ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ, GÜNEŞ VE RÜZGAR KAYNAKLI, BATARYA VE HİDROJEN DEPOLAMALI HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN DİNAMİK MODELLEMESİ, ENERJİ, EKSERJİ VE SEVİYELENDİRİLMİŞ MALİYET ANALİZİ

Ayşe Fidan ALTUN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ, GÜNEŞ VE RÜZGAR KAYNAKLI, BATARYA VE HİDROJEN DEPOLAMALI HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN DİNAMİK MODELLEMESİ, ENERJİ, EKSERJİ VE SEVİYELENDİRİLMİŞ MALİYET ANALİZİ

Ayşe Fidan ALTUN
0000-0001-7236-8398

Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ, GÜNEŞ VE RÜZGAR KAYNAKLI, BATARYA VE HİDROJEN DEPOLAMALI HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN DİNAMİK MODELLEMESİ, ENERJİ, EKSERJİ VE SEVİYELENDİRİLMİŞ MALİYET ANALİZİ

Ayşe Fidan Altun

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin Kılıç

Hibrit enerji sistemleri, birden fazla enerji kaynağı ile çalışan enerji sistemlerinden oluşur. Enerji güvenliği ve maliyet, bu sistemlerde dikkate alınması gereken iki önemli unsurdur. Bu doktora tezinde, şebekeden bağımsız, enerji depolamalı hibrit enerji sistemleri, gerçek iklim verileri kullanılarak, geçici rejimde, dinamik olarak modellenmiştir. Elektrik üretiminde rüzgar türbini, dizel jeneratör, fotovoltaik paneller, yakıt hücresi gibi farklı enerji üretim sistemleri çeşitli kombinasyonlar oluşturularak, hibrit olarak modellenmiştir. Ayrıca hidrojen depolama ve batarya gibi farklı enerji depolama alternatifleri de incelenmiştir. Modellenen enerji sistemlerinin yıllık sera gazı salınımları ve seviyelendirilmiş enerji maliyetleri hesaplanmış, en iyi sistem konfigürasyonlarına bu değerler dikkate alınarak karar verilmiştir. Her bir sistem bileşeninin enerji ve ekserji verimleri incelenmiştir. Vaka analizi için seçilen şehirlerden Konya ve İstanbul için rüzgar türbini-FV panel dizisi-yakıt hücresi-elektrolizör ve dizel jeneratör, Trabzon ve Muğla için ise yalnızca FV panel dizisi-yakıt hücresi-elektrolizör ve dizel jeneratörden oluşan hibrit enerji sistemi önerilmiştir. Çalışmanın sonuçları, hibrit enerji sistemlerinin kullanılmasının enerji güvenilirliğini artırdığını ve böylelikle düşük enerji depolama kapasitelerinde bile sistemin yükü minimum atıl enerjiyle, güvenle karşılayabildiğini göstermiştir.

Çalışmada ayrıca hidrojen depolama ve batarya depolama alternatifleri, teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır. Hidrojenin, yüksek kütlesel enerji yoğunluğundan kaynaklı olarak, üretilen enerjiyi daha uzun süreli depolayabildiği ve bu sebeple hidrojen depolamalı sistemlerin yıllık dizel yakıt tüketimleri ve yıllık atıl enerji miktarlarının, batarya depolamalı sistemlere göre daha az olduğu görülmüştür.

Küresel enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Yapılan bu çalışma ile hibrit enerji sistemlerinin yüksek verimleri ve düşük yakıt tüketimleri ile hem çevresel hem de ekonomik anlamda önemli faydalar sağlayabileceği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit, enerji, rüzgar, güneş, hidrojen

2021, viii+ 93 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DYNAMIC MODELLING, ENERGY, EXERGY AND LEVELIZED COST ANALYSIS OF SOLAR AND WIND POWERED HYBRID STAND ALONE ENERGY SYSTEMS WITH BATTERY AND HYDROGEN STORAGE

Ayşe Fidan Altun

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Muhsin Kılıç

Hybrid energy systems operate with more than one energy source. Energy reliability and levelized cost of energy are two concerns to consider in these systems. In this study, stand-alone, hybrid energy systems were modelled dynamically with using real meteorological data. For electricity production, different energy producers such as wind turbines, diesel generators, photovoltaic panels, and fuel cells were modelled in hybrid configurations. In addition, different energy storage alternatives such as hydrogen and batteries were modelled. The CO_2 emissions and the LCOE were calculated, and the best system configurations were decided based on these values. Energy and exergy efficiency of each component was calculated. Between all locations a PV array, wind turbine, fuel cell, electrolyzer and diesel generator system was recommended for Konya and Istanbul, and a PV array, fuel cell, electrolyzer and diesel generator system was recommended for Mugla and Trabzon. The results showed that the hybridization of the system increases the energy reliability and thus the system can safely meet the load with minimum idle energy.

Hydrogen and battery storage alternatives were compared technically and economically. It has been observed that hydrogen can store generated energy for longer periods due to its high energy density, therefore, the annual diesel fuel consumption and dumped energy are lower than that of battery storage.

Global energy need is increasing. With this study, it has been emphasized that hybrid energy systems can provide significant benefits in terms of environmental concerns and economic feasibility, due to their high energy efficiencies, low fuel consumption.

Key words: Hybrid, energy, wind, solar, hydrogen

2021, viii + 93 pages.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, doktora tez çalışmam boyunca bilimsel görüşleri ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, bana hep inanan değerli danışman hocam Prof. Dr. Muhsin Kılıç'a ve değerli görüşleriyle bana yardımcı olan doktora tez izleme komitesi üyeleri Prof.Dr. Ömer Kaynaklı ve Doç.Dr. Gökhan Sevilgen hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca doktora öğrenimimin her aşamasında desteklerinden ötürü BUÜ Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na, BUÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'ne ve BUÜ Makine Mühendisliği bölümü hocalarına ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Diğer yandan, bu zorlu doktora sürecinde ve hayat yolunda her zaman bana destek olan değerli eşim Enes Altun'a, bana eğitimin önemini küçük yaştan itibaren benimseten ve zorlukları aşmamda hep yardımcı olan canım anneme, engin mesleki bilgisi ile hep bana yön veren, bana ışık tutan canım babama, yine sevgileri ve manevi desteklerini sürekli hissettiğim canım kardeşlerim Fatma Nur, Rümeysa ve Mehmet Ali'ye ve doktoramın ilk günlerinde dünyaya gözlerini açan ve çalışmam boyunca sevgilerinden güç aldığım güzel yavrularım Esma ve Rana'ya teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doktora öğrenimim boyunca görev aldığım 218M805 ve 218M604 numaralı projeler kapsamında desteklerinden ötürü Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Ayşe Fidan ALTUN
06/04/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……i
ABSTRACT.....ii
TEŞEKKÜR……iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....vii
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
1.GİRİŞ……..1
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Tezin Motivasyonu.....2
1.3 Araştırma Soruları 3
2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....4
2.1 Güneş Enerjisi Kaynaklı Enerji Sistemleri 4
2.2 Rüzgar Enerjili Sistemler 8
2.3 Jeotermal Enerji Kaynaklı Sistemler.....10
2.4 Hidroelektrik Enerjili Sistemler 12
2.5 Sürdürülebilir Enerji Kaynakları ile Hidrojen Üretimi ve Kullanılması 14
2.6 Enerji Simülasyon Yazılımları 16
2.6.1. TRNSYS 16
2.6.2. HOMER 17
2.6.3 Engineering Equation Solver (EES).....17
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....18
3.1. Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi 19
3.2 Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi 23
3.3 Dizel Jeneratörlerin Modellenmesi 27
3.4 Bataryanın Modellenmesi 28
3.5 Yakıt Hücresinin Modellenmesi 29
3.6 Elektrolizörün Modellenmesi.....33
3.7 Basınçlı Gaz Depolama.....36
3.8 Hibrit Enerji Sisteminin Ekonomik Modeli 37
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....41
4.1 Hidrojen Depolamalı Hibrit Enerji Sisteminin Çalışma Prensibi 41
4.2. Batarya Depolamalı Hibrit Enerji Sisteminin Çalışma Prensibi 45
4.3 İklimsel Veriler 47

4.4 Elektrik Yükü 53
4.5 Değerlendirme Kriteri 53
4.6 Birinci Senaryo: FV/YH/ Dizel Jeneratör Konfigürasyonu 54
4.7 İkinci Senaryo: FV/Rüzgar Türbini/ YH /Dizel Jeneratör 56
4.8 Optimum Hibrit Sistemlerin Yıl Boyunca Aylık Enerji Üretimleri 65
4.9 Sistemin Ekserji Analizi 68
4.10 Batarya Depolamalı Hibrit Enerji Sistemleri 72
5. SONUÇ 77
KAYNAKLAR 80

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
A	Alan (m^2)
c	Ölçek parametresi (m/s)
C_p	Güç katsayısı (-)
I	Akım (A)
k	Boyutsuz şekil parametresi (-)
$\dot{m}$	Kütlesel debi (kg/s)
P	Güç (kW)
P_0	Referans durum basıncı (kPa)
R	Direnç (ohm)
T_0	Referans durum sıcaklığı (˚C)
$\dot{X}$	Ekserji akımı (kW)
$\dot{XD}$	Ekserji kayıp akımı (kW)
u	Rüzgar hızı (m/s)
V	Gerilim (V)
z	Yükseklik (m)
ψ	Özgül ekserji (kJ/kg)
ϵ	Ekserji verimi (-)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)

