



**MESKEN BESLEMESİNDE PV VE PEM ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİNİN
KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali SARI

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2022

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MESKEN BESLEMESİNDE PV VE PEM ENERJİ ÜRETİM
SİSTEMİNİN KULLANIMI**

Ali SARI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2022

TEZ ONAY SAYFASI

Ali SARI tarafından hazırlanan “Mesken Beslemesinde PV ve PEM Enerji Üretim Sisteminin Kullanımı” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 06 / 07 / 2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

Başkan : Prof. Dr. Ahmet KARAARSLAN
Ankara Yıldırım Beyazıt Üni., Müh. ve Doğa Bil. Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ahmet YÖNETKEN
AKÜ, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN
AKÜ, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

..... / / tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06 / 07 / 2022

Ali SARI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MESKEN BESLEMESİNDE PV VE PEM ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİNİN KULLANIMI

Ali SARI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

Bu çalışmada, güneş panelleri ve PEM yakıt hücresi kullanılarak iki farklı mesken besleme sisteminin analizi yapılmıştır. Bu analizler Loughborough-İngiltere ve Afyonkarahisar-Türkiye lokasyonlarından alınan gerçek ışıma ve kullanım verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Güneş panellerinden üretilen enerji ile öncelikle son kullanıcı beslenmiştir. Enerji arz fazlalığı durumunda ise öncelikle batarya sistemleri ile sonrasında ise elektroliz cihazı devreye girerek ihtiyaç fazlası enerji depolanmıştır. Güneş panellerinin üretiminin yetersiz olduğu zamanlarda ise enerji talebinin yakıt hücresi ile karşılanması sağlanmıştır. Eğer burada üretilen enerji yetmez veya herhangi bir sebepten ötürü enerji üretilemez ise batarya sistemleri devreye girerek yüklerin beslenmesi sağlanmıştır. Böylece, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerjisini karşılayan bir sistem boyutlandırılmıştır ve birim enerji maliyeti ise sırasıyla 208 ve 148,7 \$/MWh olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, eğer şebeke tesis edilebilecek bir durum söz konusu ise Loughborough için 24,3 km ve Afyonkarahisar için de 90,7 km üzerinde bir şebeke tesis edilmesinin ise daha maliyetli bir çözüm sunduğu gösterilmiştir.

2022, vii + 42 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yakıt hücresi, İzole mikro şebeke, Güneş paneli, Elektroliz cihazı, Hidrojen tankı.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EVALUATION OF PV AND PEM POWER GENERATION SYSTEM IN RESIDENTIAL CONSTRUCTION

Ali SARI

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Renewable Energy Systems

Supervisor: Asst. Prof. Rasim DOĞAN

In this study, two different residential supply systems are analyzed using solar panels and PEM fuel cells. These analyzes are performed on actual irradiance and usage data from Loughborough-England and Afyonkarahisar-Turkey locations. First of all, the end user is fed with the energy produced from the solar panels. In the case of surplus energy supply, firstly, the battery systems and then the electrolysis device is activated and stored. When the production of solar panels is insufficient, the energy demand is met with fuel cells. If the energy produced here is insufficient or no energy can be produced, battery systems are activated, and the loads are fed. Thus, a system that meets its energy from renewable energy sources is sized, and the unit energy cost is calculated as 208 and 148,7 \$/MWh, respectively. For a grid supply system with the same cost, the lowest distance is calculated as 24,3 km for Loughborough and 90,7 km for Afyonkarahisar. It has been demonstrated that feeding an on-grid system over this distance will be more costly.

2022, vii + 42 pages

Keywords: Fuel cell, Isolated microgrid, Solar panel, Electrolyzer, Hydrogen tank.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN'a teşekkür ederim.

Tezimin savunmasında bulunarak değerli görüş ve önerileri ile tezimin daha güçlü hale gelmesine katkıda bulunan değerli hocalarım Prof. Dr. Ahmet KARAARSLAN ve Doç. Dr. Ahmet YÖNETKEN'e de teşekkür ederim.

Tez çalışmasında kullanılan ve Afyonkarahisar bölgesinden alınan ıslanım verileri için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Ali SARI

Afyonkarahisar, 2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
3. MATERYAL ve METOT	8
3.1 Mesken Yükleri.....	8
3.1.1 Loughborough Lokasyonu	9
3.1.2 Afyonkarahisar Lokasyonu	12
3.2 Güneş Enerjisi.....	13
3.3 Yakıt Hücresi	15
3.4 Bataryalar.....	16
3.5 Güç Dönüştürücüleri.....	16
3.6 Elektroliz Cihazı	17
3.7 Hidrojen Depolama Tankı	18
3.8 Güç Dengesi ve Boyutlandırma.....	19
4. BULGULAR	28
4.1 Yenilenebilir Enerji Sistemleri ile Besleme Durumu	28
4.2 Şebeke ile Besleme	32
4.3 Karşılaştırma	35
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	37
6. KAYNAKLAR.....	39
ÖZGEÇMİŞ.....	42

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CO ₂	Karbondioksit
H ₂	Hidrojen
tl	Türk lirası
\$	Amerikan doları
m ²	Metrekare
mm ²	Milimetrekare
h	Saat
stdm ³	Standart metreküp
Ω	Ohm
Kg	Kilogram
W	Watt
V	Volt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
MW	Megawatt
MWh	Megawatt saat

Kisaltmalar

AA	Alternatif akım
ACSR	Aluminum Conductor Steel Reinforced
BM	Biomass
BT	Batarya
CSV	Comma Seperated Values
CV	Konvertör
DA	Doğru akım
DG	Dizel jeneratör
EL	Elektroliz cihazı
EPDK	Enerji piyasayı düzenleme kurulu
EX	Fazla enerji
FC	Fuel cell
HYT	Hidrojen yakıt tankı
MMbtu	Million British thermal units
PV	Photovoltaic
REFIT	Personalised Retrofit Decision Support Tools for UK Homes Using Smart Home Technology
SC	Süper kapasitör
URSOFC	Katı oksit yakıt hücresi
WT	Wind turbine

ŞEKİLLER DİZİNİ

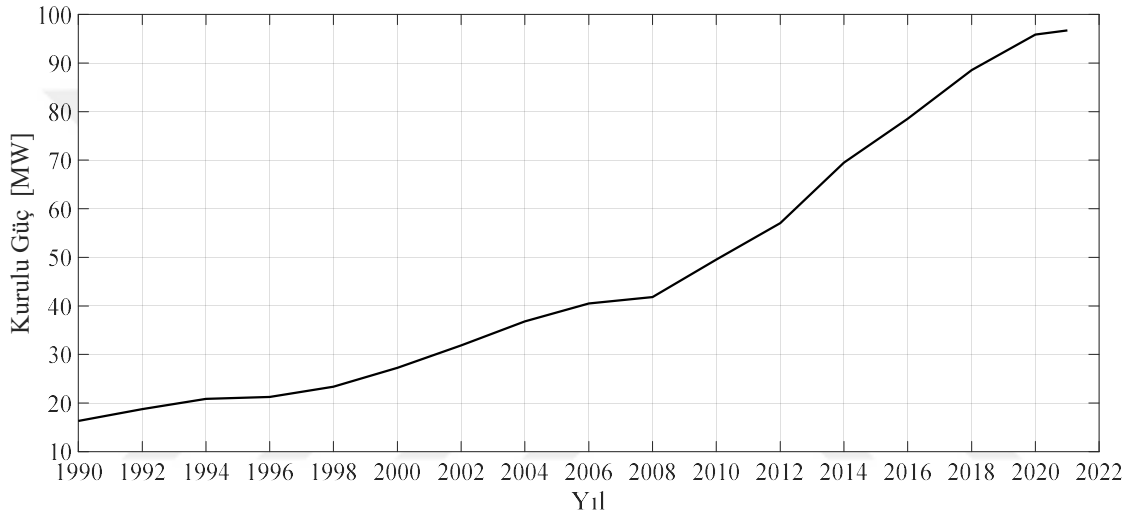
	Sayfa
Şekil 1.1 Elektrik Enerjisi kurulu gücü yıllara göre değişimi.	1
Şekil 1.2 Dünya üzerindeki CO ₂ emisyonunun yıllara göre değişim grafiği.	2
Şekil 1.3 Türkiye üzerindeki CO ₂ emisyonunun yıllara göre değişim grafiği.	2
Şekil 1.4 Haziran-2021 ve Mayıs-2022 arası Türkiye enerji üretim oranları.	3
Şekil 3.1 Her bir ev için kullanım verileri.	11
Şekil 3.2 Loughborough lokasyonunun saatlik toplam güç talepleri.	11
Şekil 3.3 Aylara göre günlük ortalama enerji tüketimi.	12
Şekil 3.4 Afyonkarahisar lokasyonunun saatlik toplam güç talepleri.	13
Şekil 3.5 Loughborough için bir yıllık güneş ışıınım verisi.	14
Şekil 3.6 Afyonkarahisar için bir yıllık güneş ışıınım verisi.	14
Şekil 3.7 Güneş paneli, yakıt hücresi ve batarya sistemlerinin enerji yoğunluklarının karşılaştırılması.	15
Şekil 3.8 Sistemin blok diyagramı.	19
Şekil 3.9 Mod 1 blok diyagramı.	20
Şekil 3.10 Mod 2 blok diyagramı.	21
Şekil 3.11 Mod 3 blok diyagramı.	21
Şekil 3.12 Mod 4 blok diyagramı.	22
Şekil 3.13 Mod 5 blok diyagramı.	23
Şekil 3.14 Mod 6 blok diyagramı.	23
Şekil 3.15 Mod 7 blok diyagramı.	24
Şekil 3.16 Akış algoritması.	25

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 House 1 cihaz listesi.....	10
Çizelge 3.2 Kullanılacak malzeme listeleri.....	27
Çizelge 4.1 Lokasyonlardaki aylık toplam enerji tüketim miktarları.....	29
Çizelge 4.2 PV panellerinden elde edilen aylık toplam enerji üretim miktarları.....	30
Çizelge 4.3 Yakıt hücresinden elde edilen aylık toplam enerji üretim miktarları.....	31
Çizelge 4.4 Lokasyon bazında aylık toplam hidrojen üretimi, tüketimi ve değişimleri.	31
Çizelge 4.5 Lokasyonlar bazında aylık toplam kullanılmayan enerji miktarları.	32
Çizelge 4.6 Kablo uzunluğunun hesaplanmasında kullanılan değerler.....	34
Çizelge 4.7 Her yüz metre mesafe için dağıtım şebekesi maliyet tablosu.	34
Çizelge 4.8 Lokasyon-1’de bir sefer kullanılacak malzeme listesi ve maliyet tablosu..	35
Çizelge 4.9 Lokasyon-2’de bir sefer kullanılacak malzeme listesi ve maliyet tablosu..	35

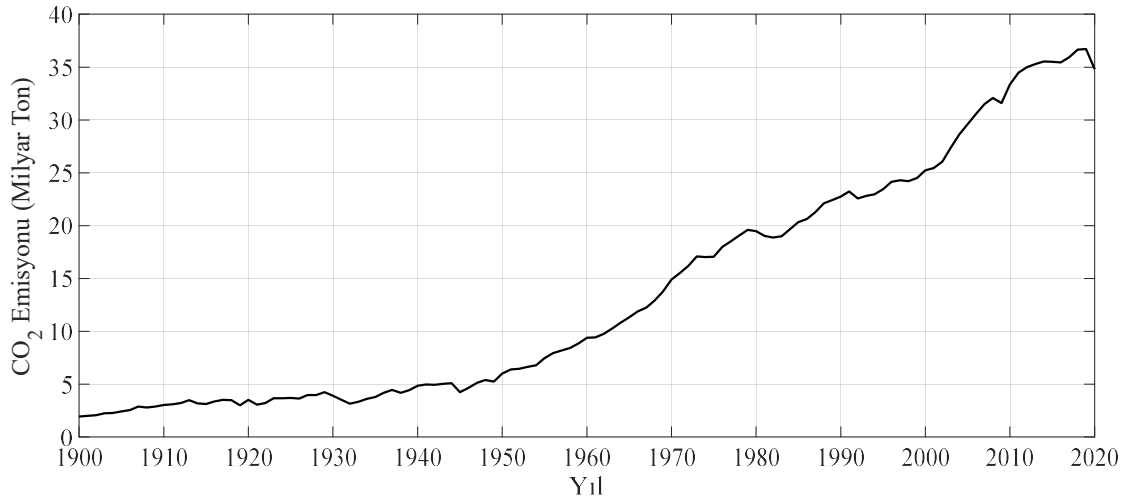
1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi talebi, giderek artan nüfus ve bununla birlikte hayatın devamı sırasında kullanılan cihaz ve ekipmanların giderek elektriksel hale dönüştürülmesi ile süratli bir biçimde artış göstermektedir. Bu enerji artış talebini karşılamak adına, Türkiye’de 1990’dan 2021’e kadar olan kurulu güçteki artış Şekil 1.1’de gösterilmiştir (Anonim 2022). Bu süreçte yaşanan artış 5 kattan fazla olmuştur. Kurulu güç santrallerinin ise hali hazırda büyük bir bölümü, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardan oluşmaktadır.



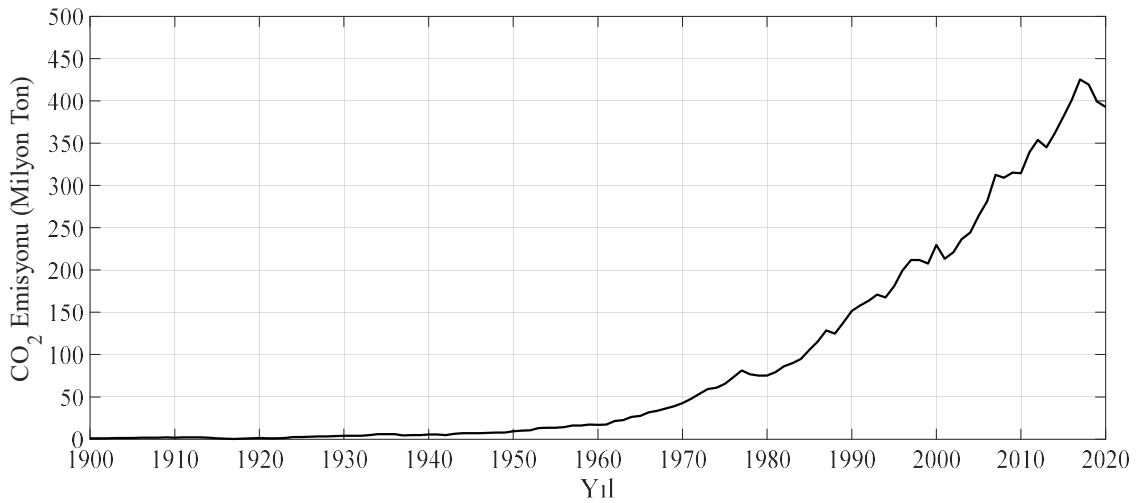
Şekil 1.1 Elektrik Enerjisi kurulu gücü yıllara göre değişimi.

