00	0,00	25,855.03	0,00	40,855.03
Şebeke	0,00	0,00	15,444.12	0,00	15,444.12
Hidrojen Tankı	5,000.00	0,00	6,463.76	0,00	11,463.76
Sistem Dönüştürücü	30,000.00	2,121.37	6,463.76	399.26	38,185.86
Sistem	205,000.00	18,031.64	86,683.26	3,393.74	306,321.17

Tablo 3. HOMER Pro ile sistemden alınan emisyon değerleri

Emisyon Türü	Değer	Birim
Karbon Dioksit (CO ₂)	7,166	kg/yıl
Karbon Monoksit (CO)	0	kg/yıl
Yanmış Hidrokarbonlar	0	kg/yıl
Partikül Maddesi	0	kg/yıl
Kükürt Dioksit (SO ₂)	31,1	kg/yıl
Azot Oksitler (NO _x)	15,2	kg/yıl

HOMER Pro, mikro şebeke veya dağıtılmış enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik fizibilitesini simüle ederek düşük maliyetli yenilenebilir enerji sistemlerinin risk azaltma tekniklerinin modellenmesine ve optimize edilmesine olanak tanır [30]. Program; geleneksel enerji üretiminin yenilenebilir enerji, depolama, şebeke kaynakları ve tekno-ekonomik analize dayalı yük kontrolü ile nasıl birleştirileceğini göstermektedir [31]. Program; girdi verilerinin çalıştırmasında elektrik sistemi mimarisini, yük profillerini, bileşenleri, yakıt fiyatlarını ve çevresel faktörleri değerlendirip optimize ederek hibrit bir mikro şebekenin veya dağıtılmış enerji sisteminin bir yıl boyunca çalışmasını simüle eder [32]. Diyarbakır'daki (38°3.5 N ve 39°59.2 E) konumuna ilişkin optimizasyon sonuçları en iyi olasılığı ortaya koyuyor. Simülasyon sürecinde, Diyarbakır Devegeçidi Sulama Barajına ait hibrit yenilenebilir enerji sistemi üzerinde bir dizi teknik ve ekonomik analiz yapılmıştır. HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizler, sistemin farklı bileşenlerinin enerji üretim kapasiteleri, maliyetleri, emisyonları ve çevresel etkileri üzerine kapsamlı sonuçlar sunmuştur. Elde edilen bulguların değerlendirilmesi ve tartışılması aşağıdaki maddeler altında özetlenmiştir:

- **Enerji Üretimi ve Yenilenebilir Kaynakların Katkısı:**

Sistemdeki PV bileşeni yıllık 312,678 kWh enerji üretmiş ve toplam enerji ihtiyacının %96,5'ini karşılamıştır. Özellikle güneşlenme sürelerinin yüksek olduğu bölgelerde, PV sistemlerinin yüksek verimle çalıştığı görülmüştür. Bununla birlikte, LCOE 0,3442 \$/kWh olarak hesaplanmış, bu da sistemin ekonomik açıdan oldukça avantajlı olduğunu ortaya koymuştur. Toplamda 4,260 kg/yıl hidrojen üretimi gerçekleşmiştir ve yıl sonu depolama seviyesi 400 kg olmuştur. Bu bulgular, hidrojen üretiminin enerji depolama stratejileri açısından önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

- **Ekonomik Analiz ve Maliyetler:**

Sistemin toplam maliyeti 306,321.17 \$ olarak hesaplanmıştır. En yüksek maliyet, 120,234.59 \$ ile Elektrolizör bileşeninde oluşmuştur. Elektrolizör, hidrojen üretiminin merkezi bir bileşeni olup yüksek sermaye ve bakım maliyetleri ile dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra, 10 kW Hidroelektrik Kaynak bileşeninin de 111,026.04 \$ toplam maliyetle sistemin diğer yüksek maliyetli bileşenlerinden biri olduğu görülmektedir. Bu, sistemin başlangıç yatırımlarının büyük bir kısmının temel enerji üretim ve hidrojen depolama bileşenlerine yapıldığını göstermektedir. Özellikle Elektrolizör ve 10 kW Hidroelektrik Kaynak bileşenleri, yüksek işletme ve bakım maliyetleri ile dikkat çekmektedir (sırasıyla 32,318.79 \$ ve 31,026.04 \$). Bu, sistemin uzun vadeli operasyonlarının sürdürülebilirliği açısından önemli bir faktördür. Bakım maliyetlerinin yüksek olması, bileşenlerin sürekli çalışmasını sağlamak için düzenli bakım gerektirdiğini göstermektedir. Bazı bileşenlerin geri kazanım değerleri hesaplanmış ve en yüksek yeniden kullanım değeri Elektrolizör bileşeninde 2,994.47 \$ olarak belirlenmiştir. Bu, sistemin belirli bileşenlerinin ömrünün sonunda geri kazanılabilir olduğunu gösterir.