Kısaltmalar	**Açıklama**
LCOE	Seviyelendirilmiş enerji maliyeti
DEGS	Diesel Engine Generator System
EES	Engineering Equation Solver
FV	Fotovoltaik
FV-T	Fotovoltaik Termal
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewable
MGN	Maksimum Güç Noktası
NBD	Net Bugünkü Değer
PEM	Proton Exchange Membrane
RGY	Ortalama rüzgar güç yoğunluğu
SGF	Sermaye geri kazanım faktörü
SOC	Şarj durumu
STF	Düzgün seri tasarruf miktarı faktörü
TMY	Typical Meteorological Year
TRNSYS	Transient System Simulation Program
YH	Yakıt hücresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin bileşenleri 19
Şekil 3.2. Güneş açıları 24
Şekil 3.3. Basitleştirilmiş FV modeli 24
Şekil 4.1. Hidrojen depolamalı sistemin akış diyagramı 43
Şekil 4.2. Hidrojen depolamalı hibrit enerji sisteminin şematik gösterimi 44
Şekil 4.3. Hidrojen depolamalı hibrit enerji sisteminin TRNSYS modeli görüntüsü 44
Şekil 4.4. Batarya depolamalı hibrit enerji sisteminin şeması 45
Şekil 4.5. Batarya depolamalı sistemin TRNSYS modeli görüntüsü 45
Şekil 4.6. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ve rüzgar hızı histogramları 49
Şekil 4.7. Vaka analizi için seçilen şehirlerin bir yıl boyunca saatlik hava sıcaklıkları 51
Şekil 4.8. Vaka analizi için seçilen şehirlerin bir yıl boyunca saatlik toplam, yatay yüzeye gelen güneş radyasyonları 52
Şekil 4.9. Günlük elektrik yük profili 53
Şekil 4.10. Birinci senaryo için FV dizisi kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyetine etkisi 55
Şekil 4.11. FV dizisi kapasitesinin yakıt tüketimine olan etkisi 56
Şekil 4.12. İkinci senaryo için FV dizisi kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisi 57
Şekil 4.13. İkinci senaryo için FV dizisi kapasitesinin yakıt tüketimine olan etkisi 58
Şekil 4.14. Rüzgar türbini kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisi 59
Şekil 4.15. Rüzgar türbini kapasitesinin yıllık yakıt tüketimine olan etkisi 59
Şekil 4.16. Elektrolizör kapasitesindeki değişimin yıllık hidrojen üretimine olan etkisi 61
Şekil 4.17. Elektrolizör kapasitesindeki değişimin yıllık atıl olan enerjiye olan etkisi 61
Şekil 4.18. Elektrolizör kapasitesindeki değişimin seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisi 62
Şekil 4.19. Muğla ili için önerilen şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin alt bileşenlerinin aylık yüzdesel enerji üretimleri 66
Şekil 4.20. Konya ili için önerilen şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin alt bileşenlerinin aylık yüzdesel enerji üretimleri 66
Şekil 4.21. İstanbul ili için önerilen şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin alt bileşenlerinin aylık yüzdesel enerji üretimleri 67
Şekil 4.22. Trabzon ili için önerilen şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin alt bileşenlerinin aylık yüzdesel enerji üretimleri 68
Şekil 4.23. FV panellerin aylık enerji ve ekserji verimleri 69
Şekil 4.24. Elektrolizörün yıl boyunca saatlik enerji veriminin değişimi 69
Şekil 4.25. Elektrolizörün yıl boyunca saatlik ekserji veriminin değişimi 70
Şekil 4.26. Yakıt hücresinin yıl boyunca saatlik enerji veriminin değişimi 70
Şekil 4.27. Yakıt hücresinin yıl boyunca saatlik ekserji veriminin değişimi 71
Şekil 4.28. Hidrojen tankı basınç durumunun yıl boyunca saatlik değişimi 71
Şekil 4.29. Rüzgar türbini güç katsayısının, yıl boyunca saatlik değişimi 72
Şekil 4.30. Batarya kapasitesinin yıllık atıl enerjiye ve yıllık yakıt tüketimine olan etkisi 73
Şekil 4.31. Batarya kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetine olan etkisi 74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Yakıt hücresi çeşitleri. 30
Çizelge 3.2. Yakıt hücresi modelinde kullanılan parametreler 31
Çizelge 3.3. Alkali elektrolizör modelinde kullanılan parametreler 34
Çizelge 3.4. Basınçlı gaz modelinde kullanılan parametreler 37
Çizelge 3.5. Ekonomik analizde kullanılan parametreler 38
Çizelge 3.6. Ekonomik analizde kullanılan maliyetler 39
Çizelge 4.1. Hidrojen depolamalı hibrit enerji sisteminin tasarım parametreleri……..46
Çizelge 4.2. Batarya depolamalı hibrit enerji sisteminin tasarım parametreleri 47
Çizelge 4.3. Vaka analizi için seçilen şehirlerin coğrafi bilgileri 48
Çizelge 4.4. Seçilen şehirlerin bir tipik iklim yılı (TMY) boyunca maksimum, ortalama rüzgar hızları ve rüzgar hızlarının standart sapması 50
Çizelge 4.5. Seçilen şehirlerin tipik iklim yılı (TMY) rüzgar hız verileri için Weibull dağılımı parametreleri ve rüzgar gücü yoğunluğu (RGY) 50
Çizelge 4.6. Hidrojen depolamalı sistem için incelenecek olan sistem bileşenlerinin kapasite aralıkları 54
Çizelge 4.7. Her il için önerilen hibrit enerji sisteminin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetinin elektrolizör ilk yatırım maliyetine göre değişimi..... 62
Çizelge 4.8. Her il için önerilen hibrit enerji sisteminin seviyelendirilmiş enerji maliyetleri ve yıllık CO_2 emisyon değerleri 63
Çizelge 4.9. Birim yakıt fiyatı değişiminin seviyelendirilmiş enerji maliyetine etkisi... 63
Çizelge 4.10. Her il için önerilen optimum sistem konfigürasyonunun yıllaştırılmış maliyeti……64
Çizelge 4.11. Mevcut çalışma ve literatürdeki diğer çalışmaların seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetlerinin karşılaştırılması 75
Çizelge 4.12. Farklı enerji depolama yöntemleri ve kapasitelerinin seviyelendirilmiş enerji maliyeti ve yıllık atıl enerji açısından kıyaslanması 76

1.GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Günümüzde, fosil yakıtların sınırlı olması, küresel enerji ihtiyacının sürekli artması, küresel ısınma ve buna bağlı olarak gerçekleşmekte olan iklim değişikliği, çevresel ve beşeri güvenliği tehdit eden en büyük sorunlar arasındadır. Bu sebeple, ülkelerin enerji eylem planları arasında çevre dostu sürdürülebilir teknolojilerin kullanımının yaygınlaştırılması en öncelikli hedefler arasındadır. Bununla birlikte, yalnızca tek bir yenilenebilir kaynağın kullanımı, sürekli artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için ekonomik ve çevresel faktörler açısından yeterli olmayabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir diğer avantajı da diğer enerji kaynakları ile beraber entegre sistemler oluşturabilmeleridir. Hibrit ya da bir diğer ismiyle kombine enerji sistemleri, genel olarak iki veya daha fazla enerji kaynağı kullanılarak binaların, elektrik, soğutma veya ısıtma ihtiyaçlarını bir arada karşılayabilirler. Bu sistemler, binanın lokasyonuna göre, şebekeye bağlı (on-grid) veya şebekeden bağımsız (off-grid) olarak çalışabilirler.

Dünyanın en büyük 17. ekonomisi olan ülkemizin sürekli olarak enerji ihtiyacının artması ve enerji kaynaklarının sınırlı oluşu sebebiyle sürdürülebilir sistemlerin verimliliğin arttırılması konusundaki çalışmalara hız verilmiştir. Bu çalışmada önerilecek hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin, farklı iklim bölgelerinin meteorolojik verileri kullanılarak, enerji, ekserji ve ekonomik analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Elektrik üretimi için rüzgar türbini, fotovoltaik sistemler ve yakıt hücreleri kullanılarak çeşitli kombinasyonlar oluşturulmuş ve oluşturulan bu kombinasyonların TRNSYS yazılımı yardımı ile enerji analizleri yapılmıştır. Enerji analizlerinin yanı sıra, ülke ekonomisine, yatırımcıya ve kullanıcıya sağlayacağı ekonomik faydaların araştırılması açısından maliyet analizleri de yapılmıştır. Literatürde çoğunlukla yenilenebilir enerji uygulamaları tekil olarak araştırılmış olup, hibrit sistemlerle ilgili tez çalışmaları ve akademik makaleler oldukça sınırlıdır.

Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığı, yükselen enerji ihtiyacı ile birlikte her geçen gün artmaktadır. Dünya Enerji Konseyi'nin 2016 yılı raporuna göre, doğal gaz %33'lik bir oranla Türkiye'nin enerji tüketiminde en büyük paya sahip olan enerji kaynağıdır. Bunu

%32 oranındaki pay ile kömür ve %25 oranındaki pay ile petrol takip etmektedir. Hidroelektrik ve yenilenebilir kaynaklar 2014 yılı enerji tüketiminde toplam %10'luk bir pay ile son sırayı almıştır. Enerjide dışa bağımlılığın azaltılması ve öz kaynaklarımızın kullanılması, sera gazı emisyon salınımlarının kontrol altında tutulması amacıyla yenilenebilir enerji sistemlerinin araştırılması, geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaştırılması ülkemizin en öncelikli enerji politikaları arasında yer almalıdır. Günümüzde, kullanımı en yaygın, ticarileşmiş, yenilenebilir enerji sistemleri güneş, jeotermal, rüzgar ve biyokütle enerji kaynakları ile çalışmaktadır.

1.2 Tezin Motivasyonu

Dünyanın en büyük ilk 20 ekonomisinden biri olan ülkemizde, artan enerji ihtiyacının çok az bir kısmı öz kaynaklarımızdan karşılanabilmektedir. Bu sebeple, sürdürülebilirlik günümüzde en çok karşılaştığımız kavramlardan biridir. Bu çalışmanın en önemli hedeflerinden bir tanesi sürdürülebilirliği bütün yönleriyle ele almaktır. Literatürde yapılmış olan pek çok çalışmada, sürdürülebilirlik kavramı teorik olarak ele alınmakta olup, sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanıcıya, yatırımcıya, devlete, çevreye, topluma gerçek anlamda sağladığı avantaj ve dezavantajlar gerçekçi bir biçimde sunulmamaktadır. Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki çeşitli iklim bölgelerinde yer alan farklı şehirlerin yenilenebilir enerji kaynak kullanım potansiyelinin araştırılarak elektrik ihtiyacını karşılayacak hibrit, yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarlanması, modellenmesi ve optimize edilmesidir. Tasarlanan sistemlerin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetlerinin düşük olması, enerji verimlerinin yüksek olması ve sera gazı emisyonu salınımının minimum olması istenmektedir. Sistem tasarımı ve optimizasyonu yapılırken, sürdürülebilirlik kavramı bütün yönleri ile ele alınmış, ilk yatırım, işletme ve net bugünkü değer maliyetleri, çevreye salınan zararlı emisyon değerleri, enerji ve ekserji verimliliği gibi kavramlar ayrı ayrı analiz edilmiş, önerilen sistemler arasından, optimum sisteme hem bir mühendis hem de bir işletmeci gözüyle karar verilmiştir.

1.3 Araştırma Soruları

Ülkemiz bulunduğu konum itibariyle jeotermal, rüzgar, güneş gibi pek çok yenilenebilir enerji kaynağı kullanım potansiyeline sahiptir. Bu kaynakların, kullanım potansiyelini araştırarak, şebekeden bağımsız, hibrit bir enerji santrali tasarlayıp, optimize etmek bu tezin öncelikli hedefleri arasındadır.

- Yenilenebilir enerji kaynaklı hibrit sistemler, yatırımcı, kullanıcı ve ülkemiz açısından ekonomik anlamda gerçekten avantajlı mıdır? Bu sistemlerin, ilk yatırım, işletme ve ömür maliyetleri ne kadardır?
- Bu sistemlerin verimine etki eden faktörler nelerdir? Farklı çalışma ve iklim koşullarında bu sistemlerin verimleri ve seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetleri nasıl değişir?
- Yenilenebilir enerji kaynaklı bir hibrit enerji santralinin sera gazı emisyonu salınım miktarı ne kadardır? Çevresel anlamda, bu sistemlerin topluma sağlayacağı faydalar nelerdir?

2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu kısmında, güneş, rüzgar, jeotermal ve hidroelektrik enerji gibi en yaygın olan sürdürülebilir enerji çeşitleri hakkında temel bilgiler, kullanım sahaları ve literatürdeki dikkat çeken çalışmalar genel hatlarıyla sunulmuştur.

2.1 Güneş Enerjisi Kaynaklı Enerji Sistemleri

Binalarda güneş enerjisi iki alternatif sistem ile kullanılabilir: fotovoltaik sistemler ve termal güneş kollektörleri. Bu iki sistemin kombinasyonu olan hibrit FV-T sistemler de yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Fotovoltaik sistemler güneş enerjisini direk olarak elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu sistemler, binaların çatılarına yerleştirilebildiği gibi, bina kabuğuna bütünleşik olarak da tasarlanabilirler. Bunun yanı sıra, binlerce metre kare büyüklüğündeki arazilere kurularak büyük ölçekli güneş tarlalarını oluşturabilirler. Fotovoltaik sistemler şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak kurulabilirler. Fotovoltaik sistemlerin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı tipik uygulama alanlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır (Yiğit ve Atmaca, 2010):

- Bina içi veya dışı aydınlatma
- Dağ evleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde elektrikli cihazlar
- Tarımsal sulama
- Deniz fenerleri
- Alarm ve güvenlik sistemleri
- Hava gözlem istasyonları

Fotovoltaik (FV) sistemler, güneş ışığını elektriğe çeviren güneş hücreleri, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depo eden akü, fotovoltaik panelden gelen akımı düzenleyip aküye ileten regülatör ve doğru akımı alternatif akıma dönüştüren invertörden oluşur. Fotovoltaik güneş hücreleri çeşitli malzemelerden üretilebilir. Üretilen malzeme çeşidi ve oranına göre günümüzde en çok kullanılan güneş hücreleri şunlardır: tek kristalli silikon güneş hücreleri, çok kristalli silisyum güneş hücreleri ve ince film güneş hücreleri.

Güneş kollektörleri, güneş ışınımını faydalı termal enerjiye dönüştürürler. Termal güneş kollektörlerinin en yaygını su ısıtma sistemleridir. Bu sistemlerde güneş enerjisinin etkisiyle ısıtılan akışkanın enerjisinden direk veya dolaylı olarak faydalanılır (Altun ve Kılıç, 2020a). Uygulamada kullanılan kollektörlerde, güneş ışınımı önce bir yatay düzlem tarafından yutulur sonra da faydalı enerji bir akışkana aktarılır. Uygulamada ısı taşıyıcı akışkanın hava veya su olduğu iki tip güneş kollektörü mevcuttur. İçerisinde dolaşan akışkanın sıcaklığını 70-80 °C mertebesine kadar çıkarabilen bu tür sistemler, günümüzde artık evlerin sıcak su ihtiyacı dışında, yüzme havuzları ve küçük sanayi tesislerinde de sıcak su temini için kullanılmaktadırlar (Yeşilata ve diğerleri, 2011). Bu sistemlerin verimleri fotovoltaik sistemlere göre daha yüksektir. Termal güneş kollektörleri ile elde edilen ısı aynı zamanda güneş destekli soğutma çevrimleri (absorpsiyon, adsorpsiyon) ile soğutma sağlamak için de kullanılabilir (Kılıç ve Anjrini, 2020).

Konsantre solar termal teknolojisi (Concentrated Solar Power) , büyük ölçekli elektrik üretimi için güneşin ışınlarının verimli bir şekilde toplanmasını sağlar. Bu sistemlerde parabolik oluk şeklindeki kollektörlerde aynalar yardımıyla termal alıcıya yansıtılan güneş ışınları, termal alıcıdaki akışkanın ısınmasını sağlar ve doğrudan buhar üretimi gerçekleşir. İstenilen sıcaklık, basınç değerine sahip buhar elde edildikten sonra, buhar türbini yardımıyla elektrik üretimi gerçekleşir.

Literatürde solar termal, fotovoltaik ve FV-T sistemlerinin dinamik modellenmesi ve enerji ve ekserji verimlerinin araştırılması ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Kalogirou, bu alanda öncülük eden isimlerdendir ve 2001 yılında yayımladığı çalışmasında bir FV-T sistemi, Nicosia, Kıbrıs meteorolojik verilerini kullanarak dinamik olarak modellemiştir (Kalogirou, 2001). FV-T sisteminde dolaşan suyun kütlesel debisinin faydalı enerji üretimine olan etkisini belirlemek amacıyla, kollektördeki suyun kütlesel debisini değiştirmiş ve üretilen elektrik ve termal enerji çıktılarını incelemiştir ve sonuç olarak optimum kütlesel debiyi ve sistem verimini bulmuştur. Berger (2016), geleneksel solar termal su ısıtma sistemlerini, FV & solar termal ve FV/T sistemleri ile enerji verimliliği ve ekonomik fizibilitesini kıyaslamak amacıyla, Kanada'nın Toronto, Vancouver, Montreal, Halifax ve Calgary şehirlerinin meteorolojik verilerini kullanarak