Fosil kaynaklarından kömürün kullanım maliyeti, giderek artan çevre bilinci ile kullanılması zorunlu hale gelen filtreleme sistemleri de düşünüldüğünde sürekli yükselen bir profil sergilemektedir. Buna ek olarak dışa bağımlı olarak kullanılan doğalgaz ise politik, ekonomik ve hatta teknik sebeplerden ötürü kullanımında yüksek risk barındıran bir enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynaklarının oluşturduğu bir diğer problem ise CO₂ emisyonudur. Dünya üzerinde CO₂ emisyonun yıllara göre değişimi Şekil 1.2’de verilmiştir (Hannah vd. 2020). 1900-1950 yılları arasında beş milyar tonluk emisyon değeri sonraki elli yılda yirmi milyar ton artmıştır. Son yirmi yılda ise bu değer on milyar ton daha artış göstermiştir. Bu hızlı yükseliş trendi içerisinde en büyük katkı fosil yakıtların kullanımından kaynaklanmaktadır (Abas vd. 2015). Dolayısıyla bu artışın azaltılması da yaşanabilir bir çevre bakımından önem arz etmektedir.



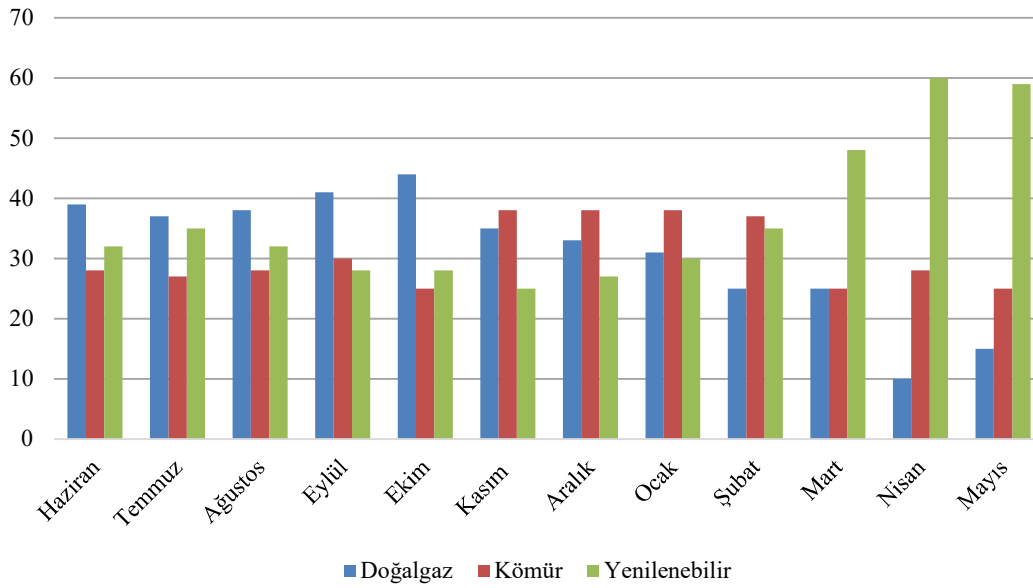
Şekil 1.2 Dünya üzerindeki CO₂ emisyonunun yıllara göre değişim grafiği.

Türkiye’de CO₂ emisyonundaki yıllara göre değişim ise Şekil 1.3’de verilmiştir (Hannah vd. 2020). Dünyadaki değişime benzer şekilde Türkiye’de de son yıllardaki artış sürat kazanmış ve dört yüz milyon ton seviyelerine kadar gelmiştir. Bu durum bütün dünya ülkelerinde olduğu gibi Türkiye’de de önlem alma zorunluluğu getirmiştir. Bu sebeple 2021 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı adını Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı adını almıştır. Bu sebepler altında hidroelektrik, güneş ve rüzgar enerjileri başta olmak üzere çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarına teşviklerle beraber yönelim giderek hızlanmıştır.



Şekil 1.3 Türkiye üzerindeki CO₂ emisyonunun yıllara göre değişim grafiği.

Şekil 1.4’de, Haziran-2021 ile Mayıs-2022 arasındaki doğalgaz, kömür ve yenilenebilir enerji sistemlerinin Türkiye enerji üretimindeki payları yüzdelik olarak sunulmuştur. Özellikle Ekim-2021 sonrasında yenilenebilir enerji sistemlerinin elektrik üretimindeki payı giderek artarken doğalgazın payı ise giderek düşmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu düşüşte maliyet artışının da etkisi mevcuttur ki aynı dönemde bir MMBtu’luk doğalgaz fiyatı 3,04 \$’dan 5,44 \$’a yükselmiştir.



Şekil 1.4 Haziran-2021 ve Mayıs-2022 arası Türkiye enerji üretim oranları.

Yenilenebilir enerjiler, enerji üretim maliyetlerinin yüksek olduğu, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımının zorlu olduğu bölgelerde ya da yapılamadığı yerlerde çok daha önemli hale gelmektedir. Bununla birlikte, her coğrafi lokasyonda kullanılabilecek yenilenebilir enerji türü farklılık gösterebilmektedir. Örnek vermek gerekirse, rüzgar enerjisi rüzgarın bulunmadığı bir lokasyonda kullanılamamaktadır. Benzer şekilde, güneş enerjisi için güneşin, hidroelektrik santraller için suyun, jeotermal enerji kaynakları için sıcak suyun bulunmadığı noktalarda enerji üretimi yapılamamaktadır. Coğrafi konum ve hava olaylarından bağımsız olan ve giderek önem kazanan bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak yakıt hücreleri ise, hidrojen sağlanabilen her yerde yüksek yoğunluklu enerji üretebilmektedirler (O’Hayre vd. 2016). Bu kullanım sırasında hem sessiz hem de sıfır emisyonu sahip olması ise ayrıca önemlidir (Stern 2018). Fakat bu enerjinin sürekliliğini

sağlamak için ya hidrojen yakıt sevkiyatı yapılmalı ya da bu yakıtın bir başka kaynak ile yerinde üretimi ve depolanması sağlanmalıdır.

Şebeke altyapısının bulunmadığı bir yer için, tek bir yenilenebilir enerji kaynağı ile kendi kendine yetebilecek şekilde enerji üretimi beraberinde büyük zorluklar getirmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek adına ise hibrit yapılardan faydalanılmaktadır. Bu yapılar içerisinde en az bir ana enerji kaynağı ve bu kaynağın yetmediği durumlarda destekleyici enerji kaynakların varlığı söz konusudur. Bu sebeple ana enerji kaynağı olarak, güneş panelleri, rüzgar türbinleri vb. gibi yeşil elektrik olarak adlandırılan ve sera gazı salınımında bulunmadan enerji arzı sağlayan kaynaklardan faydalanılmaktadır. Buna ek yardımcı enerji kaynağı olarak ise bataryalar ve yakıt hücreleri gibi enerjiyi depolayan ve daha sonra kullanılmasını sağlayan kaynaklardan faydalanılmaktadır. Böylelikle, üretilen fazla enerji ya bataryalarda ya da elektroliz yardımıyla hidrojen gazı üretilerek tanklarda depolanmış olunacaktır. Bu sebeple, tez kapsamında mesken içinde kullanılan yüklerin güneş panelleri ve yakıt hücresi ile oluşturulan hibrit bir yapıyla minimum maliyetle enerjilendirilmesi amaçlanmıştır.

Bu sebeple öncelikle kapsamlı bir literatür bilgisi verilmiştir. Sonrasında ise materyal ve metot kısmında kullanılan malzemeler ve uygulanan algoritmalar açıklanmıştır. Bulgular kısmında ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Tartışma ve sonuç kısmında ise çalışmanın sonuçları tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Yenilenebilir enerjinin giderek popülerlikten ziyade zorunluluk durumuna gelmesi çeşitli enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde değerlendirilmesini de beraberinde getirmiştir. Bu kaynaklar, başta fotovoltaik sistemler, rüzgar türbinleri, biyodizel jeneratörler, hidroelektrik santraller, jeotermal enerji santralleri, yakıt hücreleri vb. olmak üzere çok çeşitlidirler. Yenilenebilir enerji sistemlerindeki en önemli zorluk ise bu tür sistemlere kaynak oluşturan yapılardan elde edilen değişken ve düzensiz enerji akışıdır ki bunun üstesinden gelmek adına depolama sistemlerinin de iyi tasarlanmış olması gerekir (Ghaib ve Ben-Fares 2018). Burada bahsedilen düzensizlikler saatlik olabileceği gibi mevsimlik de olabilmektedir. Saatlik olarak depolamaya batarya sistemleri, mevsimlik olarak depolamaya ise hidrojen tankları birer çözüm olarak sunulmaktadır (Dawood vd. 2020).

Yer şekillerinin elverişsiz olması veya da uzaklık bakımından enerjinin iletilemediği yada enerji iletiminin ekonomik olmadığı noktalarda ise şebekeden bağımsız bir mikro şebeke, enerji ihtiyacını karşılamak için bir zorunluluktur (Vivas vd. 2018). Bu tür bir bağımsız şebeke ise tek bir yenilenebilir enerji kaynağıyla sürdürülebilir bir enerji arzı sağlayamamaktadır. Bu sebeple, şebekeden bağımsız bir kullanıcı için bu kaynakların çeşitli kombinasyonları ile oluşturulan hibrit besleme sistemlerinin, hem enerji şebekesinin son kullanıcıya kadar uzatılmasına hem de son kullanıcının enerjisiz kalmasına karşı bir alternatif olabileceği de ortaya konmuştur (Ghenai vd. 2020). 2021 yılında yapılan bir çalışma özelinde, PV-BT sistemi kullanılarak beslenen mesken kullanıcıları, güneş panelinde üretilen enerjinin toplamda %40,55'inden faydalanabildikleri görülmüştür. Aynı çalışmada PV-BT-FC-EL kullanılarak yapılan besleme sisteminde ise bu oranın %55,26'ya çıktığı bildirilmiştir (Aşchilean vd. 2021).

Bazen iklim koşulları, içinde bulunan ortam şartları ya da düzgün boyutlandırılmayan sistem parametrelerinden dolayı tam anlamıyla yenilenebilir enerji sistemi ile sürdürülebilir bir enerji arzı gerçekleştirilememektedir. Örnek vermek gerekirse, PV sisteminin ana güç kaynağı olarak planlandığı ve yardımcı kaynak olarak da URSOFC yakıt hücresi, batarya ve dizel jeneratörünün kullanıldığı bir çalışmada, iklim şartlarına

göre yıllık minimum 6000 stdm³'lük bir biyogaz üretimi ile ihtiyaç olan enerjinin tamamı yenilenebilir kaynaklardan tedarik edilebileceği ortaya konulmuştur (Mendecka vd. 2021). Bu seviyelerin altına inen durumlarda ise dizel jeneratörlerin desteği olmaksızın operasyonun sürdürülmesinin mümkün olmadığı rapor edilmiştir. Başka bir örnekte ise, 2016 yılında Tunus ve İtalya'ya ait adaların enerjilendirilmesi için PV-WT-DG-FC-EL-BT kullanılan hibrit bir sistem tasarlanmıştır (Cozzolino vd. 2016). Tasarlanan bu sistemde ana enerji kaynağı olan WT ve PV'nin düşük rüzgar hızı ve güneş ışınım seviyelerinden dolayı yeterli enerjiyi üretemediği rapor edilmiştir. Bu enerjinin sağlanabilmesi için zaman zaman DG'den de faydalanılmıştır.

Farklı enerji kaynaklarının bir arada kullanılması ile ortaya çok farklı düzeyde enerji maliyetleri çıkmaktadır. Hatta aynı enerji sistemleri kullanılsa bile içerisinde bulunan iklim koşulları gibi değişkenlerden ötürü enerji maliyetlerinde önemli farklılıklar meydana gelebilmektedir. 2019 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırmada, Miami, Las Vegas ve Houston gibi günlük radyasyon ve ortalama sıcaklık açısından en uygun koşullarda bile, enerji maliyetleri 0,303 ila 0,622 \$/kWh arasındadır (Tribioli ve Cozzolino 2019). 2022 yılında İsfahan-İran'da yapılan ve birden fazla hibrit sistemlerin değerlendirildiği bir çalışmada, çoklu kriter karar yöntemi kullanılarak 0,947 \$/kWh ile en düşük maliyetli elektrik enerji üretiminin PV-WT-CV-BT kombinasyonunda elde edildiği rapor edilmiştir. Buna ek olarak hidrojen enerjisi baz alındığında ise en düşük maliyetin 1,898 \$/kWh ile PV-CV-EL-HYT-FC hibrit yapısında elde edilmiştir (Dehshiri 2022). Bir başka çalışmada ise, kurşun asit ve lityum bataryalara ek olarak süperkapasitörlerin de kullanıldığı bir depolama sistemine ek iki kaynaklı bir yapı (PV-FC) oluşturularak en düşük enerji bedelinin 1,23 €/kWh olması sağlanmıştır (Saidi vd. 2021). Sadece güneş paneli ve yakıt hücresinin kullanıldığı çöl bölgesinde yapılan bir başka çalışmada ise maliyetin 0,145 \$/kWh olduğu rapor edilmiştir (Ghenai vd. 2020). Bunlara ek olarak, PV-FC-DG kullanıldığında 0,92 \$/kWh (Ghenai ve Bettayeb 2019), PV-FC-SC kullanıldığında 4,78 \$/kWh (Luta ve Raji 2019), PV-DG-BT kullanılan iki farklı çalışmada sırasıyla 0,31 \$/kWh (Das ve Zaman 2019) ve 0,37 \$/kWh (Fodhil vd. 2019), PV-FC-BT kullanıldığında 0,203 \$/kWh (Singh vd. 2017) ve PV-BM-DG-BT kullanıldığında ise 0,145 \$/kWh (Rajbongshi vd. 2017) enerji maliyeti hesaplanmıştır. Belirtmek gerekir ki burada hesaplanan birim maliyetler aynı şartlar

altında gerçekleştirilmemiştir. Bu sebeple tam olarak doğru bir karşılaştırma yapmak için ek bilgilere de ihtiyaç duyulmaktadır.

Ayrıca, farklı kaynakların hibrit olarak bir arada sorunsuz ve kararlı bir şekilde çalıştırılabilmesi için ise kuvvetli bir kontrol mekanizması gerekliliği de ortadadır (Zhang vd. 2019). Enerjinin düzgün bir şekilde kontrol edilerek yönlendirilememesi sonucunda, elde edilmesi beklenen verim düşecek ve tasarlanan sistem işlevini yerine getiremeyebilecektir. Verimin düşmesindeki bir diğer etmen ara dönüştürücülerdir. PV-WT-BT-FC-EL kullanılan bir besleme sisteminde bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının birçoğunun DA elektrik enerjisi üretmesinden dolayı, bir DA barası da oluşturularak verimliliğin artırılması amaçlanmıştır (Zhang vd. 2020). Böylece DA ihtiyacı olan yükler bu baradan direkt olarak beslenebilmektedir. Ayrıca oluşturulan algoritma ile yenilenebilir enerjinin dalgalanması ve yükün belirsizliği de göz önüne alınarak tamamen yenilenebilir enerjiden karşılanamayan kısımların ise şebekeden karşılanması öngörülmüştür.