- **Çevresel Etkiler ve Emisyonlar:**

Sistemin çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılan emisyon analizlerinde, yıllık olarak 7,166 kg karbon dioksit (CO₂), 31,1 kg kükürt dioksit (SO₂) ve 15,2 kg azot oksitler (NO_x) emisyonu gerçekleşmiştir. Sistemde yenilenebilir enerji kaynaklarının baskın olması, emisyonların geleneksel fosil yakıtlı sistemlere kıyasla oldukça düşük olmasını sağlamıştır. Karbon monoksit (CO) ve partikül maddesi (PM) emisyonları sıfır olarak hesaplanmıştır, bu da sistemin çevresel sürdürülebilirlik açısından başarılı olduğunu göstermektedir. Hidrojen

üretimi, enerji depolama ve kullanım açısından önemli bir avantaj sunmuştur. Hidrojen kullanımı, emisyonların azaltılmasında kritik bir rol oynarken, enerji depolama kapasitesini artırarak sistemin esnekliğini sağlamaktadır. Ayrıca sistemin İç Getiri Oranı (IRR) %11,39 ve Yatırım Getirisi (ROI) %14,57 olarak hesaplanmış olup bu oranlar, sistemin hem kârlı hem de sürdürülebilir olduğunu gösterir. Sistemin uzun süreli kârlı kazancı ve nakit rezervlerinin pozitif olduğunu gösterir. Yatırımın etkin yerleşimi ve ekonomik olarak sağlam bir yatırım olduğunu göstermektedir. 25 yıllık proje ömrü ile bu hibrit enerji sistemi, hem ekonomik hem de ekonomik sürdürülebilirlik sağlayan bir yatırım olarak değerlendirilmektedir.

5. SONUÇ

Bu makale, Devegeçidi Sulama Barajı'nda kurulan hibrit enerji sisteminin genel olarak başarılı bir enerji üretim ve yönetim sistemi sunduğunu göstermektedir. PV bileşeninin yüksek verimliliği, hidrojen üretimi ile sağlanan enerji depolama kapasitesi ve düşük emisyon seviyeleri, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından olumlu sonuçlar vermektedir. Ancak, işletme ve bakım maliyetlerinin dikkatli yönetilmesi gerektiği ve hidroelektrik bileşeninin sistemde daha etkin bir rol oynaması için gelecekte optimizasyon yapılması gerektiği açıktır.

Yapılan analizler, PV sisteminin yüksek enerji üretim kapasitesi ile sistemin teknik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Yıllık 312,678 kWh enerji üretimi ve %96,5'lik enerji payı, güneş enerjisinin bu bölgede etkin bir şekilde kullanılabileceğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, enerji üretiminin düzenli ve verimli bir biçimde olması enerji depolama kapasitesinin yeterli olduğu göstermektedir. Ekonomik analizler, sistemin toplam maliyetinin 306,321,17 \$ olduğunu ve LCOE (0,3442\$/kWh) değerinin ekonomik olarak sürdürülebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Yıllık 4,260 kg hidrojen üretimi gerçekleştirilmiş olup, yıl sonunda 400 kg hidrojen depolanmıştır. Bu da hidrojenin enerji depolama kapasitesine yaptığı katkısı göstermektedir. Sistemin Yatırım Getirisi (ROI) %14,57 ve İç Getiri Oranı (IRR) %11,39 olarak hesaplanmış olup, bu oranlar sistemin yatırım açısından kârlı olduğunu göstermektedir. Çevresel açıdan yapılan değerlendirmelerde ise, sistemin karbon emisyonlarının düşük olduğu, yıllık 7,166 kg karbon dioksit ve sınırlı miktarda diğer zararlı gazların salınımı ile çevre dostu bir enerji sistemi olduğu tespit edilmiştir. Hidrojen ve PV sistemlerinin kullanımı, emisyonların önemli ölçüde azalmasına katkı sağlamıştır. 25 yıllık proje ömrü boyunca bu hibrit enerji sisteminin hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir yatırım olacağı değerlendirilmektedir.