dinamik olarak modellemiştir. Quesada ve diğerleri 2011 yılında yaptıkları çalışmalarında, Valencia Politeknik Üniversitesi'nde kurulu 7.2 kW gücündeki fotovoltaik sistemin iki yıl boyunca topladıkları deneysel verilerini, TRNSYS programı ile hazırladıkları modelin dinamik simülasyon sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Hava durumundaki öngörülemeyen değişikliklerin FV sistemin çıktısını %11 oranında değiştirebileceği sonucuna varmışlardır. Cao ve diğerleri, 2014 yılında yaptıkları çalışmalarında, Çin'in Xian şehrindeki, 4 yıldızlı bir otelin, doğal gaz yakıtlı su ısıtma sistemini, vakum boru tüplü güneş kollektörü ilave ederek yeniden tasarlamışlardır. Yeni sistemi TRNSYS programı ile dinamik olarak modelleyerek, sistemin ekonomik analizini yapmışlardır. Buonomano ve diğerleri, 2016 yılında yayımladıkları makalelerinde, İtalya'da kurdukları, 4 adet FV-T panel ve 4 adet FV panelden oluşan, elektrik ve sıcak su üreten bir sistemin hem dinamik simülasyon programı TRNSYS ile, hem de deneysel olarak elektrik ve termal verimini incelemişlerdir. Sonuç olarak, FV panellerin elektrik üretim çıktısının, FV-T panellerin elektrik üretim çıktısından daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Dinamik simülasyon programıyla elde edilen verilerin sonucunda, FV panellerin elektrik üretim veriminin %17,9, FV-T panellerin %11,6 ve FV-T panellerin termal veriminin %14,4 civarında olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Deneysel verilerin sonucunda ise FV-T panellerin termal verimi %13 civarında bulunmuş olup, bu değer simülasyon değerlerinden biraz daha düşüktür.

Fong ve diğerleri (2017), subtropikal bir iklim bölgesinde bulunan, üç katlı bir ofis binası için yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan bir ısıtma-soğutma sisteminin performansını incelemişlerdir. İncelenen bu sistemde, güneş enerjisi, absorpsiyonlu soğutma ve su ısıtmada kullanılırken, toprak kaynağı, radyant soğutma için kullanılacak olan yüksek sıcaklıklarda çalışan chiller ünitesi için kullanılmıştır. TRNSYS programı kullanılarak, sistemin modeli oluşturulmuş ve sistemin tasarım parametreleri değiştirilerek yıllık dinamik simülasyonu incelenmiştir.

Suleman ve diğerleri (2014), güneş enerjisi ve jeotermal enerji kaynaklı yeni bir entegre enerji üretim sistemi önermişlerdir. Önerdikleri bu yeni sistemin tüm bileşenlerinin, alt sistem ve ana sistemin enerji ve ekserji verimlerini hesaplamış ve karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Sistemin performansını iyileştirmek için, enerji kayıpları ve ekserji

yıkımlarını tüm ana bileşenler için ayrı ayrı hesaplayıp, önerilen sistemdeki potansiyel iyileştirmeleri belirtmişlerdir. Ayrıca, değişen çevresel koşulların sistem performansına olan etkisini incelemek amacıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Tourkov (2016), çeşitli yenilenebilir enerji teknolojilerinin birlikte çalışmaları durumunda, enerji verimlerini araştırmış ve detaylı termodinamik analizlerini sunmuştur. Çalışmasında, konsantre güneş hücreleri, termal güneş teknolojisi ve organik Rankine çevriminden oluşan hibrit bir model oluşturmuştur. Kombine çalışan bu modelin çalışma performansı incelenmiş ve verimi arttırmak için potansiyel iyileştirmeler araştırılmıştır.

Yılmaz ve diğerleri (2015a), Akdeniz Bölgesinde bulunan bir dağ evi için, fotovoltaik panel, dizel jeneratör ve bataryadan oluşan hibrit enerji sisteminin dinamik modellemesi yapmışlardır. Bunun yanı sıra, önerilen sistemin, yatırımcı ve kullanıcı açısından ekonomik olarak avantajlı olup olmadığını belirlemek için maliyet analizi sunmuşlardır. Önerdikleri sistemin ürettiği birim enerjinin maliyeti 0,24 Euro/kWh olarak bulunmuştur. Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin özellikle, kırsal kesimlerde yaşayan insanların yaşam kalitelerinin arttırılmasında etkin bir çözüm olabileceği vurgulanmıştır.

Khalid (2014), fosil yakıt tüketiminin azaltılması hedefi doğrultusunda, üç adet, yenilenebilir enerji kaynaklı, hibrit enerji sistemi geliştirmiş ve tasarladığı bu sistemlerin, binaların enerji ihtiyacı, iklim verileri, ikamet eden kişi sayısı gibi bilgileri dikkate alarak enerji ve ekserji performanslarını değerlendirmiştir. Önerdiği ilk sistem, biyo kütle ve güneş enerjisi ile çalışmaktadır. Sistemin çıktıları ise elektrik, sıcak su, alan ısıtma ve soğutmadır. Rüzgar türbini, güneş kollektörü ve toprak kaynaklı ısı eşanjörü destekli organik Rankin çevriminden oluşan önerdiği ikinci enerji üretim sistemi, üç adet yenilenebilir enerji kaynağını kullanmaktadır. Önerdiği üçüncü sistem ise, güneş kollektörü, absorpsiyonlu chiller, jeotermal ve güneş enerjisi destekli Rankine çevriminden oluşmaktadır.

2.2 Rüzgar Enerjili Sistemler

Rüzgar enerjisi, günümüzde sokak aydınlatmasından, su pompalamaya kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu sistemler şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak çalışabilirler. Rüzgar türbinleri, rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürler. Rüzgarın öngörülemeyen doğası, bu sistemlerin en büyük handikaplarındandır. Bunun önüne geçebilmek için, rüzgarın yetersiz olduğu durumlarda da elektrik yükünü karşılayabilmek için, hibrit sistemlerin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bir rüzgar türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri, elektrik-elektronik elemanlar ve pervanelerden oluşur. Rüzgar türbinleri genel olarak güçlerine, dönme eksenlerine, kanat sayılarına, kurulum yerlerine, rüzgara göre olan konumlarına, devir sayılarına göre sınıflandırılırlar.

Literatürde, rüzgar türbinlerini içeren hibrit enerji sistemlerinin tekno-ekonomik analizleri ile ilgili pek çok çalışma bulunmaktadır. Huang ve diğerleri, 2015 yılında yapmış oldukları bir çalışmada Çin'in Tianjin şehrinin meteorolojik verilerini kullanarak, iki farklı rüzgar-güneş kaynaklı, hibrit sistemi TRNSYS programı ile modelleyerek, yıllık elektrik üretim değerlerini birbirleri ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, büyük kapasiteli tek bir türbin olan sistem yerine, küçük kapasitelerde birden fazla rüzgar türbininin olduğu sistemi daha verimli bulmuşlardır. Ayrıca birden fazla rüzgar türbini ve fotovoltaik panellerden oluşan sistemi, Çin'in Shenyang, Shangai ve Guangzhou şehirlerinin meteorolojik verilerini kullanarak tekrar modellemişler ve verim değerlerini referans sistemle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, önerilen sistemin veriminin en yüksek olduğu şehrin Guangzhou olduğu belirtilmiştir. Bakic ve diğerleri, 2012 yılında yaptıkları çalışmada, 20 adet fotovoltaik panelden ve 3 adet rüzgar türbininden oluşan hibrit bir sistemin, Belgrad ili meteorolojik verilerini kullanarak, TRNSYS programı ile dinamik modellemesini yapmışlardır. Sonuç olarak, sistemin bir yıllık üretebileceği elektrik enerjisi miktarını ve geleneksel bir güç üretim sistemi yerine bu sistemin kullanılması halinde, sera gazı salınımlarında sağlanan azalmayı sunmuşlardır. Panayiotou ve diğerleri (2012) yılında yaptıkları bir çalışmada, bir evin elektrik ihtiyacını karşılamak için, şebekeden bağımsız bir FV sistem ile FV ve rüzgar türbininden oluşan hibrit bir sistemi incelemişlerdir. Kıbrıs'ın Nicosia şehri ile Fransa'nın Nice şehrinin