İncelenen literatür çalışmalarında, kendi kendine yetebilen ve yenilenebilir enerji sistemleri ile beslenen bir sistemin maliyetinin şebeke ile besleme durumundaki maliyetle karşılaştırmalı bir şekilde verilmediği görülmüştür. Bu tez çalışmasında ise kendi kendine yetebilen, tamamı yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan ve iki farklı lokasyonda konumlanan mesken besleme sistemleri incelenmiş ve maliyetleri ortaya konularak karşılaştırılmıştır. Burada kullanılan kaynakların teknik olarak yeterli enerjiyi sağlayan ve minimum maliyete sahip olarak seçilebilmesi için de bir boyutlandırma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu mesken sisteminin şebeke ile beslenmesi için yapılması gereken yatırım ve bu şekilde beslenmenin getireceği fatura yükleri de irdelenmiştir. Sonrasında ise hem şebeke ile besleme hem de yenilenebilir enerji sistemleri ile besleme durumu karşılaştırılarak üstünlükleri ortaya konulmuştur.

3. MATERYAL ve METOT

Tez kapsamında mesken kullanıcıları için PV, FC, EL ve BT ile oluşturulan besleme sisteminin iki farklı lokasyon için hem teknik hem de ekonomik anlamda incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Loughborough lokasyonu için REFIT (Murray vd. 2017) veri tabanında bulunan ölçümlenmiş enerji kullanım ve ısıtım verileri baz alınmıştır. Ayrıca, Afyonkarahisar lokasyonu için ölçümlenmiş kullanım verileri ile Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmış ısıtım verileri kullanılmıştır. Bu sistemlerde ayrıca bunları besleyen bir güneş enerji santrali, batarya istasyonu, yakıt hücresi ile hidrojen tankı ve bu tanka hidrojen sağlayan bir elektroliz cihazı bulunmaktadır. Ayrıca, hem ortak bir DA gerilimi oluşturmak için dönüştürücü sistemler hem de bunları AA dalga formuna dönüştüren invertörler yer almaktadır.

Tez kapsamında;

- Yirmi beş yıllık süre boyunca tüketimin aynı kaldığı,
- Şebeke birim fiyatlarının artmadığı,
- Seçilen malzemelerin maliyetlerinde artış olmadığı,
- Güneş enerji santralinin kurulumunun yapıldığı yerin coğrafi açıdan uygun olduğu,
- Kullanılan malzemelerin belirlenen ömürleri boyunca sorunsuz çalıştıkları,

kabul edilmiştir.

Bu kısımda burada bahsedilen ve tez kapsamında kullanılan materyaller ve metot için detaylı bilgiler alt başlıklar halinde verilmiştir.

3.1 Mesken Yükleri

Bir evin laboratuvar ortamında oluşturulması oldukça zahmetli ve maliyet gerektiren bir işlemdir. Ayrıca bu cihazların hayatın olağan akışı içerisinde çalışma algoritmasını yapay olarak oluşturmak da beraberinde zorluklar getirmektedir. Bu sebeple, gerçek ölçümlenmiş veriler üzerinden analiz yapılmıştır.

3.1.1 Loughborough Lokasyonu

Akıllı Ev Teknolojisini kullanan Birleşik Krallık Evleri için Kişiselleştirilmiş Güçlendirme Karar Destek Araçları (Personalised Retrofit Decision Support Tools for UK Homes using Smart Home Technology) şeklinde isimlendirilen ve kısaca REFIT olarak bilinen veri seti bu çalışmada Loughborough lokasyonu (Lokasyon-1) için kullanılmıştır (Firth vd. 2017, Murray vd. 2017). REFIT veri seti, Strathclyde, Loughborough ve East Üniversiteleri arasında bir iş birliği sonucunda oluşturulmuş ve 2013–2015 döneminde Loughborough bölgesinde bulunan yirmi haneden altı-sekiz saniyelik zaman aralıklarında kayıt altına alınan enerji kullanımı, sıcaklık, nem, ısıtım vb. birçok veriyi içermektedir.

Ölçümü yapılan evlerin her biri, House 1, House 2,..., ve House 21 (House 14'ü atlayarak) şeklinde etiketlenmiştir. Her evde toplam enerji miktarını kaydedebilmek için bir akım probu ve ayrıca her cihazın enerji kullanımını ayrı ayrı kayıt altına alabilmek için ise dokuz bireysel cihaz monitörü (BCM) içeren on adet güç sensörü bulunmaktadır. Buradan elde edilen güç ölçümleri ise W cinsinden kayıt altına alınmıştır.

REFIT veri setinde bulunan dosyaların formatı CSV şeklindedir. Bu dosyaların standart bir düzeni bulunmaktadır ve aşağıda gösterilmiştir. Burada ilk iki sütun tarih bilgisi içermektedir. Birinci sütun normal tarih bilgisi iken ikinci sütun Unix zaman bilgisi içermektedir. Üçüncü sütunda toplam güç tüketimi yer alırken diğer sütunlarda dokuz farklı cihaza yerleştirilen sensörlerden elde edilen tüketim bilgileri yer almaktadır.

Tarih (YYYY-AA-GG SS:dd:ss), UNIX zaman bilgisi (UCT), Toplam, Cihaz1, Cihaz2, Cihaz3, ... , Cihaz9

Çizelge 3.1’de House 1’e ait cihaz listesinde, kayıt döneminin başında izlendiği bilinen cihazlar gösterilmektedir. Kullanıcılardan BCM’ler tarafından izlenen cihazları çıkarmamaları veya değiştirmemeleri istenmiş olsa da bunun böyle olacağını garanti edilmemiştir. Ayrıca, televizyon ve bilgisayar gruplarının birden fazla cihazdan (televizyon, DVD oynatıcı, bilgisayar, hoparlörler vb.) oluşabileceği de belirtilmiştir.

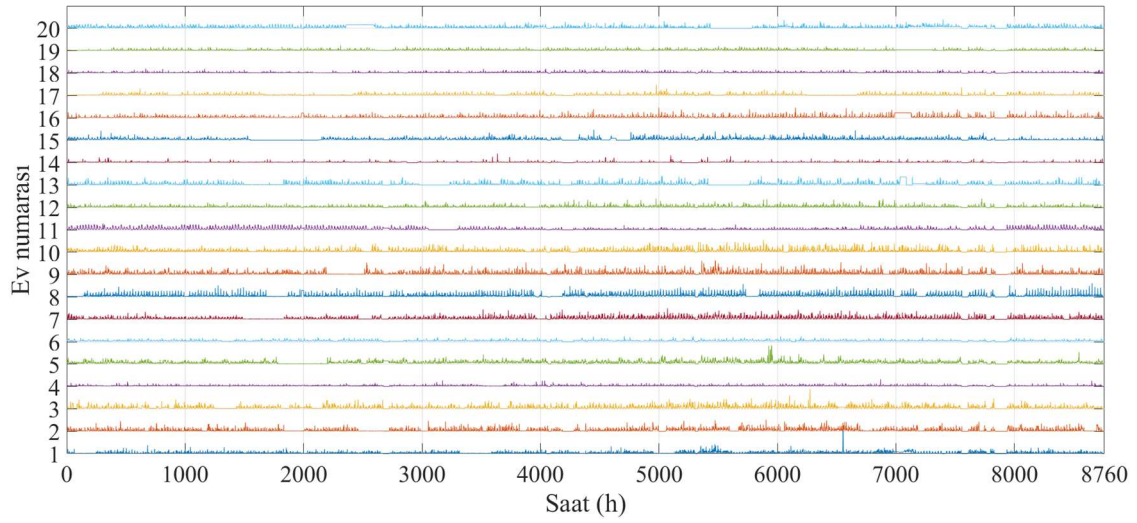
Sonuç olarak, cihaz bilgileri özel olarak bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiş, sadece Unix zaman sütunu ve toplam tüketimin yer aldığı üçüncü sütundan faydalanılmıştır.

Çizelge 3.1 House 1 cihaz listesi.

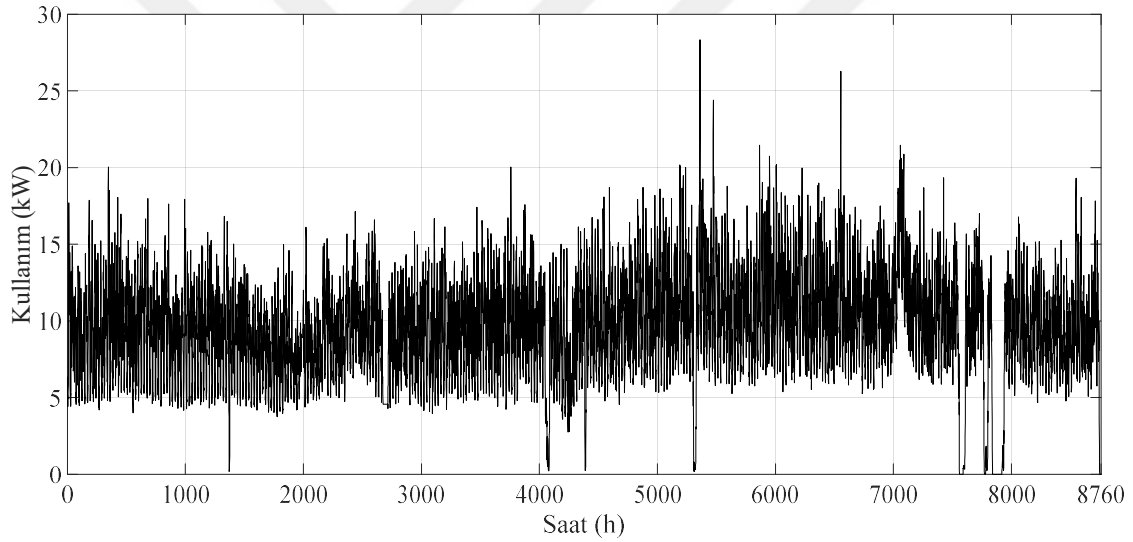
Numarası	Cihaz
0	Toplam Yük
1	Buzdolabı
2	Sandık Tip Dondurucu
3	Dolap Tip Dondurucu
4	Çamaşır Kurutucusu
5	Çamaşır Makinesi
6	Bulaşık Makinesi
7	Bilgisayar grubu
8	Televizyon grubu
9	Elektrikli Isıtıcı

Burada elde edilen veriler yalnızca yükte bir değişiklik olduğunda kayıt altına alınmıştır. Ayrıca bu veriler, boşluk iki dakikadan fazla olmadığı sürece kaydedilen son gerçek değerle ileriye doğru doldurulmuştur. Eğer bu boşluk iki dakikadan fazla ise sıfır ile doldurulmuştur. Veri toplanması süresince birkaç yerde dönemsel eksik veriler vardır, özellikle Şubat 2014. Bu kesintiler, evdeki internet arızası, donanım arızaları, ağ yönlendirme sorunları gibi bir dizi faktörden kaynaklanmıştır.

Şekil 3.1, yirmi evin bir yıl boyunca kayıt altına alınan enerji kullanım grafiklerini göstermektedir. Her bir evin kendine has enerji kullanımı mevcuttur. Şekil 3.2’de ise yirmi mesken kullanıcılarından elde edilen ölçümler sonucunda hesaplanan saatlik toplam güç talebi gösterilmiştir. Toplamda ortalama 9,5 kW’lık bir güç talebi söz konusudur. Ayrıca maksimum enerji talebinin 28,35 kW olduğu da görülmektedir (invertör verimi dahil edilmemiştir). Ek olarak, bir yıl boyunca yapılan ölçümlerde toplamda aynı anda talep edilen güç miktarının 20 kW’tan fazla olduğu saat sayısı ondur. Bu talep miktarları tasarım aşamasında önem kazanmaktadır.

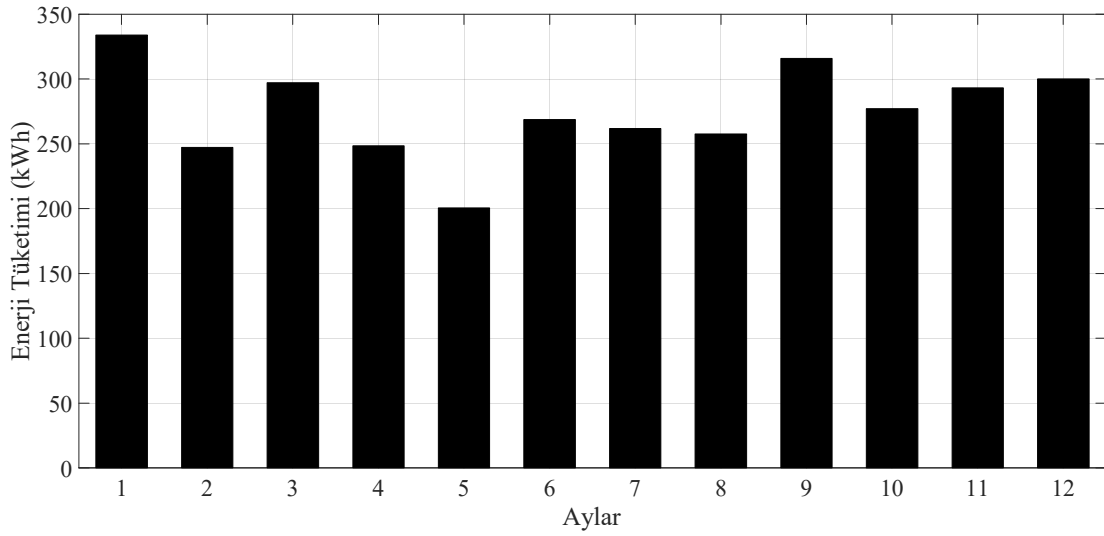


Şekil 3.1 Her bir ev için kullanım verileri.



Şekil 3.2 Loughborough lokasyonunun saatlik toplam güç talepleri.

Mesken kullanıcıları tarafından aylara göre günlük ortalama enerji tüketimleri Şekil 3.3’de sunulmuştur. 300 kWh’den fazla enerji talep edilen ay sayısı iki, 250 ile 300 kWh arasında enerji talep edilen ay sayısı yedi ve 250 kWh’den az enerji talebi olan ay sayısı ise üçtür. Ayrıca kış aylarında, yaz aylarından daha fazla bir enerji talebi olduğu da görülmektedir.