Bu çalışmadan yola çıkarak hidrojen teknolojilerinde verimlilik iyileştirmeleri yapılabilir. Örneğin; günümüzde elektrolizörlerin verimliliği genellikle %60-80 aralığında seyretmektedir. Ancak bu süreçteki enerji kayıplarını azaltmak için daha verimli elektroliz teknolojilerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Yapılacak çalışmalarda özellikle daha uygun maliyetli ve yüksek verim sağlayan elektrolizör sistemlerine odaklanabilir. Hidrojeni elektrik enerjisine dönüştüren yakıt hücreleri, şu anda %40-60 aralığında bir verimlilik sunmaktadır. Gelecek çalışmalar, yakıt hücrelerinin verimliliğini artırmayı ve daha düşük maliyetlerle üretim yapmayı hedefleyen yeni teknolojiler ve malzemeler üzerinde yoğunlaşabilir. Hidrojenin depolanması sırasında yaşanan enerji kayıpları, genellikle %2-5 arasında değişir. Gelecekteki çalışmalar, yüksek basınçlı hidrojen depolama teknolojilerinin verimliliğini artırmayı ve daha düşük maliyetli depolama çözümleri geliştirmeyi amaçlayabilir. Mevcut araştırmalar, fotovoltaiik sistemleri ile hidrojen üretiminin başarılı bir şekilde birleştirilebileceğini göstermektedir. Ancak, bu iki teknolojinin daha etkin entegrasyonu için özellikle düşük güneş ışığı koşullarında veya bulutlu günlerde nasıl optimize edilebileceği konusunda gelecekteki çalışmalara ihtiyaç vardır. Hidroelektrik sistemlerinin hibrit enerji sistemlerinde daha verimli kullanılabilmesi için gelecekte yapılacak çalışmalar, su seviyesindeki mevsimsel değişikliklere bağlı olarak hidroelektrik santrallerinin esnekliğini artırmayı hedefleyebilir. Bu sayede hidroelektrik sistemler, diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile daha etkin bir şekilde entegre edilebilir.

Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında bahsedilen Inavitas ve CBS sistemlerine ait veri desteği sağlayan Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKÇA

- [1] F. Arslan and M. Ergul, "Çaygören Barajı Sulama Havzası ve Çevresinde Tarımsal Faaliyetler," The Journal of Academic Social Science, vol. 2, no. 2, pp. 171-190, 2019.
- [2] A.Ü. Keskin and Ş.D. Demir, "Amasya Değirmendere Barajında Sulama Alanı ve Baraj Yüksekliği Arasında Ekonomik Analiz," Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, vol. 20, no. 60, pp. 755-764, 2018.
- [3] Y. Kuşlu and A.V. Yağanoğlu, "Kuzgun Barajı Sulama Alanında Yapısal Durumun Belirlenmesi," Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, vol. 38, no. 1, pp. 71-81, 2007.