meteorolojik verilerini kullanarak, her iki şehir için sunulan iki farklı sistemin, yıllık elektrik üretim değerleri TRNSYS programı ile bulunmuştur. Her iki şehirdeki elektrik üretim çıktıları karşılaştırılmış, ekonomik analizleri yapılmış ve Nicosia şehrinde hibrit sistem yerine yalnızca FV sistemin, Nice şehrinde ise FV yerine hibrit sistemin kullanılmasının daha avantajlı olacağı sonucuna varılmıştır. Kiliç ve diğerleri (2020) Yalova Üniversitesi'nin elektrik yükünü karşılamak için hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız çeşitli hibrit enerji sistemlerini HOMER programı ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Oluşturulan sekiz adet alternatif sistemin içerisinden FV panel, rüzgar türbini, dizel jeneratör ve bataryadan oluşan sistem konfigürasyonu önerilmiştir. Oluşturulan sistemler, net bugünkü değer, yenilenebilir enerji oranı, emisyon salınımı gibi farklı parametreler açısından incelenmiştir. Bakic ve diğerleri, 2015 yılında yaptıkları çalışmada, fotovoltaik paneller ve rüzgar türbininden oluşan hibrit bir enerji sistemini, Sırbistan'ın üç farklı şehrinin meteorolojik verilerini kullanarak TRNSYS ve HOMER yazılımları yardımı ile dinamik olarak modellemişlerdir. Üç lokasyon için, fotovoltaik panel sayısının ve rüzgar türbini yüksekliğinin, elektrik verimine olan etkisini parametrik olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, Kopaonik şehrinin, Belgrad ve Novi Sad şehirlerine göre yenilenebilir enerji kullanım potansiyelinin daha yüksek olduğunu ve burada kurulacak olan bir yenilenebilir enerji santralinin, diğer şehirlere göre, yatırımcı ve kullanıcı açısından daha ekonomik olacağını belirtmişlerdir. Ramli ve diğerleri (2016), Suudi Arabistan'ın batı sahil şeridi için, rüzgar türbini ve fotovoltaik panellerden oluşan, hibrit enerji sisteminin, teknik ve ekonomik analizlerini HOMER ve MATLAB programları yardımıyla yapmışlardır. Analiz sonuçlarına göre, aynı lokasyonda bulunan ve aynı kapasitedeki bir güneş paneli ve rüzgar türbininden, panelin elektrik üretimi, rüzgar türbinine göre daha fazladır. Ancak yine de, gece saatlerindeki, elektrik ihtiyacının karşılanabilmesi için rüzgar türbini sistemin vazgeçilmez bir parçasıdır. Makalede, türbin ve panel boyutları ile elde edilen elektrik enerjisi miktarı, parametrik olarak analiz edilerek, en düşük ilk yatırım maliyeti ile en yüksek elektrik enerjisi çıktısını verebilecek olan kombinasyonun bulunması amaçlanmıştır. Rhaman (2013), alternatif enerji kaynaklarının kullanımının arttırılması için, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerini araştırmıştır. Çalışmasında, Bangladeş'te bulunan, şebeke bağlantısı olmayan, 50 adet konuttan oluşan kırsal bir kasabanın elektrik yükünü karşılayabilmek için, rüzgar türbini, dizel motor, fotovoltaik panel ve bataryadan oluşan komponentler ile çeşitli

kombinasyonlar oluşturmuş, HOMER programı yardımıyla, her bir kombinasyonun ürettiği birim enerji maliyetini hesaplayıp, sistemleri karşılaştırmıştır. Kıymaz ve Yavuz (2016), Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin elektrik enerjisi yükünü karşılamak için rüzgar türbini ve güneş panellerinden oluşan şebekeye bağlı bir hibrit sistem önermiş ve bu sistemi HOMER yazılımı ile modellemiştir. Yenilenebilir enerji kullanımının maksimum ve ilk yatırım maliyetinin minimum olmasını hedefleyerek önerdikleri sistemin ürettiği birim enerji maliyetini 0,107 $/kWh olarak hesaplamışlardır. Fakültenin ihtiyacı olan elektrik yükünün %56'sının fotovoltaik paneller ile %24'ünün rüzgar türbinleri ile ve %20'sinin ise şebekeden sağlanacağı saptanmıştır.

Hacatoglu (2014), bölgesel ısıtma sistemlerinin sürdürülebilirliğini ölçen bir indeks geliştirmiştir. Geliştirdiği bu indeks ile bir sistemin sürdürülebilirliği ekserji verimi, sera gazı salınımı, hava kirliliği, su kirliliği ve arazi kullanımı gibi farklı açılardan değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, Güney Ontario'da 50 konutluk bir bölgesel ısıtma, soğutma ve güç üretim sistemi için üç adet hibrit sistem tasarlamış ve bu sistemlerin termodinamik modellerini EES programını kullanarak oluşturmuştur. Tasarladığı tüm sistemleri sürdürülebilirlik indeksi açısından değerlendirmiş ve birbiri ile karşılaştırmıştır.

Ahmadi (2013), ısıtma soğutma ve güç üretimi sağlayan, üç adet hibrit enerji sistemi geliştirmiş ve bu sistemleri modelleyerek, termodinamik analizlerini yapmıştır. Çalışmasında hem yenilenebilir hem de fosil kaynaklı enerji sistemlerini incelemiştir. Çoklu enerji üretim sisteminin, geleneksel bir enerji üretim sistemine göre ürettiği güç başına atmosfere 120 kg/kWh daha az CO_2 emisyonu saldığını belirtmiştir. Hibrit enerji sistemlerinin düşük işletme ve operasyon maliyetleri ve ürettikleri güç başına düşük sera gazı emisyonları sebebiyle bir topluma büyük faydalar sağlayabileceğini vurgulamıştır.

2.3 Jeotermal Enerji Kaynaklı Sistemler

Jeotermal enerji, ülkemizin sürekli artan enerji ihtiyacını sürdürülebilir bir şekilde karşılamaya yardımcı olan en önemli yenilenebilir öz kaynaklarımızdan biridir. Ülkemiz jeolojik açıdan aktif bir tektonik kuşak üzerinde yer almakta olup, jeotermal açısından

dünya ülkeleri içerisindeki en yüksek potansiyele sahip ülkelerden biridir. Jeotermal enerji günümüzde, bölgesel ısıtma sistemleri, sera ısıtma, meyve-sebze kurutma ve termal turizm gibi çeşitli alanlarda kullanılabilmektedir.

Jeotermal kaynaklar, rezervuar sıcaklığına göre sınıflandırılabilirler. 90°C'den daha az sıcaklıktaki kaynaklar "düşük", 90-150°C sıcaklığındaki kaynaklar "orta" ve 150°C'den büyük sıcaklığa sahip kaynaklar ise "yüksek" kalitedeki kaynaklar olarak isimlendirilirler. Düşük ve orta kalitedeki kaynaklar genellikle sera ısıtmacılığı, bölgesel ısıtma sistemleri, termal turizm, meyve-sebze kurutmacılığı gibi sahalarda kullanılmaktadır. Yüksek kalitedeki kaynaklardan elektrik üretiminin yanı sıra entegre olarak diğer alanlarda da yararlanılabilmektedir.

Ülkemizdeki jeotermal kaynaklı bölgesel ısıtma sistemlerinin enerji, ekserji, maliyet analizleriyle ilgili literatürde yapılmış çeşitli yayınlar mevcuttur. Kalıncı ve diğerleri, 2008 yılında yaptıkları çalışmalarında, İzmir Dikili jeotermal bölgesel ısıtma sistemi için maliyet, enerji ve ekserji verimliliği gibi etkenleri göz önüne alarak, optimum boru çapı hesabı yapmışlardır. Sistemdeki ekserji yıkımlarının nerede meydana geldiğini tespit ederek, sistemin performansını detaylı olarak incelemişlerdir. Kecebas ve diğerleri 2014 yılında yayınladıkları makalelerinde, Afyon ve Sarayköy bölgesel ısıtma sistemlerinin ekserjoekonomik analizlerini yaparak, birbirleriyle kıyaslamışlardır (P. Keçebaş vd., 2014). Keçebaş ve diğerleri, 2014 yılında yaptıkları çalışmalarında, Bigadiç ve Afyon jeotermal bölgesel ısıtma sistemlerini, ileri ekserji analizi yöntemiyle inceleyerek, birbirleriyle kıyaslamışlardır (A. Keçebaş vd., 2014). Her iki bölgesel sistemini oluşturan parçaların, önlenebilir-önlenemez ekserji yıkım değerlerini ayrı ayrı sunarak, sistemlerin verim iyileştirme potansiyelini bulmuşlardır. Yamankaradeniz, 2016 yılında yaptığı çalışmasında, hem geleneksel hem de ileri ekserji analizi yöntemi ile Bursa bölgesel ısıtma sisteminin, termodinamik performansını değerlendirmiştir. Makalede belirtildiğine göre, sistemin geleneksel ekserji analizine ile hesaplanan verimi %25,24 iken ileri ekserji analizi kullanılarak hesaplanan verimi %26,34 olarak bulunmuştur. Yuksel ve diğerleri (2012) yılında yaptıkları çalışmalarında, mevsimsel değişikliklerin, Gönen bölgesel ısıtma sisteminin enerji ve ekserji verimine olan etkilerini araştırmışlardır. Sistemin çeşitli noktalarındaki, sıcaklık, akışkanın kütlesel debisi, basınç gibi değerleri bir sene

boyunca, uygun ölçme aletleri ile ölçülmüş ve veriler toplanmıştır. Daha sonra, kış, yaz ve geçiş mevsimlerini temsil eden referans günler için kaydedilen veriler kullanılarak, sistemin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Makalenin sonucuna göre Gönen bölgesel ısıtma sisteminin en yüksek enerji ve ekserji verimine, geçiş mevsimini temsil eden referans günde ulaşılmış olup bu değerler sırasıyla %31,72 ve %39,24'tür.

2.4 Hidroelektrik Enerjili Sistemler

Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynakları içerisindeki en büyük paya sahip enerji kaynağı olan hidroelektrik enerji, dünya genelinde tüketilen elektriğin %16,6'lık kısmını sağlamaktadır (Bilgili vd., 2018). Türkiye'nin mevcut topoğrafik yapısı ve hidrolojik koşulları, hidroelektrik enerji üretimini avantajlı kılmakta olup, ülkemizin teknik hidroelektrik potansiyeli yıllık 250 TWh'tir (Oral vd., 2017). Hidroelektrik üretimi 2017 yılında 58,5 milyar kWh olarak gerçekleşmiş olup elektrik üretimimizin %19,8'i hidrolikten elde edilmiştir.