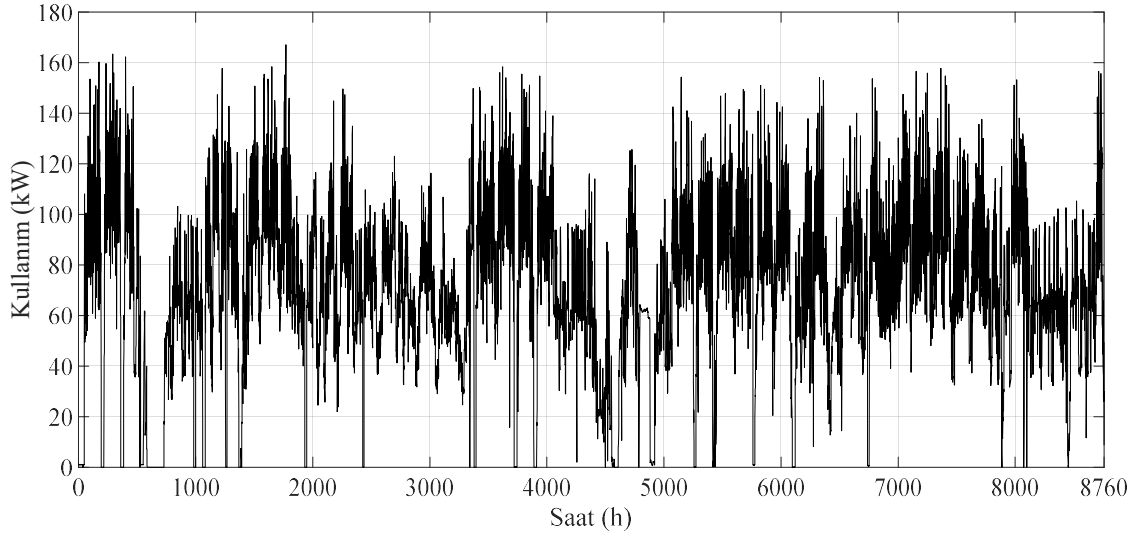


Şekil 3.3 Aylara göre günlük ortalama enerji tüketimi.

3.1.2 Afyonkarahisar Lokasyonu

Afyonkarahisar lokasyonu (Lokasyon-2) için saatlik ölçümlenmiş veriler kullanılmış ve Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Veriler bir yıllık bir süreci kapsamaktadır. Verilerin alınması sırasında meydana gelen haberleşme kesintilerinden kaynaklı veri kayıpları söz konusudur. Kayıp olan veriler, ilgili ayın öncesi ve sonrasındaki iki ay aynı zaman dilimindeki kullanımlarının ortalaması alınarak yeniden oluşturulmuştur.

Bu lokasyonda ortalama güç talebi 70,41 kW olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, maksimum talep gücü ise 167 kW’tır (invertör verimi dahil edilmemiştir). Kullanıcı sayısı ile alakalı bir bilgi verilmemiştir. Fakat, Lokasyon-1’den daha yüksek güç talebi olduğundan bu lokasyonda daha fazla sayıda kullanıcının olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.4 Afyonkarahisar lokasyonunun saatlik toplam güç talepleri.

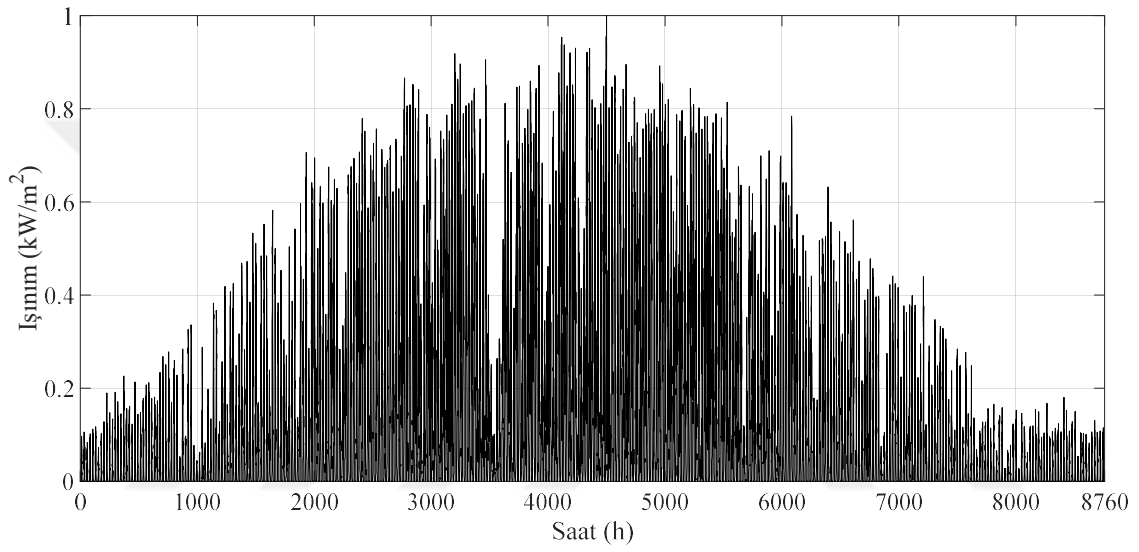
3.2 Güneş Enerjisi

Güneş panellerinin ürettikleri güç miktarları üç faktöre bağlıdır. Bunlar, üzerine düşen ışınlam miktarı, panel alanı ve panel verimidir. Işınlam miktarı [kW/m^2] ile, panel alanı [m^2] ile ve verim ise yüzdelik olarak ifade edilmektedir. Matematiksel gösterimi denklem 3.1'deki gibi ifade edilmiştir (Riffonneau vd. 2011). Bu denklemde ısı değişkeni göz ardı edilmiştir.

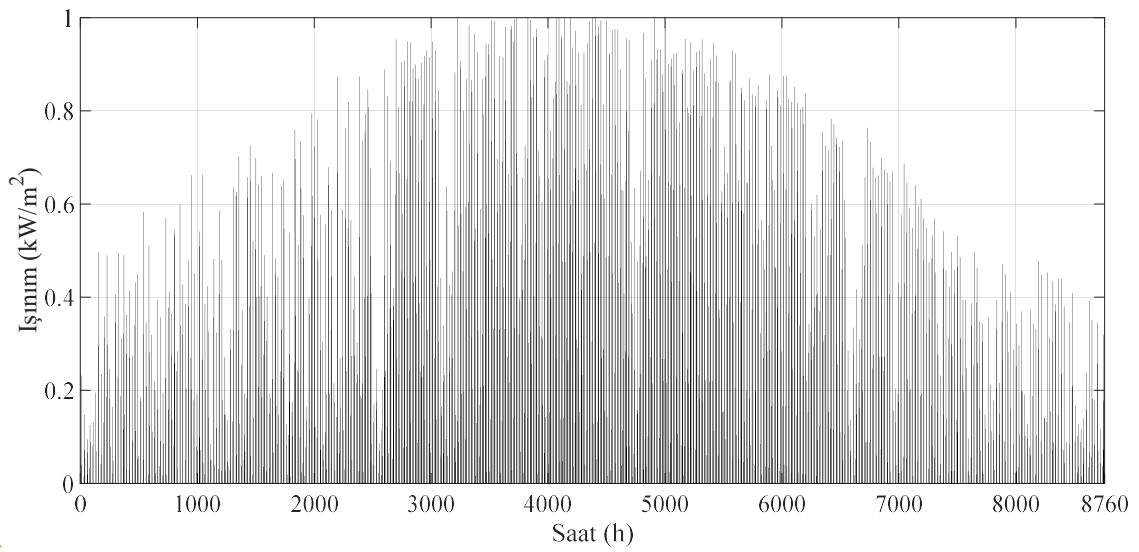
$$\text{Üretilen Güç} = \text{Işınlam} * \text{Panel alanı} * \text{Panel verimi} \quad (3.1)$$

Tez kapsamında iki farklı lokasyon için inceleme yapılmıştır. Bunlardan bir tanesi Loughborough (Lokasyon 1; $1^{\circ}15'$ Batı meridyeni ve $52^{\circ}45'$ Kuzey paraleli) diğeri ise Afyonkarahisar (Lokasyon 2; $30^{\circ}32'$ Doğu meridyeni ve $38^{\circ}46'$ Kuzey paraleli). Her iki lokasyonda farklı enlem ve boylamlarda yer almaktadır. Bunun sonucunda farklı ışınlam karakteristiklerine sahiptirler. Lokasyon 1 için REFIT veri setinden alınan bir yıllık güneş ışınlam verileri saatlik olarak Şekil 3.5'de ve Lokasyon 2 için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmış bir yıllık güneş ışınlam verileri saatlik olarak Şekil 3.6'de sunulmuştur. Ortalama yıllık Lokasyon 1 için $0,194 \text{ kW/m}^2$ ve Lokasyon 2 için $0,396 \text{ kW/m}^2$ 'lik bir ışınlam şiddeti bulunmaktadır.

Şekilde görüldüğü üzere yaz aylarında yoğun bir güneş potansiyeli mevcutken kış aylarında bu durum tam tersine dönmektedir. Ayrıca yaz aylarında bazı günlerde ışıının çok düşük seviyelerde ölçümlenmiştir. Bunun sebebi ölçüm yapılan lokasyondaki hava olaylarıdır. Burada nem oranı, bulutluluk durumu ve yağış gibi bir dizi farklı durumların etkisi ile ışıının miktarları olması gereken seviyenin altında seyrettiği durumlarda gözlemlenmektedir. Dolayısıyla, gerçek veriler kullanıldığından bu gibi durumlar için ayrıca bir varsayımda bulunmaya gerek kalmamıştır.



Şekil 3.5 Loughborough için bir yıllık güneş ışıının verisi.

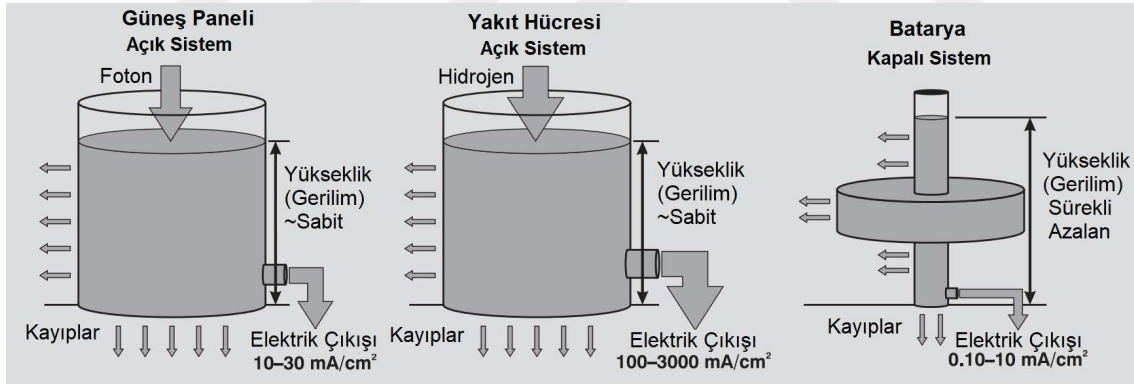


Şekil 3.6 Afyonkarahisar için bir yıllık güneş ışıının verisi.

Bu çalışmada her biri 540 W tepe değerine sahip olan güneş panelleri seçilmiştir. Başka bir deyişle, 1000 W/m^2 ışıma maruz kaldığında üreteceği enerji miktarı 540 W olacaktır. Burada kullanılan panellerin çalışma ömrü yirmi beş yıldır. Buna ek olarak, yıllara göre güneş panellerinde meydana gelecek verim düşüklüğü durumu ihmal edilmiştir. Ayrıca, güneş paneli, konstrüksiyon, elektrik malzemeleri, işçilik ve mühendislik ile güneş enerji sisteminin ilk yatırım maliyeti 900 \$/kW ve bakım ve onarım masrafları ise 5 \$/yıl/kW'dır.

3.3 Yakıt Hücresi

Yakıt hücreleri, elektrokimyasal bir dönüşüm ile elektrik enerjisi üreten cihazlardır. Bu cihazların enerji üretebilmesi için yakıt olarak hidrojen ve oksijenin belirli bir basınç ve sıcaklık altında sağlanması gerekmektedir (O'Hayre vd. 2016). Yakıt hücreleri Şekil 3.7'de gösterildiği gibi güneş panellerinden daha yoğun bir enerjiye sahiptirler. Bu özelliği ise tek başına bir sistemi zorlanmadan besleyebilme kabiliyeti sağlamaktadır.



Şekil 3.7 Güneş paneli, yakıt hücresi ve batarya sistemlerinin enerji yoğunluklarının karşılaştırılması (O'Hayre vd. 2016).

Çeşitli boyutlarda enerji üretebilen farklı kimyasal yapılarda yakıt hücreleri mevcuttur. Bunlar, fosforik asit yakıt hücresi (PAFC), alkali yakıt hücresi (AFC), erimiş karbonat yakıt hücresi (MCFC), katı oksit yakıt hücresi (SOFC), proton değişim zarlı yakıt hücresi (PEMFC)'dir. Bunların içerisinde PEM tipi yakıt hücreleri düşük çalışma sıcaklıkları ve yüksek verimlilikleri ile düşük güç ihtiyacı olan mesken kullanımında tercih edilmektedir (Aktaş ve Doğan 2022). Bu sebeple, PEM yakıt hücresinin özellikleri baz alınmıştır.

Kullanılması planlanan yakıt hücresi PEM tipinde ve çalışma ömrü elli bin saat olarak belirtilmiştir. Ne kadarlık bir güçte yakıt hücresi kullanılacağı ise boyutlandırma bölümünde ele alınmıştır. Bu yakıt hücresinin ilk yatırım maliyeti 600 \$/kW ve bakım onarım maliyetleri ise 0,01 \$/h/kW'tır (Ghenai vd. 2020).

3.4 Bataryalar

Bataryalar bu sistemde ani güç geçişlerinde sistemi korumak adına yerleştirilmiştir. Asli olarak bir besleme döngüsü içerisinde olmaktan ziyade sistemin kararlılığını koruma amacıyla çalışmaktadırlar. Kullanılan bataryaların her birisi 100 Ah ve 12 V değerinde kurşun asit tipinde seçilmiştir. Bataryaların kurulum maliyeti 100 \$/adet'tir. Kurşun-asit olarak seçildiğinden bakım gerektirmemektedir ve bakım masrafı bulunmamaktadır.

3.5 Güç Dönüştürücüleri

Bataryalar, yakıt hücresi ve güneş panelleri DA elektrik enerjisi üretmektedir. Fakat üretilen bu DA elektrik enerjisi hava şartlarına, yüklenme ve doluluk oranı gibi bir dizi faktöre bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Bundan dolayı, bu sistemler sonrasında regüle edebilen DA-DA dönüştürücülerinin (konvertör) bulunması gerekmektedir. Bunlara ek olarak elektroliz cihazı da DA enerjisi kullanır. Regülasyon sonrasında ise ortak bir DA barası (400 V) oluşturularak invertör için gerekli gerilim sunulmaktadır. Takibinde ise DA barası invertörü besleyerek AA elektrik enerjisi elde edilmiş olunacaktır. Elde edilen bu AA enerjisi ile son kullanıcıların beslenmesi amaçlanmıştır.

Dönüştürme işlemleri sırasında her bir konvertör ve invertör üzerinde kayıplar oluşmaktadır. Bu sebeple mümkün olan en az sayıda ara dönüştürücü kullanılması amaçlanmıştır. Böylece, ısı ve başka şekillerle enerjinin kaybolmasının önüne geçilmesi ile verimde artış sağlanması hedeflenmiştir.

Kullanılacak olan invertör ve konvertörlerin verimi %96, çalışma ömürleri yirmi beş yıl, ilk yatırım maliyetleri 40 \$/kW ve bakım onarım maliyetleri ise 10 \$/yıl/kW'tır (Ghenai vd. 2020).