- [4] A. Yıldırım, "Karakaya Barajı ve Doğal Çevre Etkileri," Dicle Üniversitesi Ziya Gökalp Eğitim Fakültesi Dergisi, no. 6, pp. 32-39, 2006.
- [5] M. Opan, T. Temiz, A. Öner, and E. Dumlu, "Tarımsal Alanlarda Sulamanın Enerji Üretimi Üzerine Etkisi," Journal of Agricultural Sciences, vol. 15, no. 3, pp. 231-239, 2009.
- [6] E. Doğan, G. Çeribaşı, and U. Akkaya, "Barajların Nehir Akımı Rejimine Olan Etkilerinin Trend Analizi Yöntemi ile Araştırılması: Sakarya Nehri Örneği," Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, vol. 6, no. 1, pp. 50-55, 2016.
- [7] G. Öymen, "Yenilenebilir Enerjinin Sürdürülebilirlik Üzerindeki Rolü," İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, vol. 19, no. 39, pp. 1069-1087, 2020.
- [8] IRENA, "Renewable Energy Statistics 2024," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024.
- [9] T. Biçen, "Güneş Panelleri ile Elektrik Üretiminin Teknik ve Ekonomik Analizi: Bursa Örneği," M.S. thesis, Bursa Uludağ Üniversitesi, 2018.
- [10] Å. Killingtveit, "Hydroelectric Power," in Future Energy, Elsevier, pp. 453-470, 2014.
- [11] H. Kılıç, "Improving the performance of microgrid-based Power-to-X systems through optimization of renewable hydrogen generation," International Journal of Hydrogen Energy, 2024.
- [12] H. Kılıç, M.E. Asker, and C. Haydaroglu, "Enhancing power system reliability: Hydrogen fuel cell-integrated D-STATCOM for voltage sag mitigation," International Journal of Hydrogen Energy, 2024.
- [13] F. Aydın ve D. Öztürk, "Kırsal Alanlar İçin Hibrit Güç Sistemlerinin Tasarımı ve Tekno-Ekonomik Analizi: Bingöl Örneği," Elektrik, cilt 5, sayı 3, s. 562-584, 2024.
- [14] N. Chalkiadakis et al., "A New Path Towards Sustainable Energy Transition: Techno-Economic Feasibility of a Complete Hybrid Small Modular Reactor/Hydrogen (SMR/H2) Energy System," Energies, vol. 16, no. 17, p. 6257, 2023.
- [15] M. Nasser and H. Hassan, "Green Hydrogen Production Mapping Via Large Scale Water Electrolysis Using Hybrid Solar, Wind, and Biomass Energies Systems: 4E Evaluation," Fuel, vol. 371, p. 131929, 2024.
- [16] N. Chalkiadakis, E. Stamatakis, M. Varvayanni, A. Stubos, G. Tzamalıs, and T. Tsoutsos, "A new path towards sustainable energy transition: Techno-economic feasibility of a complete hybrid small modular reactor/hydrogen (SMR/H2) energy system," Energies, vol. 16, no. 17, p. 6257, 2023.
- [17] H.H. Coban, A. Rehman, and A. Mohamed, "Technical and economical investigation of a centralized and decentralized hybrid renewable energy system in Cadaado, Somalia," Processes, vol. 10, no. 4, p. 667, 2022.
- [18] G. Zhang, C. Xiao, and N. Razmjooy, "Optimal operational strategy of hybrid PV/wind renewable energy system using HOMER: A case study," International Journal of Ambient Energy, vol. 43, no. 1, pp. 3953-3966, 2022.
- [19] Wikipedia, "Devegeçidi Barajı", url:https://tr.wikipedia.org/wiki/Devegeçidi_Barajı, (Access Date: 02/07/2024).
- [20] N. Şarлак, A. Muratoğlu, and Ş. Tiğrek, "Devegeçidi Baraj Gölü Meteorolojik-Hidrolojik-Tarımsal Kuraklık Analizi," Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, vol. 10, no. 1, pp. 16-28, 2024.
- [21] H.H. Güneş and M. Bulut, "Sermaye Birikiminin Tarımsal Sulamada Kullanımı (Diyarbakır Örneği)," Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, vol. 5, no. 15, pp. 123-135, 2006.
- [22] V. Tecim, Coğrafi Bilgi Sistemleri: Harita Tabanlı Bilgi Yönetimi, İzmir, Turkey: Vahap Tecim, 2008.
- [23] A.R. Jordehi, "Optimisation of Demand Response in Electric Power Systems, a Review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 103, pp. 308-319, 2019.
- [24] Inavitas, "Inavitas Hakkında", url:https://www.inavitas.com/tr/, (Access Date: 11/09/2024).
- [25] S. Basnet, K. Deschinkel, L. Le Moyne, and M.C. Péra, "Optimizing Grid-Integrated Renewable Systems for Cost-Effective Electricity and Hydrogen Supply," in 2024 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Mar. 2024, pp. 1-8. IEEE.
- [26] S. Praveenkumar et al., "Techno-Economic Pptimization of PV System for Hydrogen Production and Electric Vehicle Charging Stations Under Five Different Climatic Conditions in India," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 47, no. 90, pp. 38087-38105, 2022.
- [27] G. Yılmaz and B.S. Öztürkmen, "GAP Bölgesi'nde Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Çevresel Etkileri," Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, vol. 3, no. 3, pp. 52-58, 2018.
- [28] W.F. Ekpotu, J.T. Akintola, M.C. Obialor, and P.C. Udom, "A Solar Energy System Design for Green Hydrogen Production in South-Western Nigeria, Lagos State, Using HOMER & ASPEN," Open Journal of Optimization, vol. 12, no. 2, pp. 72-97, 2023.
- [29] M. Awad, A. Said, M.H. Saad, A. Farouk, M.M. Mahmoud, M.S. Alshammari, and A.I. Omar, "A Review of Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation Considering PV/Wind/Hybrid/ Hydropower/Geothermal/Tidal and Wave/Biogas Energy Systems, Economic Analysis, and its Application," Alexandria Engineering Journal, vol. 87, pp. 213-239, 2024.
- [30] K. Alhadrhami, A. Albalawi, S. Hasan, and A.M. Elshurafa, "Modeling Green Hydrogen Production Using Power-to-x: Saudi and German Contexts," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 64, pp. 1040-1051, 2024.
- [31] S. Di Micco, F. Romano, E. Jannelli, A. Perna, and M. Minutillo, "Techno-Economic Analysis of a Multi-Energy System for the Co-Production of Green Hydrogen, Renewable Electricity and Heat," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 48, no. 81, pp. 31457-31467, 2023.
- [32] B. Modu, M.P. Abdullah, A.L. Bukar, M.F. Hamza, and M.S. Adewolu, "Energy Management and Capacity Planning of Photovoltaic-Wind-Biomass Energy System Considering Hydrogen-Battery Storage," Journal of Energy Storage, vol. 73, p. 109294, 2023.
- [33] R. Babaei, D.S. Ting, and R. Cariveau, "Optimization of Hydrogen-Producing Sustainable Island Microgrids," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 47, no. 32, pp. 14375-14392, 2022.