Hidroelektrik santraller, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinin, elektrik enerjisine dönüştürüldüğü tesislerdir. Bu tesisler genel olarak, düşülerine, elektrik üretim kapasitelerine göre sınıflandırılırlar. Hidroelektrik santrallerin çalışma prensibi kısaca, kanal veya borular içinde hareket eden suyun türbinlere doğru akarak, elektrik üretimi için türbinleri döndürmesidir.

Literatürde, hidroelektrik ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak oluşturulan hibrit uygulamaların, enerji ve maliyet analizleri ile ilgili çeşitli yayınlar bulunmaktadır. Khan ve diğerleri 2015 yılında yayınladıkları makalelerinde, Malezya'daki bir turistik bir adanın elektrik yükünü karşılamak için, optimum yenilenebilir enerji sistem kombinasyonunu önermişlerdir (Khan vd., 2015). Makalede, öncelikle, adadaki güneş, rüzgar, hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Hidroelektrik kaynak potansiyeli araştırılırken, topografya haritalarından ve hidrolojik çalışmalardan yararlanılmıştır. En son olarak, HOMER yazılımıyla, önerilen fotovoltaik-hidroelektrik-dizel motor ve bataryadan oluşan hibrit sistemin tekno-

ekonomik analizi yapılmış ve önerilen sistemin çevresel ve ekonomik anlamda en avantajlı sistem olduğu sonucuna varılmıştır.

Das ve diğerleri, 2016 yılında yaptıkları Bangladeş'in güney bölgesi için fotovoltaik-mikro hidroelektrik-dizel jeneratör ve bataryadan oluşan hibrit enerji üretim sistemi önermiş ve önerdikleri sistemi farklı sistemlerle kıyaslamışlardır. HOMER simülasyon programı yardımı ile, yakıt maliyeti, işletme maliyeti, emisyon salınımı ve verimlilik açısından en avantajlı sistemin önerilen hibrit sistem olduğu bulunmuştur. Simülasyon sonuçları, hibrit sistemin yaşam döngüsü maliyetinin, yalnızca dizel jeneratörle çalışan sisteme göre, % 27 daha düşük olduğunu göstermiştir.

Amutha ve Rajini (2016) Güney Hindistan'ın kırsal bir bölgesinin domestik ve endüstriyel elektrik ihtiyacını yenilenebilir kaynaklar ile sağlamak için optimum enerji sistemini önermişlerdir. HOMER yazılımı kullanılarak yapılan çalışmada, güneş/rüzgar/hidrolektrik ve bataryadan oluşan sistemin maliyet-etkin, sürdürülebilir ve çevre dostu olduğu gösterilmiştir.

Alkababjie ve Hamdon (2012), Irak'ın kırsal bir bölgesindeki bir kasaba için şebekeden bağımsız bir hibrit enerji santrali tasarlamışlardır. Kasabanın elektrik üretimi, hali hazırda dizel jeneratörler ile sağlanmakta olup, yazarlar tarafından önerilen sistem, mikro hidroelektrik santrali, iki dizel jeneratör ve bataryadan oluşmaktadır. Bu çalışmada üç adet sistem birbiri ile karşılaştırılmıştır. İlk durumda yalnız iki dizel jeneratör ele alınmış, ikinci durumda dizel jeneratörlere mikro hidroelektrik santrali ilave edilmiş ve son durumda ise ikinci durumdaki komponentlere batarya ilave edilmiştir. HOMER programı ile yapılan simülasyonun sonuçları, üçüncü alternatif kullanılarak üretilen elektriğin birim maliyetinin en düşük olduğunu ve çevreye yayılan emisyon miktarlarının diğer alternatiflere göre daha az olduğunu göstermiştir.

Lal ve diğerleri (2011), Hindistan'ın Orissa Eyaleti'nin, Sundargarh bölgesi için yenilenebilir enerji kaynaklı hibrit bir güç üretim santrali modellemiş ve oluşturdukları modeli optimize etmişlerdir. Öncelikle, bölgenin yenilenebilir enerji kaynak potansiyelini incelemişlerdir. Daha sonra bölgenin, domestik, tarımsal ve endüstriyel elektrik

ihtiyaçları belirlenmiştir. Önerilen yenilenebilir enerji kaynaklı hibrit sistemler HOMER programı yardımı ile simüle edilmiştir. Çalışmada, elektrik şebeke bağlantısının olmadığı kırsal ve şehre oldukça uzak bölgelerde hibrit sistemlerin kullanımının oldukça avantajlı olabileceği vurgulanmıştır.

2.5 Sürdürülebilir Enerji Kaynakları ile Hidrojen Üretimi ve Kullanılması

Hidrojen evrende en çok bulunan gaz olup, çeşitli endüstriyel proseslerde, araçlara yakıt olarak veya elektrik üretimi ve depolanmasında kullanılabilir. Sürdürülebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminin anlık ve kesikli olması enerji depolamayı kaçınılmaz kılmaktadır. Enerji depolamaya yönelik birkaç çözüm vardır. Bunların arasında hidrojen enerjiyi uzun süreli depolayabildiği için benzersizdir. Hidrojen depolama özellikle uzun süreli enerji depolama için oldukça elverişli bir yöntemdir. Bataryalar uzun süreli enerji depolama için uygun değildir. Ayrıca güneş ve rüzgar enerjisi potansiyeli bölgesel olarak farklılık göstermektedir ve bu kaynaklardan üretilen enerjinin bulunulan bölgeden farklı bir yere taşınmasında hidrojen kullanılabilir (Yılancı, 2008). Bununla birlikte, düşük verimlilik ve yüksek maliyet nedeniyle, yeşil hidrojen üretim yöntemleri yaygın değildir (Dincer, 2012). Hibrit enerji sistemlerinde hidrojen, enerji depolama aracı olarak kullanılacak ise bir hidrojen üretim cihazı yani elektrolizör, bir hidrojen depolama tankı ve bir yakıt hücresi kullanılmalıdır.

Literatürde pekçok araştırmacı, farklı lokasyonlar için hidrojen depolamalı hibrit enerji sistemlerinin performansını incelemiştir. Aiche-Hamane vd.(2009), Cezayir'in Ghardia bölgesi için rüzgar türbinlerinden hidrojen üretiminin fizibilitesini incelemiştir. Çalışmanın sonuçları, sistem tarafından üretilen hidrojen miktarının büyük ölçüde rüzgar türbininin kule yüksekliğine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. 10 kW rüzgar türbini ve 5 kW elektrolizörden oluşan bir sistemin yıllık hidrojen üretimi, 10 m kule yüksekliği için 1600 Nm^3, 30 m kule yüksekliği için 3200 Nm^3'tür. Sonuçlar, üretilen hidrojen miktarının, aylık ortalama rüzgar hızındaki değişim nedeniyle mevsimsel olarak dalgalandığını da ortaya koymuştur. Mostafaeipour vd. (2016), İran'ın Fars eyaletindeki dört farklı bölgenin rüzgar türbinleri kullanılarak hidrojen üretimi potansiyelini değerlendirmek üzere bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, bir yıl boyunca farklı

yüksekliklerde rüzgar hızları kaydedilmiştir. Abadeh, sonuçlara göre en yüksek rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olan bölgedir. 900 kW'lık bir rüzgar türbini uygulaması ile üretilen hidrojen miktarı haftada 22 arabaya yakıt sağlamak için yeterlidir. Mohsin vd. (2018), Pakistan'ın çeşitli bölgelerinde rüzgar türbini-hidrojen depolama sisteminin mali fizibilitesini ve teknik performansını araştırmıştır. Sonuçlar, rüzgar türbinlerinin ürettiği elektriğin seviyelendirilmiş maliyetinin 0,0844 - 0,0864 $/kWh arasında olduğunu ve hidrojen üretim fiyatının 4,304 $/kg olduğunu göstermektedir. Literatürde, rüzgar türbini ve hidrojen depolamalı hibrit enerji sistemleri Kayseri-Türkiye (Genc vd., 2012), Çin (Deng ve Jiang, 2020; Fang, 2019), Pakistan (Iqbal vd., 2019), Afganistan (Rezaei vd., 2020), Güney Afrika (Ayodele ve Munda, 2019) ve İran iklimi için de çalışılmıştır (Alavi vd., 2016; A. Mostafaeipour vd., 2019; Rezaei-Shouroki vd., 2017).

Literatürde, FV sistem ve yakıt hücrelerinden oluşan hidrojen depolamalı hibrit enerji sistemleri ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Özden ve Tari (2016), H_2 depolamalı bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminin enerji, ekserji ve ekonomik analizini sunmuştur. İncelenen sistem 39,6 kW FV dizisi, 5 kW PEM yakıt hücresi ve 45 m^3 H_2 depolama tankından oluşmaktadır. Singh vd. (2020) Hindistan'daki küçük bir bölgenin iklim verilerini kullanarak, FV dizisi ve yakıt hücresinden oluşan şebekeden bağımsız bir hibrit enerji sistemini finansal olarak optimize etmiştir. Benzer çalışmalar, Suudi Arabistan (Mubaarak vd., 2020; Rezk ve Dousoky, 2016), Türkiye (Dursun, 2012) ve Polonya (Knutel vd., 2020) iklim verileri kullanılarak, farklı araştırmacılar tarafından sunulmuştur.