3.6 Elektroliz Cihazı

Elektroliz cihazı, hidrojen üretebilmek için elektrik enerjisi ve suyu kullanır. Suyun elektrolizi DA kullanılarak su molekülünün oksijen ve hidrojene ayrıştırılması işlemidir. Bu nedenle elektrolizörler, elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştüren elektrokimyasal cihazlar olarak isimlendirilirler. Hidrojen ve oksijen üreten elektrokimyasal reaksiyonları sürdürmek için çevreden sürekli bir su, elektrik ve ısı kaynağına ihtiyaç duyarlar. Suyun parçalanmasından üretilen hidrojen ise %99,999 saflıkta elde edilir (Barbir 2005).

Elektrolizörler, yakıt hücreleri ve pillere benzer bir yapıya sahiptir. Üç temel unsurdan oluşurlar: bir anot, bir katot ve bir elektrolit. Elektrolit, anot ve katodu fiziksel ve elektriksel olarak ayırır. Birincil işlevi, iyonların akışını sağlamak ve aynı zamanda elektron akışını engellemektir. Anot ve katot, suyun tüketildiği ve hidrojen ile oksijenin üretildiği elektrotlardır. Esasen yakıt pili ile aynı temel yapıya sahip oldukları için yakıt pillerine benzer şekilde çalışırlar. Yakıt pilleri, hidrojen ve oksijenin kimyasal bağlarında depolanan enerjiyi, su ve ısı ile DA güç üretmek için dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. Elektroliz ise, yakıt hücrelerinin dayandığı işlemin tersine çevrilmiş bir versiyonudur. Böylece elektrolizör hücresinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar, yakıt hücrelerindeki reaksiyonlara benzerdir. Aradaki fark, reaksiyonların anot ve katoda göre tersine çevrilmesidir. Yakıt hücrelerinde hidrojen reaksiyona girer ve anotta tüketilirken, elektrolizörlerde katotta hidrojen üretilir. Aynısı oksijen reaksiyonunda da geçerlidir, yakıt hücrelerinde oksijen reaksiyona girer ve katotta tüketilir. Elektrolizörlerde ise anotta oksijen üretilir.

Özetlemek gerekirse, elektrolizörler, bir DA güç kaynağı kullanarak hidrojen üretimi için suyun parçalanması işlemine dayanır. Tek ürün hidrojen ve oksijen olduğu için, suyun parçalanması işlemi, sera gazı emisyonları veya diğer zehirli gazlar ile çevreyi kirletmez. Eğer sistemin tamamının sera gazı emisyonuna sebebiyet verilmeden yapılması istenirse, suyun parçalanma işleminde kullanılan elektriğin de yenilenebilir bir enerji kaynağından üretilmesi gerekir. Ayrıca elektrolizörler ile güneş ve rüzgar enerjisi üretimi gibi yenilenebilir enerji kaynakları arasında belirli bir sinerji vardır. Yenilenebilir enerjileri

elektrolizörlerle birleştirerek, yenilenebilir enerji üretiminin kesintisiz olması sağlanabilir. Güç talebinin düşük olduğu zamanlarda, hidrojen gazı üretmek için yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen gücün fazlası elektrolizörde kullanılabilir. Hidrojen gazı ise daha sonra güç talebi yüksek olduğunda kullanılmak üzere depolanabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç talebini karşılayamadığı zamanlarda, depolanan hidrojen, ihtiyaç duyulan ekstra gücü sağlamak için yakıt hücreleri tarafından kullanılabilir. Esasen, yenilenebilir enerji sistemlerinde hidrojen ve elektrik enerjisinin ortak üretimi, kesintili üretimleriyle ilgili ana sorunların çözülmesine yardımcı olur.

Kullanılan elektroliz cihazı 0,15 kg/h üretim kapasitesine sahip bulunmakta ve elektroliz cihazının çalışma ömrü on beş yıldır. Elektroliz cihazının yatırım maliyeti 150 \$/kW ve bakım onarım maliyeti ise 8 \$/yıl/kW'tır (Ghenai vd. 2020).

3.7 Hidrojen Depolama Tankı

Yakıt hücreleri yeterli yakıt sağlandığında, istenilen düzeyde enerji üretebilmektedir. Bu yakıtlardan hidrojenin yüksek saflıkta olması gerekmektedir (%99>), fakat oksijen için bu şekilde bir gereklilik yoktur. Saf hidrojenin üretilmesi için elektroliz cihazı gerekmektedir. Elektroliz cihazı ile üretilen hidrojenin bir tank içerisinde depolanması şarttır. Bu çalışmada kendi kendine yeten bir sistem amaçlandığı için tankın büyüklüğü önem arz etmekte ve sistemde bulunan diğer parametrelerin büyüklükleri ile değişebilmektedir. Bu tank yüksek basınca dayanabilmeli ve hidrojen kaçırmaması gerekmektedir. Ayrıca mevsimsel değişimlere karşı duyarlılığı düşük olmalıdır. Böylece ihtiyaç fazlası olan enerji ile üretilen hidrojen, ihtiyaç olan zaman dilimlerinde kullanılabilir.

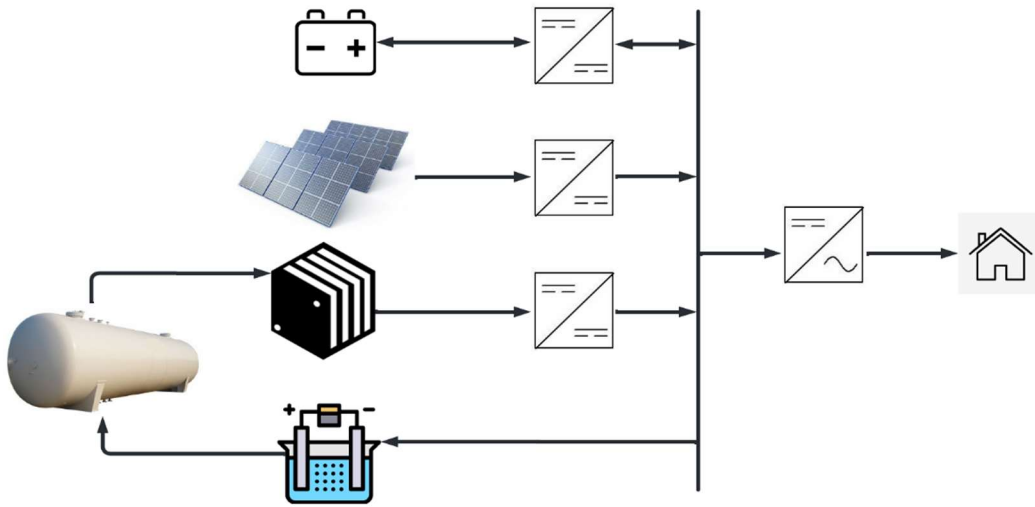
Burada kullanılması planlanan hidrojen tankları gaz formunda hidrojeni depolayabilecek bir yapıdadır. Hidrojen tankının ömrü yirmi beş sene ve ilk yatırım maliyeti 0,5 \$/kg ve bakım onarım maliyeti ise 10 \$/yıl/kg'dır (Ghenai vd. 2020).

3.8 Güç Dengesi ve Boyutlandırma

Elektrik enerjisi tabiatı itibariyle üretildiği anda tüketilmelidir. Burada tüketimden kasıt yüklerin enerjilendirilmesi veyahut da elektroliz cihazının çalıştırılmasıdır. Dolayısıyla güç üreten ve bunların tüketimini yapan cihazların bir denge içerisinde olması gerekir. Buna güç dengesi adı verilmektedir ve denklem 3.2'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\sum_{t=1}^T (P_{PV}(t) + P_{FC}(t) + P_{disc}(t)) = \sum_{t=1}^T (P(t) + P_{EL}(t) + P_{cha}(t)) \quad (3.2)$$

Burada $P_{PV}(t)$ güneş paneli tarafından, $P_{FC}(t)$ ise yakıt hücresi tarafından üretilen gücü, $P_{disc}(t)$ bataryaların deşarj modunu, $P_{cha}(t)$ ise bataryaların şarj modunu ifade etmektedir. Aynı şekilde $P(t)$ mesken kullanıcıları tarafından tüketilen gücü ve $P_{EL}(t)$ ise elektroliz cihazının tüketimini ifade etmektedir. Sistemin blok diyagramı Şekil 3.8'da verilmiştir.

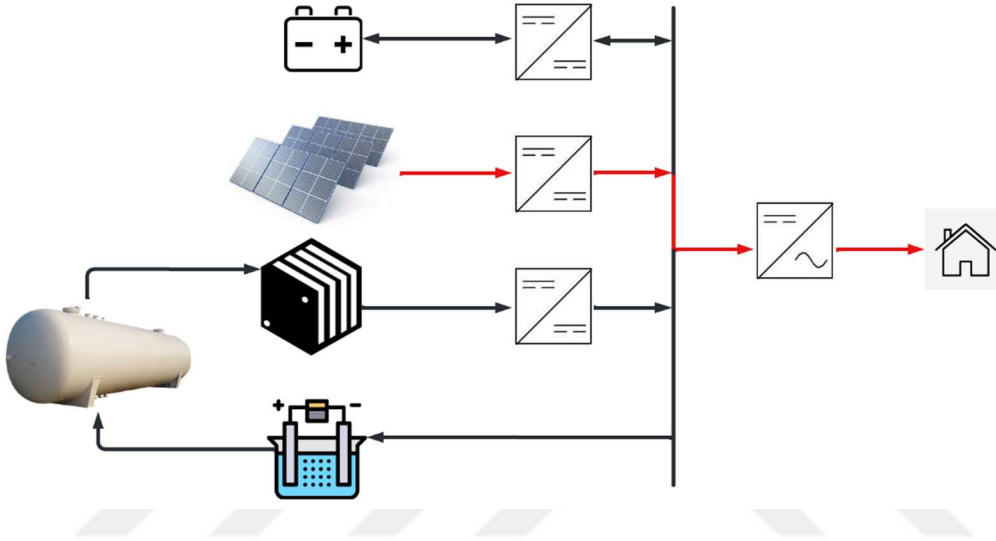


Şekil 3.8 Sistemin blok diyagramı.

Şekilde belirtilen sistemin çalışması modlar halinde aşağıdaki gibi açıklanmıştır. Ayrıca her mod sırasında oluşan güç denklemi de verilmiştir. Bu denklemlerde aktif olanlar siyah, pasif durumda olanlar ise gri renkte gösterilmiştir.

Mod 1: Güneş enerjisinden elde edilen enerji talep edilen enerjiye eşit olması durumudur ve blok diyagramı Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Bu durumda yük tarafının talep ettiği enerji güneş panelleri tarafından sağlanmaktadır ve denklem 3.3’te gösterilmiştir. Böylece yükler direkt olarak güneş panellerinden beslenmektedir.

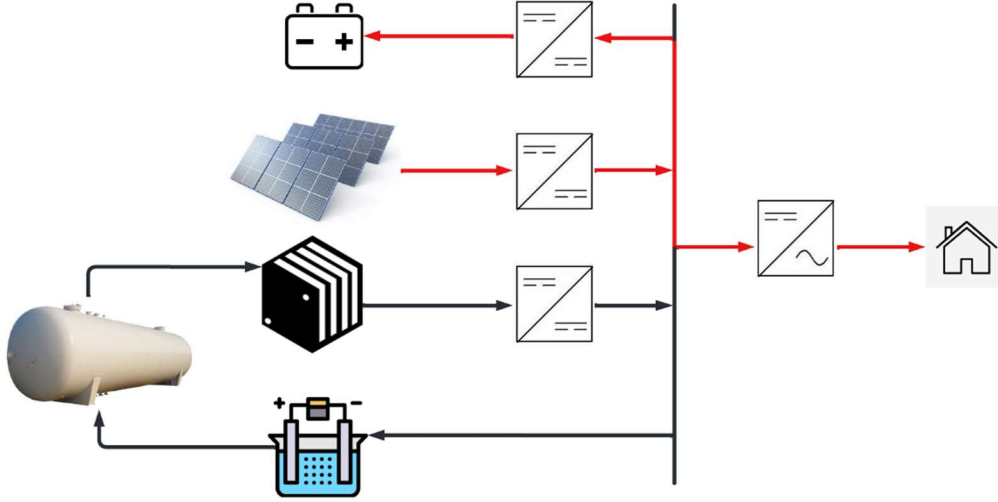
$$P_{PV}(t) + P_{FC}(t) + P_{disc}(t) = P(t) + P_{EL}(t) + P_{cha}(t) \quad (3.3)$$



Şekil 3.9 Mod 1 blok diyagramı.

Mod 2: Güneş panelinden elde edilen enerjinin yük tarafının talep ettiği enerjiden fazla olması durumunda ilk olarak bataryalar şarj edilmektedir. Böylece bataryalar ihtiyaç anında talep edildiğinde hızlı reaksiyon verebilen bir rezerv enerji deposu konumunda tutulmaktadır. Bu durumun blok diyagramı Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Buradaki güç eşitliği denklem 3.4’te gösterilmiştir.

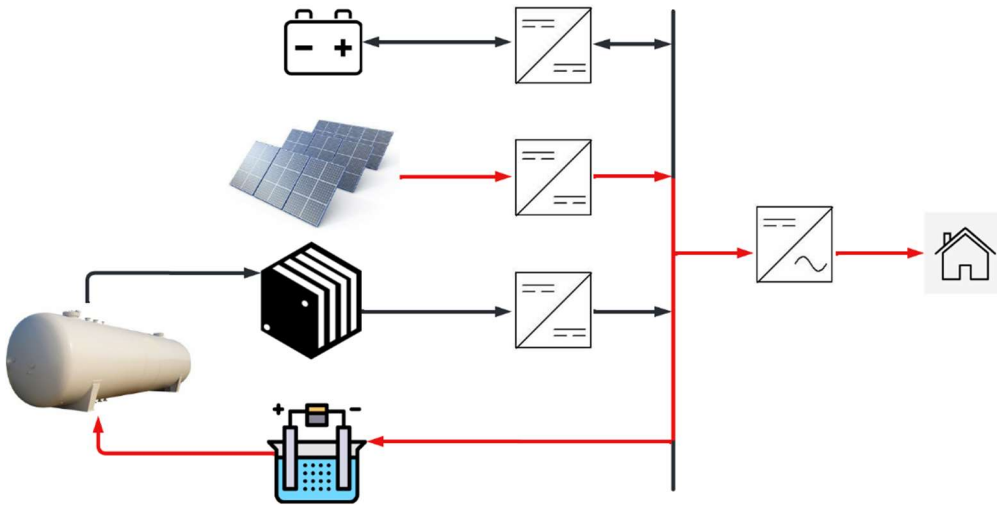
$$P_{PV}(t) + P_{FC}(t) + P_{disc}(t) = P(t) + P_{EL}(t) + P_{cha}(t) \quad (3.4)$$



Şekil 3.10 Mod 2 blok diyagramı.

Mod 3: Güneş enerjisinden elde edilen enerji yük tarafındaki talebin üstünde ise ve bataryalar tam şarj modundaysa, üretilen fazla enerji elektroliz cihazının aktif hale gelerek hidrojen üretmesini sağlamaktadır. Elektroliz cihazı nominal güçte çalıştırılabileceği gibi kısmi olarak da çalıştırılabilmektedir. Böylece enerji fazlalığı sürekli değerlendirilebilmektedir. Bu durumun blok diyagramı Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Bu durumdaki güç eşitliği ise denklem 3.5’te gösterilmiştir.

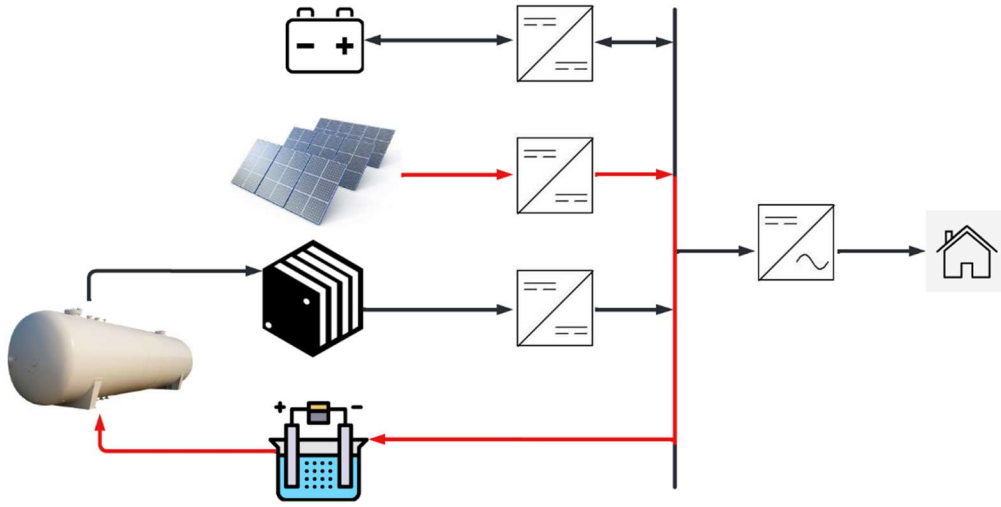
$$P_{PV}(t) + P_{FC}(t) + P_{disc}(t) = P(t) + P_{EL}(t) + P_{cha}(t) \quad (3.5)$$



Şekil 3.11 Mod 3 blok diyagramı.

Mod 4: Yük talebinin olmadığı, bataryaların tam kapasite dolu olduğu ve güneş panellerinden enerji elde edildiği durumlarda ise elektroliz cihazı çalıştırılarak hidrojen depolanma süreci başlatılmaktadır. Bu durumun blok diyagramı Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Elektroliz cihazının ihtiyacı olan enerjiden fazla enerji üretilmiş ise bu enerji atıl olacaktır. Bu durumdaki güç eşitliği ise denklem 3.6’da gösterilmiştir.

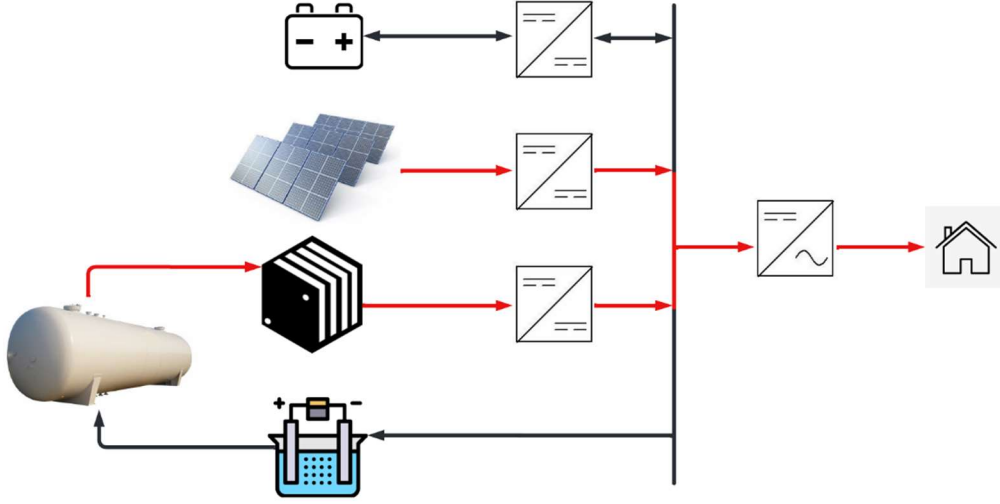
$$P_{PV}(t) + P_{FC}(t) + P_{disc}(t) = P(t) + P_{EL}(t) + P_{cha}(t) \quad (3.6)$$



Şekil 3.12 Mod 4 blok diyagramı.

Mod 5: Güneş panelinden elde edilen enerji yük tarafından talep edilen enerjiden az olduğu durumda ise yakıt hücresi çalıştırılarak enerji arzı desteklenmektedir. Bu durumun blok diyagramı Şekil 3.13’te gösterilmiş ve güç eşitliği denklem 3.7’de gösterilmiştir.

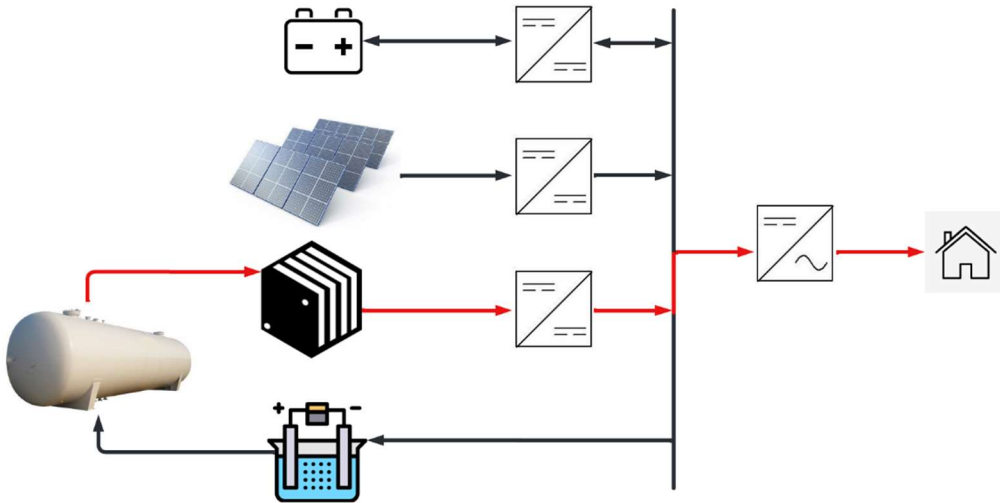
$$P_{PV}(t) + P_{FC}(t) + P_{disc}(t) = P(t) + P_{EL}(t) + P_{cha}(t) \quad (3.7)$$



Şekil 3.13 Mod 5 blok diyagramı.

Mod 6: Güneş panellerinden enerji arzının sağlanamadığı durumlarda, talep edilen bütün enerjinin öncelikle yakıt hücresi tarafından sağlanması gerekmektedir. Bunun gerçekleştirilebilmesi için yakıt tankında yeterli hidrojen bulunması gerekmektedir. Böylece yakıt hücresi ihtiyaç olan enerji karşılayarak yük enerjilendirilmiş olunacaktır. Bu durumun blok diyagramı Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Buradaki güç denklemi ise denklem 3.8'de gösterilmiştir.

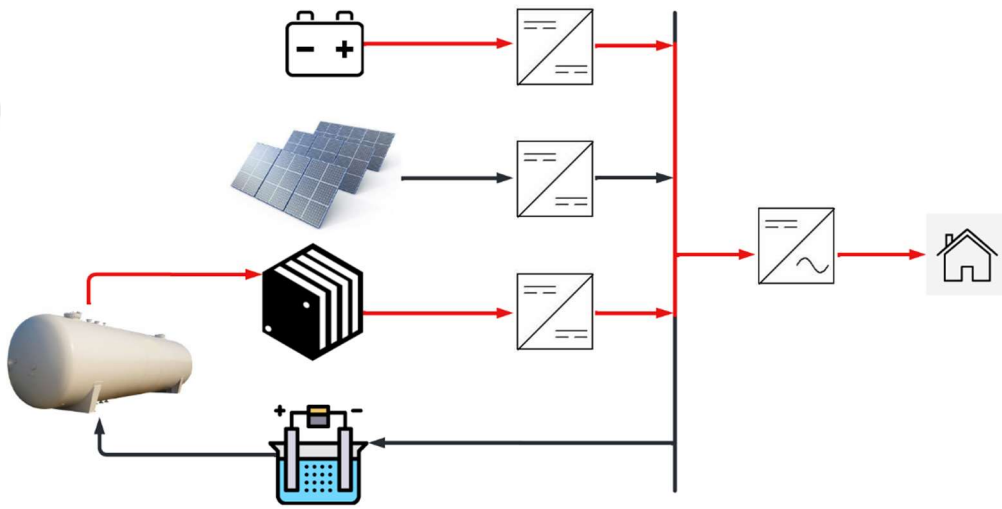
$$P_{PV}(t) + P_{FC}(t) + P_{disc}(t) = P(t) + P_{EL}(t) + P_{cha}(t) \quad (3.8)$$



Şekil 3.14 Mod 6 blok diyagramı.

Mod 7: Güneş panellerinden enerji arzının sağlanamadığı durumlarda, talep edilen bütün enerjinin yakıt hücresi tarafından sağlanması gerekmektedir. Fakat, hidrojen tankında da yeterli yakıt bulunmadığı zamanlarda batarya bloğundan destek alınmaktadır ve bu durumun blok diyagramı Şekil 3.15’te gösterilmiştir. Bu durumdaki güç denklemi ise denklem 3.9’daki gibi oluşmaktadır.

$$P_{PV}(t) + P_{FC}(t) + P_{disc}(t) = P(t) + P_{EL}(t) + P_{cha}(t) \quad (3.9)$$



Şekil 3.15 Mod 7 blok diyagramı.

Sistemin akış şeması Şekil 3.16’da verilmiştir. Burada, $P_{dif}(t)$ fazla enerji miktarını, $SOC(t)$ anlık akü şarj seviyesini, $H_T(t)$ anlık hidrojen ihtiyacını, H_{Tmax} ve H_{Tmin} maksimum ve minimum tank seviyesini belirtir.

Boyutlandırmanın gerçekleştirilebilmesi için girdilerin ve hedefin ortaya konulması gerekmektedir. Buradaki girdilerimiz kullanılan malzemelerin teknik verileri, meteorolojik veriler, yük profilleri ve maliyet verileridir. Burada önemli olan ilk hedef elektrik ihtiyacının kesintisiz bir biçimde karşılanması olacaktır. Bu kriter sağlandığında ise bu kriteri sağlayan minimum maliyetin ortaya konulması bir sonraki hedef olacaktır. Boyutlandırma, çalışma açık arazi koşullarında gerçekleştirildiğinden fiziksel alanların kullanımı göz ardı edilerek gerçekleştirilmiştir.

PV panel sayısı ise iterasyonlardan sonra belirlenmiştir. Panel sayısı birden başlayarak artırılır ve son olarak güç dengesini sağlayabilecek minimum sayıda sonlandırılır. Bu arada elektrolizörün gücü ve hidrojen tankı kapasitesi maksimumda tutulur. Böylece Lokasyon-1 için 224 PV panel ve Lokasyon-2 için 747 PV panel hesaplanmıştır. Ayrıca, elektrolizör ve hidrojen tankı için ise yıl boyunca tank içerisindeki hidrojen gazı miktarındaki değişimin pozitif olması aranmaktadır. Aksi halde her sene giderek azalan bir miktarda hidrojen üretimi olacak ve bu durumda bir süre sonra yakıt tankı boşalarak sisteme enerji üretecek yakıt hücresi için gerekli olan yakıt elde edilememiş olunacaktır. Bu sebepten Lokasyon-1 için 30 kW ve Lokasyon-2 için ise 270 kW'lık bir elektroliz sistemi boyutlandırılmıştır. Bu elektroliz cihazları tam kapasite çalıştırıldıklarında sırasıyla 0,9 ve 8,1 kg'lık hidrojen üretebilmektedirler. Bu sebepten, bu boyutlandırma sonrasında Lokasyon-1 için 700 kg ve Lokasyon-2 için ise 4 300 kg'lık hidrojen tankı yeterli olacağı hesaplanmıştır.

İnvertörler sadece yüklerin beslenmesi durumunda ihtiyaç duyulan dönüştürücülerdir. Bu sebeple maksimum yük talep gücü kadar boyutlandırılması yeterlidir. Sonuç olarak, Lokasyon-1 için 30 kW ve Lokasyon-2 için 180 kW'lık invertör boyutlandırılmıştır. Konvertörler ise yakıt hücresi, güneş panelleri ve batarya bloğu tarafından kullanılmaktadırlar. Batarya ve yakıt hücresinin her biri tek başlarına yükü besleyebilecek kapasitede olduklarından maksimum yük talep gücü kadar boyutlandırılmışlardır. Sonuç olarak, Lokasyon-1 için 30 kW ve Lokasyon-2 için 180 kW'lık konvertörler seçilmiştir. Ancak güneş panellerine bağlanan dönüştürücü için daha büyük bir boyut gereklidir. İki seçenek vardır ve seçim minimum boyuta göre yapılır. İlk seçenek, güneş panellerinin üreteceği maksimum gücü temel almaktır. İkinci seçenek, maksimum talebi güce dayandırmaktır. Bu nedenle ikinci seçeneğe göre Lokasyon-1 için 90 kW, birinci seçeneğe göre Lokasyon-2 için 400 kW olarak boyutlandırılmıştır. Buna göre sonuçlar Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2 Kullanılacak malzeme listeleri.

Kullanılan Malzeme	Lokasyon-1	Lokasyon-2
	Miktarı	Miktarı
PV panel	224 adet @0,54 kWp	747 adet @0,54 kWp
Yakıt hücresi	30 kW	180 kW
Elektroliz cihazı	30 kW	270 kW
Hidrojen tankı	700 kg	4 300 kg
Batarya	25 adet @1.2 kWh	150 adet @1.2 kWh
İnvertör	30 kW	180 kW
Konvertör-Batarya	30 kW	180 kW
Konvertör-PV panel	90 kW	400 kW
Konvertör-Yakıt hücresi	30 kW	180 kW

4. BULGULAR

Tez kapsamında ortaya konan ve kendi kendine yetmesi planlanan sistemde, elektrik enerjisinin üretimi sadece PV panelleri ve yakıt hücresi tarafından gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bunların haricinde ani güç taleplerinin karşılanması ve acil durumlarda enerji sağlaması amacıyla bir batarya bloğu bulunmaktadır. Yine aynı şekilde, sistemde bulunan bütün yükler, şarj durumundaki bataryalar ve yakıt hücresi için hidrojen üreten elektroliz cihazı ise enerji tüketicileri olarak yer almaktadırlar. Kendi kendine yetebilen bir sistemde bütün bu üretim ve tüketim istasyonlarının dengede bulunması gerekmektedir. Böylece, tamamı yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmiş ve sıfır CO₂ emisyonuna sahip bir üretim istasyonu oluşturulmuştur.