Shakya vd. (2005), Avustralya'nın Cooma bölgesi için hidrojen depolamalı bir rüzgar-FV hibrit enerji sisteminin ekonomik ve teknik fizibilitesini araştırmıştır. Sonuçlara dayanarak yazarlar, yalnız FV sisteminin, hibrit rüzgar ve FV enerji sisteminden daha düşük seviyelendirilmiş enerji maliyetine sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Hidrojen alt sistemi ile ilgili maliyet, toplam sistem maliyetinin %74'ü olarak bulunmuştur. Khosravi vd. (2018), hidrojen depolamalı bir hibrit enerji sistemini, enerji, ekserji verimi ve finansal fizibilite açısından araştırmıştır. Çalışmanın sonuçları, sistemin geri ödeme süresinin 11 yıl olduğunu ve enerji depolamanın, sistemin net bugünkü değer maliyetinin % 50'sini oluşturduğunu göstermiştir. Eroglu vd. (2011) İstanbul Teknik Üniversitesi'nde

bulunan mevcut bir FV/rüzgar türbini/yakıt hücresi hibrit sisteminin yıllık enerji performansını değerlendirmek için bir çalışma yürütmüştür. Çalışmanın sonuçlarında, akıllı enerji kontrol stratejileri ile sistemin enerji ihtiyacının yıl boyunca kesintisiz olarak karşılanabildiği vurgulanmıştır. Duman ve Güler (2018), Çeşme'deki yazlık evler için hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin teknik performansını ve ekonomik fizibilitesini araştırmıştır. Çalışmada, kullanıcı yükü (mevsimsel ve sürekli) ve enerji depolama açısından farklı senaryolar incelenmiştir. Minimum enerji maliyeti esas alınarak her senaryo için optimum sistem konfigürasyonları belirlenmiştir. Hidrojen depolamalı rüzgar-FV hibrit enerji sistemleri ayrıca Mısır (Fathy, 2016; Samy vd., 2019), İran (Hosseinalizadeh vd., 2016; Khalilnejad ve Riahy, 2014), Bahreyn (Alnaser, 2020), Rusya (Marchenko ve Solomin, 2017), Montana-ABD (Nelson vd., 2006), Kolombiya (Valencia vd., 2019), ve Tunus (Smaoui vd., 2015) için de incelenmiştir.

2.6 Enerji Simülasyon Yazılımları

Enerji sistemlerinin tasarımı ve modellenmesinde simülasyon programları yaygın olarak kullanılmaktadır. Simülasyon programları sayesinde en karmaşık sistemler bile basitleştirilerek modellenebilmekte ve bu model kullanılarak sistemin gerçek davranışı sistem daha kurulmadan önce öngörülebilmektedir. Bu da özellikle yatırımcı ve kullanıcıların daha doğru kararlar verebilmelerini sağlamaktadır. Enerji simülasyon programları çok çeşitlidir. Çalışmanın bu kısmında en yaygın olarak tercih edilen üç program sunulmuştur.

2.6.1. TRNSYS

Transient System Simulation Program (TRNSYS) University of Wisconsin-Madison tarafından geliştirilmiş olup, 1970'li yıllarda ticarileştirilmiştir. TRNSYS programı modüler yapıya sahip, enerji tüketimi ile ilgili karmaşık sistemleri daha küçük bileşenler haline getirerek çözmek için geliştirilmiş bir simülasyon yazılımıdır (Güğül, 2016). Sistem bileşenleri, istenilen çıktıyı elde edebilmek için Simulation Studio denilen, programın grafiksel ara yüzünde, tasarlanıp, birbirlerine bağlanırlar. Programın bu özelliği, kullanıcıya, oldukça karmaşık sistemleri bile küçük, yönetilebilir parçalar

halinde inceleyebilme olanağı sunar. Programın geniş kütüphanesi sayesinde, farklı tiplerdeki, ısıtma, soğutma, havalandırma ve elektrik üretim sistemleri seçilerek, seçilen komponentler arasındaki enerji ve kütle akışı modellenebilir.

2.6.2. HOMER

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) programı, herhangi bir binanın, veya bir bölgenin elektrik yükünü karşılayacak kaynakların optimum kombinasyonunu araştırmaya yarayan bir yazılımdır. Bu program ile binanın bulunduğu şehir girilerek, bu bölgedeki yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji talebini karşılayıp karşılamayacağı araştırılabilir. HOMER programı sistem kontrolünü sağlarken, temel prensip maliyetin minimize edilmesidir. Bu program ile önerilen sistemlerin karşılaştırmalı ekonomik analizi yapılabilir. Bir sistemin ilk yatırım maliyeti daha yüksek olmasına rağmen, ömür maliyeti daha ekonomik olabilir. Tüm etkileri dikkate alan bu program, yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik açıdan karşılaştırılması, optimize edilmesi ve duyarlılık analizlerinin yapılması açısından çok kullanışlıdır.

2.6.3 Engineering Equation Solver (EES)

EES programı genel olarak bir denklem çözüm programıdır. Özellikle termodinamik problemlerinde akışkan özelliklerinden matematiksel fonksiyonlara kadar pek çok özelliği içinde barındıran kütüphanesi sayesinde oldukça hızlı ve kolay çözüme ulaşılabilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Ülkemiz gelişmekte olan bir ülke olup enerji ihtiyacının çoğunu ithal etmektedir. Türkiye kömür, linyit, hidro, jeotermal, güneş ve rüzgar gibi çok çeşitli enerji kaynaklarına sahiptir (Kok ve Benli, 2017). Bununla birlikte, Türkiye'nin enerji kaynakları, enerji ihtiyacının yalnızca % 48'ini karşılayabilmektedir (Toklu, 2013). Enerji açığının yanı sıra, çevre kirliliği, dünyanın geri kalanında olduğu gibi ülkemiz için de önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji sistemi uygulamalarını artırmak ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak çok önemlidir. Güneş ve rüzgar enerjisi kaynakları bölgenin iklim verilerine bağlı olduğundan, bu kaynakların belirli lokasyonlarda mevcudiyetini ve kullanım potansiyelini araştırmak, sistem performanslarını öngörebilmek açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple elektrik ve hidrojen üretimi gibi farklı amaçlarla kullanılabilecek farklı sürdürülebilir hibrit enerji sistemlerinin enerji performanslarını, gerçek iklim verileri kullanarak bölgesel olarak araştırmak ve konvansiyonel enerji sistemleri ile karşılaştırmak bu tezin öncelikli hedefleri arasındadır.

Bu doktora tezinde çeşitli hibrit enerji sistemleri modellenmiş, incelenmiş ve optimize edilmiştir. Sistemlerden biri yalnızca elektrik üretimi için ve ikincisi ise hem elektrik hem de hidrojen üretimi için kullanılmıştır. Çeşitli enerji kaynakları kullanılarak farklı enerji çıktıları elde edilmiştir. Bu bölümde sunulan alt bölümlerde, incelenen sistemler ayrı ayrı açıklanmıştır.

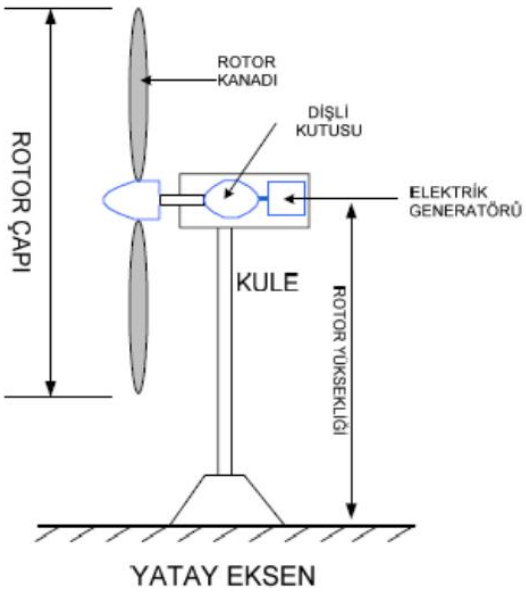
Enerji ihtiyacının sürekli artması ve fosil yakıtların bu ihtiyacı karşılamada yetersiz kalması, sürdürülebilir enerji kaynaklarının önemini arttırmıştır. Rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi sürdürülebilir kaynaklardan enerji üretmek mümkündür. Rüzgar hızı ve güneş ışınımı gün içinde ve mevsimsel olarak değişiklik göstermektedir. Bu sebeple, yalnızca rüzgar veya yalnızca güneş enerjisi ile yıl boyunca elektrik üretmek, enerji güvenilirliği açısından uygun değildir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin geleneksel sistemlerle entegre edilerek hibrit enerji sistemleri oluşturulması gittikçe yaygınlaşan bir uygulamadır.