PV, FC, EL ve BT'nin bulunduğu ve mesken kullanıcılarının bir yıl boyunca şebekeden izole şekilde beslendiği bir sistem iki farklı lokasyon için teknik ve ekonomik anlamda incelenmiştir. Ayrıca, aynı mesken sisteminin şebeke üzerinden beslenmesi durumu da incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gerçek veriler kullanılarak incelenen bu durumlar alt başlıklar halinde sunulmuştur.

4.1 Yenilenebilir Enerji Sistemleri ile Besleme Durumu

PV, FC, EL ve BT'den oluşan yenilenebilir enerji sisteminde (Şekil 3.8) güneş panelleri asıl enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynağı, yükleri beslemekte, bataryaları şarj etmekte ve yakıt hücresinin enerji üretebilmesi için gerekli olan yakıtın temin edilmesini sağlamaktadır.

Son kullanıcılardan alınan ölçüm verileri sonrasında elde edilen aylık toplam enerji tüketimi miktarları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Lokasyon-1 için bir yılda toplam 86 416 kWh'lik ve Lokasyon-2 için ise 642 520 kWh'lik bir enerji ihtiyacı mevcuttur. Lokasyon-1 tüketimine bakıldığında bu bölgede yaşayan son kullanıcıların kış aylarında daha fazla enerji kullanımı eğiliminde oldukları anlaşılmaktadır. Yaz aylarında ise nispeten daha az enerji kullanımları mevcuttur. Lokasyon-1 için tüketilen bu enerjinin tamamının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması amaçlandığından bu durum zorlayıcı bir

etki oluşturmaktadır. Çünkü, asıl enerji kaynağı olarak güneş panellerinin kullanılması ve Şekil 3.5’de gösterilen bir yıllık ışıınım şiddeti verileri birlikte değerlendirildiğinde, bu lokasyon için kışın daha az yazın ise daha fazla enerji üretimi ile karşılaşılacaktır. Bununla birlikte, güneş panelleri doğa olaylarına karşı yüksek hassasiyete sahiptirler. Yaz gününde bile beklenen yüksek üretim bulutlanma, tozlanma vb. etkilerle azalabilmektedir (Eşlik vd. 2022). Yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılan yakıt hücresi ise bu durumdan bağımsızdır.

Çizelge 4.1 Lokasyonlardaki aylık toplam enerji tüketim miktarları.

Aylar	Lokasyon-1 [kWh]	Lokasyon-2 [kWh]
Ocak	7 243	43 228
Şubat	6 295	45 021
Mart	6 164	62 272
Nisan	6 774	54 025
Mayıs	7 056	54 960
Haziran	6 616	57 203
Temmuz	7 875	36 337
Ağustos	8 301	62 236
Eylül	8 489	52 821
Ekim	8 642	64 530
Kasım	5 818	58 098
Aralık	7 137	51 785
Toplam	86 416	642 520

Her iki lokasyon için kurulumu yapılan güneş panellerinden elde edilen aylık toplam enerji üretim miktarları Çizelge 4.2’de görülmektedir. Beklendiği gibi, kış aylarında daha az güneş ışıınımı olmasından dolayı daha az bir enerji üretimi söz konusudur. Bu üretim yaz aylarında artmakta ve Temmuz ve Haziran aylarında her iki lokasyon için en yüksek seviyesine ulaşmaktadır. Bu durum mesken kullanıcılarının ihtiyacı olan enerji miktarından daha fazla bir enerji üretiminin olduğunu göstermektedir. Ayrıca unutulmamalıdır ki, her iki lokasyonda panel sayıları farklıdır. Bu sebeple üretim miktarlarındaki fark buradan kaynaklanmaktadır.

Her iki lokasyon için, yılın en az altı ayında ihtiyaç fazlası enerji üretimi söz konusudur. Unutulmamalıdır ki, güneş panellerinin enerji üretimi sınırlı zaman aralığında meydana gelmektedir ve doğa olayları ile direkt ilişkilidir. Bu sebeple hem kısıtlı bir zaman diliminde hem de kararsız bir şekilde enerji üretimi söz konusudur. Bu durumun

üstesinden gelmek adına yardımcı bir enerji kaynağı kullanılması zorunluluktur ve bu kapsamda PEM tipi yakıt hücresinden faydalanılmıştır.

Çizelge 4.2 PV panellerinden elde edilen aylık toplam enerji üretim miktarları.

Aylar	Lokasyon-1 [kWh]	Lokasyon-2 [kWh]
Ocak	1 958	22 532
Şubat	3 368	30 611
Mart	7 661	45 121
Nisan	13 988	58 551
Mayıs	13 881	81 000
Haziran	16 203	87 803
Temmuz	18 419	85 734
Ağustos	13 500	82 487
Eylül	8 460	65 759
Ekim	4 942	44 656
Kasım	2 204	26 560
Aralık	1 444	19 885
Toplam	106 032	650 702

Yakıt hücresi, enerji arz-talep dengesinde önemli ve kritik bir rol üstlenmektedir. Kış aylarında azalan güneş enerjisi üretiminden kaynaklı arz miktarındaki düşüş yakıt hücresi tarafından karşılanmaktadır. Bu sebeple yakıt hücresindeki üretim miktarları Çizelge 4.3’de görüldüğü üzere kış aylarında nispeten yüksek seviyelerindedir. Yaz aylarındaki üretimler ise bulutlanma ve yağmur gibi doğa olaylarından veya güneşin bulunmadığı gece vakitlerindeki talebin karşılanması amacıyla ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.4, aylık toplam hidrojen üretimi, tüketimi ve hidrojen tankında ay bazında meydana gelen toplam değişimi göstermektedir. Burada da görüldüğü üzere yaz aylarında güneş panellerinden üretilen arz fazlası enerjinin bir kısmı elektroliz cihazı vasıtasıyla hidrojen gazı üretimi ve depolanmasına harcanmaktadır. Lokasyon-1 için Eylül-Şubat döneminde ve Lokasyon-2 için ise Ekim-Mart döneminde hidrojen tankında bulunan gaz rezervi azalmaya başlamaktadır. Dikkat edilmelidir ki bu aylarda üretim az miktarlarda da olsa halen devam etmektedir, fakat tüketim üretimin çok üzerinde olduğundan negatif bir değişim ortaya çıkmıştır. Diğer aylarda ise yüksek üretim ile depolama tankının hidrojen gazıyla doldurulduğu görülmektedir. Yine bu aylarda da tüketim gerçekleşmekle birlikte üretim daha fazla olmuştur.

Çizelge 4.3 Yakıt hücresinden elde edilen aylık toplam enerji üretim miktarları.

Aylar	Lokasyon-1 [kWh]	Lokasyon-2 [kWh]
Ocak	5 622	32 292
Şubat	4 343	31 089
Mart	3 405	40 240
Nisan	3 026	30 649
Mayıs	2 900	27 923
Haziran	2 448	28 561
Temmuz	3 319	17 674
Ağustos	4 321	32 690
Eylül	5 269	29 414
Ekim	6 188	40 686
Kasım	4 670	40 690
Aralık	6 005	39 244
Toplam	51 521	391 158

Elektroliz cihazının aylık enerji tüketimleri hidrojen üretimi ile doğru orantılıdır. Çizelge 4.4'ten de anlaşılacağı üzere yılın bütün zamanlarında elektroliz cihazı çalışabilmekte ve böylece üretim fazlası enerjinin tekrar depolanması sağlanmaktadır. Özellikle de yaz aylarında artan bir çalışma potansiyeli mevcuttur. Her iki farklı lokasyon için de maksimum enerji talebi Temmuz ayında, minimum enerji talebi ise Aralık ayında gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.4 Lokasyon bazında aylık toplam hidrojen üretimi, tüketimi ve değişimleri.

Aylar	Lokasyon-1 [kg]			Lokasyon-2 [kg]		
	Üretim	Tüketim	Değişim	Üretim	Tüketim	Değişim
Ocak	9	167	-158	345	961	-616
Şubat	41	129	-88	500	925	-425
Mart	124	101	23	692	1 197	-505
Nisan	209	90	119	1 038	912	126
Mayıs	208	86	122	1 585	831	754
Haziran	247	72	175	1 693	850	843
Temmuz	269	98	171	1 861	526	1 335
Ağustos	215	128	87	1 554	972	582
Eylül	129	156	-27	1 261	875	386
Ekim	71	184	-113	624	1 210	-586
Kasım	31	139	-108	275	1 211	-936
Aralık	9	178	-169	219	1 167	-948
Toplam	1 569	1 533	36	11 652	11 641	11

Bütün bu üretim ve tüketim döngüsü içerisinde yine de fazladan üretilen bir enerji bulunmaktadır. Çizelge 4.6'de görüldüğü üzere özellikle yaz aylarında üretim fazlası enerji miktarı yüksek seviyelerdedir. Eğer şebeke bağlantısı olsaydı bu fazla üretilen

enerji şebekeye aktarılabilir ve böylece birim elektrik maliyetleri daha da azaltılmış olurdu.

Boyutlandırılan bu sistemin Lokasyon-1 ve Lokasyon-2 için hesaplanan kurulum maliyeti sırasıyla 141 414 \$ ve 566 292 \$'dır. Buna ek olarak her yıl bakım ve onarım masrafları da göz önünde bulundurulmalıdır. Toplam bir yıllık bakım onarım masrafları ise sırasıyla 11 145 \$ ve 65 577 \$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca her elli bin saat çalışmadan sonra, ki bu on senelik bir çalışma zamanı demektir, yakıt hücresinin değiştirilmesi gerekecektir. Ek olarak yine her on beş senede ise elektroliz cihazının yenilenmesi gerekmektedir. Bu durumlarda göz önüne alındığında toplam maliyet sırasıyla 449 284 \$ ve 2 387 964 \$ olarak hesaplanmıştır. Bu maliyet ise yirmi beş yıllık toplam maliyettir. Bu değerler yıllık birim maliyeti hesap etmek için yirmi beş yıllık toplam kullanıma bölüldüğünde ise sırasıyla 208 ve 148,7 \$/MWh elde edilmiştir.

Çizelge 4.5 Lokasyonlar bazında aylık toplam kullanılmayan enerji miktarları.

Aylar	Lokasyon-1 [kWh]	Lokasyon-2 [kWh]
Ocak	0	0
Şubat	28	0
Mart	737	0
Nisan	3 252	546
Mayıs	2 774	1 124
Haziran	3 783	2 698
Temmuz	4 886	5 020
Ağustos	2 339	1 137
Eylül	908	308
Ekim	91	0
Kasım	0	0
Aralık	0	0
Toplam	18 798	10 803

4.2 Şebeke ile Besleme

Şebeke ile bu büyüklükte bir mesken sistemini beslemek için bir dağıtım sistemi inşa edilmesi gerekmektedir. Bu sistemin inşası, çeşitli faktörlere bağlı olarak hem fiziksel zorluklar hem de yüksek maliyet gerektirmektedir. Son kullanıcıların zorlu arazi şartlarına sahip bir yerde bulunmaları durumlarında şebekenin tesisi dahi imkânsız olabilmektedir. Bu kısımda uzaklığa bağlı olarak şebeke ile bu sistemin beslenmesinin

maliyeti hesap edilerek, izole mikro şebeke sistemin maliyeti ile karşılaştırılması yapılacaktır.

Bir dağıtım şebekesi, şalt sahasından başlar çeşitli koruma elemanları sonrasında enerji hatları ile son kullanıcının olduğu bölgeye kadar devam eder. Burada bir trafo ve koruma elemanları ile son bulur. Dolayısıyla öncelikle burada şebekeyi besleyebilecek kapasitede bir dağıtım şebekesinin tasarımının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Aylık enerji tüketimleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Buradaki en önemli kriterler trafonun büyüklüğü ve seçilecek kablonun akım taşıması bakımından uygun olup olmadığıdır. Bu sebeple, lokasyonlardaki talep gücünü karşılayabilecek en düşük trafo büyüklüğü Lokasyon-1 için 50 kVA ve Lokasyon-2 için 200 kVA olarak seçilmiştir.

Hat üzerinde kullanılacak kablo seçimi için ise hesaplama yapılması gereklidir. Burada en düşük akım taşıma kapasitesine sahip yüksek gerilim kablosu olan Swallow tipi ACSR kablo kullanılması planlanmaktadır. Bu kablonun akım taşıma kapasitesi 125 A’dır. Sistemin, trafoya kadar olan gerilim seviyesi 34,5 kV seviyesinde olduğundan maksimum talep gücü durumunda bile çok düşük seviyelerde bir elektrik akımı söz konusudur. Dolayısıyla, ihtiyaç olan güç için yeterli bir kablodur. Bu kablo kullanıldığında, maksimum %5 gerilim düşümüne izin verilmektedir. Bu gerilim düşümüne ne kadar uzunlukta ulaşılabacağına ise denklem 4.1’de verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$\%e = \frac{100 * l * P}{\zeta * q * U^2} \quad (4.1)$$

Burada, l hattın uzunluğunu [m], ζ birim uzunlukta kablonun iletkenliği [$m/\Omega mm^2$], q kablo kesiti [mm^2], e yüzdelik gerilim düşümünü, U hattın gerilimini [V] ve P ise hat üzerinde taşınacak gücü [W] ifade eder. Aşağıda tablo halinde verilen değerler kullanıldığında ise bu hattın Lokasyon-1 için 2 199 km, Lokasyon-2 için ise 373 km boyunca enerji dağıtımına uygun olduğu hesap edilmiştir. Sonuç olarak Swallow kablonun burada kullanılması uygundur.

Çizelge 4.6 Kablo uzunluğunun hesaplanmasında kullanılan değerler.

Sembol	Birim	Lokasyon-1	Lokasyon-2
P	W	29 500	174 000
ς	m/ Ω mm ²	35	35
e	-	5	5
q	mm ²	31,14	31,14
U	V	34 500	34 500

Dağıtım şebekesi tasarlanırken her direk arası ortalama 100 m olarak alınmıştır. Yüksek gerilim hattı olması ve ACSR tipi iletken kullanılmasından dolayı bu şekilde tesis edilmiştir. Bu durumda her 100 m’lik kısım için ortaya çıkacak maliyet Çizelge 4.7’de gösterilmiştir. Ayrıca Lokasyon-1 ve Lokasyon-2 için tek seferlik tesis edilecek malzeme listeleri ve maliyetleri de TEDAŞ 2021 yılı poz numaraları üzerinden sırasıyla Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’da sunulmuştur.

Çizelge 4.7 Her yüz metre mesafe için dağıtım şebekesi maliyet tablosu.

Poz No	Malzeme Cinsi	Ölçü	Toplam Miktar	Malzeme Birim Fiyatı [\$]	Montaj Birim Fiyatı [\$]	Toplam Maliyet [\$]
5.1	Boyalı kaynaklı demir direk	Kg	448	0,955	0,595	694,4
5.4	Boyalı kaynaklı demir travers	Kg	125	1,050	0,689	217,37
9.3	Swallow İletken	Mt	100	0,235	0,123	35,8
11.4	Mesnet izolatörü	Adet	3	11,31	2,84	42,45
11.5	Mesnet izolatör demiri	Adet	3	0,386	0	1,158
30.4	Topraklama	Kg	5	2,99	2,58	27,85
Toplam						1 019,03

Bu çizelgelere göre Lokasyon-1 ve Lokasyon-2 için oluşturulacak her 100 m’lik birim uzunluk için şebeke maliyeti denklem 4.2 ve 4.3’te sırasıyla verilmiştir.

$$M_1(l) = 3340,06 + 1019,03 * l_{100} \quad (4.2)$$

$$M_2(l) = 4519,89 + 1019,03 * l_{100} \quad (4.3)$$

$M_1(l)$ Lokasyon-1 için şebeke maliyetini, $M_2(l)$ ise Lokasyon-2 için şebeke maliyetini ve l_{100} ise 100 m’lik mesafe sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 4.8 Lokasyon-1’de bir sefer kullanılacak malzeme listesi ve maliyet tablosu.

Poz No	Malzeme Cinsi	Ölçü	Toplam Miktar	Malzeme Birim Fiyatı [\$]	Montaj Birim Fiyatı [\$]	Toplam Maliyet [\$]
15.2	Metal oksit parafudur	Adet	3	31,13	20,29	154,26
17.7	Topraklı sigortalı ayırıcı	Adet	2	317,25	129,84	894,18
24.4	AG panosu	Adet	1	531,44	156,93	688,37
31.6	Trafo	Adet	1	958,4	271,4	1 229,8
38.2	Kompanzasyon panosu	Adet	1	22,47	16,62	373,45
Toplam						3 340,06

Çizelge 4.9 Lokasyon-2’de bir sefer kullanılacak malzeme listesi ve maliyet tablosu.

Poz No	Malzeme Cinsi	Ölçü	Toplam Miktar	Malzeme Birim Fiyatı [\$]	Montaj Birim Fiyatı [\$]	Toplam Maliyet [\$]
15.2	Metal oksit parafudur	Adet	3	31,13	20,29	154,26
17.7	Topraklı sigortalı ayırıcı	Adet	2	317,25	129,84	894,18
24.4	AG panosu	Adet	1	734,8	182,28	917,08
31.6	Trafo	Adet	1	1 746,3	434,62	2 180,92
38.2	Kompanzasyon panosu	Adet	1	22,47	16,62	373,45
Toplam						4 519,89

Ek olarak şebeke ile besleme durumunda, her bir lokasyonun yıllık kullanım için ortaya çıkacak olan fatura bedeli söz konusudur. EPDK’nın yayınlamış olduğu 01.06.2022 tarihli tarifeye göre mesken kullanıcısı 1,59 tl/kWh olarak fiyatlandırılmıştır (İnt. Kyn. 1). Bu tarife üzerinden değerlendirildiğinde yirmi beş yıllık toplam maliyet Lokasyon-1 için 3 435 036 tl ve Lokasyon-2 için ise 25 540 202 tl olarak hesaplanmıştır. Güncel dolar kuru üzerinden [0,057 \$/tl] değerlendirildiğinde ise bu maliyet sırasıyla 196 288 \$ ve 1 459 440 \$’dır.

4.3 Karşılaştırma

Şebeke ile besleme ve yenilenebilir enerji sistemleri ile besleme durumlarının daha iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için karşılaştırılması gerekmektedir. Birinde bulunan avantajlar diğerinde bulunmamaktadır. Aynı şekilde dezavantajlardan da bahsedilebilir. Bu sebepten her iki sistem farklı kriterler üzerinden karşılaştırılmıştır.

Her iki besleme durumları öncelikle arz edilen enerji ile talep edilen enerjinin birbirini karşılaması bakımından irdelenmiştir. Şebeke enterkonnekte sistem üzerinden enerjisini aldığından enerji arzı bakımından bir sorunla karşılaşmayacaktır. Buna ek olarak, yenilenebilir enerji sistemleri ile kendi kendine yetebilen bir sistem doğru boyutlandırıldığında daha önceki bölümlerde de gösterildiği üzere enerji arzında bir sorun oluşmamaktadır. Bu sebeple her iki durumun da enerji arzı bakımından bir eksikliği bulunmamaktadır.

İkinci olarak, her iki durumun maliyet bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Lokasyon-1 için yenilenebilir enerji sisteminin kurulum ve işletmesi 449 284 \$'lık bir maliyet getirmektedir. Bu maliyet ile aynı olacak şekilde bir şebeke tesis edilmiş olsaydı, yirmi beş yıllık fatura bedeli 196 288 \$ olacaktır. Aradaki fark denklem 4.2'de yerine konulduğunda 24,3 km'den daha uzun bir şebeke tesisi edilmesinin dezavantajlı olduğu anlaşılmaktadır. Lokasyon-2 için ise yenilenebilir enerji sisteminin kurulum ve işletme maliyeti 2 387 964 \$'dır. Aynı şekilde yirmi beş yıllık şebeke fatura bedeli ise 1 459 440 \$'dır. Burada bir hesaplama yapıldığında ise 90,7 km'den daha uzun bir şebeke tesisi dezavantajlı bir durum oluşturmaktadır. Özellikle belirtmek gerekir ki burada yapılan hesaplamalar arazinin düz ve elverişli olması şartları, yani en uygun şartlar altında maksimum mesafe hesaplamasıdır. Eğer araziler, sarp yamaçlardan, kayalık alanlardan veyahut da akarsu, nehir gibi su yatakları gibi maliyeti artırıcı noktalardan geçerse şebeke tesis maliyetlerinin daha da yükseleceği ve burada hesaplanan mesafelerin daha da kısalacağı da not edilmelidir.

Operasyonel anlamda değerlendirildiğinde ise, şebeke ile besleme durumunda hat üzerinde meydana gelebilecek muhtemel bir arıza sonrasında buradaki son kullanıcılar etkilenebilirken, bakımları düzenli yapılmış ve korunmuş yenilenebilir enerji sistemi ile besleme durumunda bu durumla karşılaşılma ihtimali çok düşüktür.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez kapsamında tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı durumda, mesken besleme sisteminin ihtiyacı olan enerjinin tamamının sağlanabilmesi için bir boyutlandırma yapılmış ve bunun maliyeti incelenmiştir. Ayrıca, aynı mesken sistemi şebeke tarafından beslenmesinin maliyeti de analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu analizler iki farklı güneş ve kullanım profiline sahip lokasyon için ele alınmış ve durum analiz edilmiştir.

Lokasyon-1 için, yıllık toplam (Güneş panelleri + yakıt hücresi) enerji üretimi 157 553 kWh olarak hesaplanmıştır. Bunun %67,30'lık kısmına denk gelen 106 032 kWh'i güneş panellerinden elde edilen enerji oluşturmaktadır. Kalan %32,70'lik kısmına denk gelen 51 521 kWh'lik enerji ise yakıt hücresinden elde edilmektedir. Üretilen bu toplam enerjinin ise %54,84'ü mesken yükleri tarafından kullanılmaktadır. %33,21'i ise enerji fazlalığı durumunda hidrojen gazının üretilmesi için elektroliz cihazı tarafından kullanılmıştır. %11,95'i ise kullanılamayan enerji miktarı olmuştur. Lokasyon-2 için, yıllık toplam (Güneş panelleri + yakıt hücresi) enerji üretimi 1 041 860 kWh olarak hesaplanmıştır. Bunun %62,45'lik kısmına denk gelen 650 702 kWh'i güneş panellerinden elde edilen enerji oluşturmaktadır. Kalan %37,55'lik kısmına denk gelen 391 158 kWh'lik enerji ise yakıt hücresinden elde edilmektedir. Üretilen bu toplam enerjinin ise %61,67'si mesken yükleri tarafından kullanılmaktadır. %37,32'si ise enerji fazlalığı durumunda hidrojen gazının üretilmesi için elektroliz cihazı tarafından kullanılmıştır. %1,01'i ise kullanılamayan enerji miktarı olmuştur. Kullanılmayan enerji miktarları arasındaki fark güneşlenme süresinden kaynaklanmaktadır. Analizler sonucunda, birim maliyet Lokasyon-1 için 208 \$/MWh ve Lokasyon-2 için 148,7 \$/MWh olarak hesaplanmıştır.

Her ne kadar bu şekilde izole bir sistemin kararlı bir şekilde çalışması yüksek maliyet gerektirse de şebeke enerjisi ile besleme durumunda da yüksek bir maliyetle karşılaşılmaktadır. Öncelikle şebekenin kurulum maliyeti sonrasında ise fatura maliyetleri söz konusudur. Kurulum maliyetleri, uzaklığa ve kurulu gücün büyüklüğüne göre değişmektedir. Lokasyon-1 için hem kurulum hem de fatura maliyetleri birlikte

değerlendirildiğinde, şebeke enerjisinin tesis edilebilmesi için 24,3 km üzerinde bir enerji nakil hattı gerekiyorsa şebeke ile beslemenin ekonomik olmayacağı ortaya konulmuştur. Lokasyon-2 içinde aynı durum geçerlidir. Buradaki mesafe ise 90,7 km olarak belirlenmiştir.

Yenilenebilir enerji sistemlerindeki gelişmeler sonucunda mikro şebeke sistemlerine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu ilginin bir başka nedeni ise iklim değişikliği konusudur ki yenilenebilir enerji ile CO₂ salınımının azaltılması da buradaki dönüşümün başlıca bir diğer etkenidir. Bu dönüşümün iklim değişikliğinin üzerindeki etkisinin azaltılmasının yanında aslında geleneksel şebekemiz üzerinde kurulan baskının da azaltılmasını beraberinde getirecektir. İlerleyen süreçte teknolojik gelişmeler sonucunda kullanılan malzemelerin ucuzlaması, bu tür sistemlerin yaygınlaştırılması için verilen desteklerin artırılması ve ayrıca halihazırda kullanılan fosil yakıtlardan üretilen enerji maliyetlerinin artması ile bu tür sistemler daha makul ve belki de tek çözüm olarak yakın gelecekte karşımıza çıkması beklenmektedir.

Gelecek çalışmalarda, bu tip bir besleme durumunda oluşabilecek arıza durumlarının etkileri ve ne gibi bir önlem alınarak sistemin korunabileceğinin araştırılması üzerinde durulabilir. Böylece, izole şebekelere geçişler sonrasında yaşanabilecek olumsuzluklarında azaltılması veya yok edilmesi bu sistemlerin gelişmesinin ve yaygınlaşmasının önünü açacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abas N, Kalair A ve Khan N, 2015, Review of fossil fuels and future energy technologies, *Futures*, 69, 31–49.
- Aktaş M ve Doğan R, 2022, Techno-Economic Analysis of A Lead-Acid Battery-Supported Fuel Cell for A Stand-Alone Residential House in Turkey, *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 3, 106–116.
- Anonim, 2022, Kurulu Güç Raporu-Ocak 2022, Türkiye Elektrik İletim AŞ (TEİAŞ), Ankara.
- Aşchilean I, Cobîrzan N, Bolboaca A, Boieru R ve Felseghi R, 2021, Pairing solar power to sustainable energy storage solutions within a residential building: A case study, *International Journal of Energy Research*, 45, 15495–15511.
- Barbir F, 2005, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, *Solar Energy*, 78, 661–669.
- Cozzolino R, Tribioli L ve Bella G, 2016, Power management of a hybrid renewable system for artificial islands: A case study, *Energy*, 106, 774–789.
- Das B K ve Zaman F, 2019, Performance analysis of a PV/Diesel hybrid system for a remote area in Bangladesh: Effects of dispatch strategies, batteries, and generator selection, *Energy*, 169, 263–276.
- Dawood F, Anda M ve Shafiullah G M, 2020, Hydrogen production for energy: An overview, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 3847–3869.
- Eşlik A H, Akarslan E ve Hoccoğlu F O, 2022, Afyonkarahisar bölgesi şartlarında bulut hareketlerinin gökyüzü sınıfları tabanlı tahmini, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11, 68–76.
- Firth S, Kane T, Dimitriou V, Hassan T vd., 2017, REFIT Smart Home dataset, Loughborough University.
- Fodhil F, Hamidat A ve Nadjemi O, 2019, Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria, *Energy*, 169, 613–624.
- Ghaib K ve Ben-Fares F-Z, 2018, Power-to-Methane: A state-of-the-art review,

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 433–446.
- Ghenai C ve Bettayeb M, 2019, Modelling and performance analysis of a stand-alone hybrid solar PV/Fuel Cell/Diesel Generator power system for university building, Energy, 171, 180–189.
- Ghenai C, Salameh T ve Merabet A, 2020, Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region, International Journal of Hydrogen Energy, 45, 11460–11470.
- Hannah Ritchie M R ve Rosado P, 2020, CO₂ and Greenhouse Gas Emissions, Our World in Data.
- Hosseini Dehshiri S S, 2022, A new application of multi criteria decision making in energy technology in traditional buildings: A case study of Isfahan, Energy, 240, 122814.
- Luta D N ve Raji A K, 2019, Optimal sizing of hybrid fuel cell-supercapacitor storage system for off-grid renewable applications, Energy, 166, 530–540.
- Mendecka B, Chiappini D, Tribioli L ve Cozzolino R, 2021, A biogas-solar based hybrid off-grid power plant with multiple storages for United States commercial buildings, Renewable Energy, 179, 705–722.
- Murray D, Stankovic L ve Stankovic V, 2017, An electrical load measurements dataset of United Kingdom households from a two-year longitudinal study, Scientific Data, 4, 160122.
- O'Hayre R, Cha S-W, Colella W ve Prinz F B, 2016, Fuel Cell Fundamentals, John Wiley & Sons, 580p, Hoboken, New Jersey.
- Rajbongshi R, Borgohain D ve Mahapatra S, 2017, Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER, Energy, 126, 461–474.
- Riffonneau Y, Bacha S, Barruel F ve Ploix S, 2011, Optimal Power Flow Management for Grid Connected PV Systems With Batteries, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2, 309–320.
- Saidi R, Olivier J-C, Machmoum M ve Chauveau E, 2021, Cascaded Centered Moving

Average Filters for Energy Management in Multisource Power Systems with a Large Number of Devices, *Energies*, 14, 3627.

Singh A, Baredar P ve Gupta B, 2017, Techno-economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building, *Energy Conversion and Management*, 145, 398–414.

Stern A G, 2018, A new sustainable hydrogen clean energy paradigm, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 4244–4255.

Tribioli L ve Cozzolino R, 2019, Techno-economic analysis of a stand-alone microgrid for a commercial building in eight different climate zones, *Energy Conversion and Management*, 179, 58–71.

Vivas F J, De las Heras A, Segura F ve Andújar J M, 2018, A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 126–155.

Zhang Y, Sun H ve Guo Y, 2020, Integration Design and Operation Strategy of Multi-Energy Hybrid System Including Renewable Energies, Batteries and Hydrogen, *Energies*, 13, 5463.

Zhang Z, Nagasaki Y, Miyagi D, Tsuda M, ve Yonekura D, 2019, Stored energy control for long-term continuous operation of an electric and hydrogen hybrid energy storage system for emergency power supply and solar power fluctuation compensation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 8403–8414.

İnternet Kaynakları

1. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>, 02.06.2022.