Tez çalışmasının bu kısmında, şebekeden bağımsız olarak çalışabilecek hibrit enerji sistemleri tasarlanmıştır. Hibrit enerji sistemleri tasarlanırken yerel kaynakların en verimli şekilde kullanılabileceği konfigürasyonun oluşturulması oldukça önemlidir. Bu sebeple sistemin kurulacağı bölgenin iklimsel ve coğrafi koşulları dikkate alınmalıdır.

Tasarlanan hibrit enerji sisteminde rüzgar türbini ve fotovoltaik modüller ana güç kaynakları olarak, yakıt hücresi ve dizel jeneratör ise yardımcı güç kaynakları olarak kullanılmıştır. Enerji depolama alternatifleri olarak hidrojen depolama ve bataryalı sistemler ayrı ayrı incelenmiştir.

3.1. Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi

Rüzgar türbinleri, rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürler. Rüzgar hızı, elektrik üretimini belirleyen en önemli faktördür. Şekil 3.1'de yatay eksenli rüzgar türbinlerinin bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin bileşenleri (Çetin, 2021)

Türbine giren rüzgar gücü (P_g) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_g = \frac{1}{2}\rho A {u_0}^3 \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de ρ havanın yoğunluğunu, A rotor alanını ve u_0 hava hızını göstermektedir. Görüldüğü gibi bir rüzgar türbininde elde edilebilecek güç, rüzgar hızının küpü ile orantılıdır. Bu sebeple rüzgar santralinin kurulacağı bölgenin rüzgar hız profilinin belirlenmesi büyük önem taşır. Güç katsayısı (C_p) türbinin ürettiği enerjinin, türbine gelen toplam rüzgar enerjisine oranıdır ve Eşitlik (3.2)'de ki gibi gösterilir:

$$C_p = \frac{\text{Üretilen elektrik enerjisi}}{\text{Türbine giren rüzgar enerjisi}} = \frac{P_ç}{P_g} \quad (3.2)$$

Rüzgar türbini tarafından üretilen elektrik enerjisi $(P_ç)$, Eşitlik (3.3)'de verilmiştir:

$$P_ç = C_p . P_g = \frac{1}{2}\rho A C_p {u_0}^3 \quad (3.3)$$

Rüzgardan elde edilebilecek gücün kayıplar ihmal edilse dahi bir sınırı vardır. Bu sebeple güç katsayısı C_p'nin alabileceği bir maksimum değer vardır $C_{p_{maks}} = 0{,}593$ ve buna Betz limiti denir (Elnaggar vd., 2017). Buna göre rüzgar türbininin üretebileceği maksimum güç $(P_{ç,maks})$ aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Dabakoğlu, 2017):

$$P_{ç,maks} = \frac{1}{2}.0.593.\rho.A.{u_0}^3 \quad (3.4)$$

Rüzgar türbininin seçiminde çalıştığı hız aralığı önem arz eder. Üreticiler türbin kataloglarında devreye giriş (cut-in) hızı, devreden çıkış (cut-out) hızı ve anma rüzgar hızını belirtirler. Devreye giriş hızı, türbin kanatlarının elektrik üretmeye başladığı en düşük hızdır. Bu hızın altında, rüzgar türbini rotor kanatlarını döndürecek torku yakalayamaz ve dolayısıyla çalışamaz (Dabakoğlu, 2017). Devreye giriş hızının üzerinde, rüzgar türbini elektrik üretimine başlar ve hızı arttıkça elektrik üretimi artar. Ancak belli bir hız değerinden sonra rüzgar hızının artışı elektrik üretimini arttırmaz ve bu sınır değerine anma hızı denir. Rüzgar hızının çok artması, türbine zarar verebileceğinden bu durumda kontrol sistemleri devreye girer ve türbin durdurulur. Rüzgar türbinin çalışmasının durdurulacağı bu yüksek hız değerine de devreden çıkış hızı denir.

Rüzgar hızı ölçümleri meteoroloji istasyonlarında genellikle yerden 10 m yükseklikten yapılmaktadır. Yükseklik ile rüzgar hızı değişimlerini bulabilmek için kullanılan güç kanunu profili aşağıda verilmiştir:

$$u_2 = u_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^a \tag{3.5}$$

Eşitlik (3.5)'de u_2 türbinin bulunduğu yükseklikteki hız olup, u_1 anemometre yüksekliğindeki rüzgar hızıdır. z_2 türbinin bulunduğu konumun yüksekliği olup, z_1 referans yükseklik yani anemometre yüksekliğidir. a ise bölgenin topoğrafyasına bağlı olan bir katsayıdır ve genellikle 1/7 olarak kabul edilir.

Rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesindeki en önemli husus belirli bir periyod boyunca ölçülen veya meteoroloji gözlem istasyonlarından tedarik edilen rüzgar hızı verilerinin değerlendirilmesidir. Buna göre santral konumlandırılır, boyutlandırılır ve türbinlerden elde edilebilecek elektrik enerjisi saptanır. Weibull dağılımı rüzgar hızı verilerinin değerlendirilmesinde en yaygın olarak kullanılan fonksiyonlardan biridir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu f(u), u hızının herhangi bir zamanda gözlenme olasılığını vermektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$f(u) = \frac{k}{c}\left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} exp\left[\left(-\frac{u}{c}\right)^k\right] \tag{3.6}$$

Eşitlik (3.6)'da k boyutsuz şekil parametresini, c ölçek parametresini ifade etmektedir. Weibull fonksiyonuna karşılık gelen ortalama güç yoğunluğu şu formülden hesaplanabilir:

$$RGY = 0.5\rho c^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k}) \tag{3.7}$$

Eşitlik (3.7)'de Γ gama fonksiyonudur. Hava yoğunluğu ideal gaz kanunu ile Eşitlik (3.8)'deki gibi hesaplanabilir:

$$\rho = \frac{P_a}{RT} \tag{3.8}$$

Yukarıdaki denklemde P_a (kPa) atmosfer basıncını, R (kJ/kg.K) gaz sabitini, T (K) hava sıcaklığını ifade etmektedir. Ortalama rüzgar hızı $(\bar{u})$ ve standart sapma (σ) sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\bar{u} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i \tag{3.9}$$

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^{n} \frac{(u-\bar{u})^2}{n-1}\right]^{0.5} \tag{3.10}$$

Rüzgar türbinlerinin ekserji verimi, türbinin ürettiği gerçek işin, rüzgarın ekserjisine olan oranıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\epsilon_{Rüzgar\ Türbini} = \frac{W_ç}{\dot{X}_{hava}} \tag{3.11}$$

Eşitlik 3.11'de $\dot{X}_{hava}$ türbinden geçen havanın ekserjisidir ve iki kısımdan oluşur (Redha vd., 2011).

$$\dot{X}_{hava} = \dot{X}_{fiziksel} + \dot{X}_{kinetik} \tag{3.12}$$

Havanın fiziksel ekserjisi entalpi ve entropi değişimi ile alakalıdır ve aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\dot{X}_{fiziksel} = \dot{m}\left[c_p(T_2 - T_1) + T_0\left(c_p ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - Rln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) - \frac{c_p(T_0 - T_{avg})}{T_0}\right)\right] \tag{3.13}$$

Eşitlik 3.13'de T_1 ve T_2 sırasıyla türbine giren ve çıkan havanın sıcaklığı olup, P_1 ve P_2 türbin giriş ve çıkışındaki basınçtır ve şu şekilde hesaplanır:

$$P_{1,2} = P_{atm} + \frac{\rho V_{1,2}^2}{2} \tag{3.14}$$

Kinetik ekserji ise türbinde üretilen işe eşittir:

$$\dot{X}_{kinetik} = W_{çıkan} \tag{3.15}$$

3.2 Fotovoltaik Sistemlerin Modellenmesi

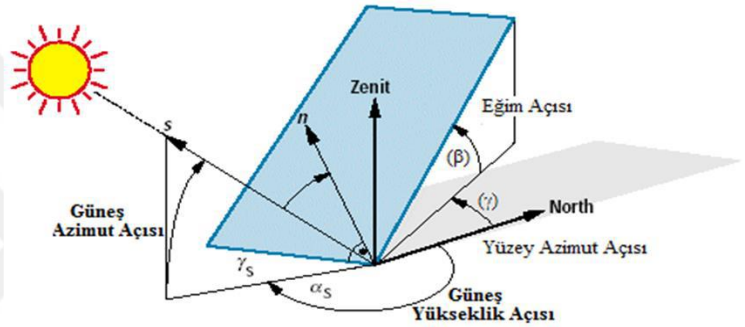
Fotovoltaik (FV) paneller güneşten yüzeylerine gelen farklı dalga boylarındaki ışınımı doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken yapılardır. Güneş panelleri 36 veya daha çok güneş hücresinin laminasyon tekniği ile birleştirilmesi ile oluşur (Boztepe, 2015). Güneş panelleri hücre yapısına göre değişkenlik göstermekle birlikte %5 ila %20 arasında bir verimle güneş enerjisini elektriğe dönüştürebilir. Güneş panellerinin verimi güneşin geliş açısı, panel hücrelerinin malzemesi ve yapısı, sıcaklık, güneşlenme süresi, güneş ışınımı şiddeti gibi çeşitli parametrelere göre değişiklik gösterir. Kurulum maliyetleri oldukça yüksek ve verim değerleri çok yüksek olmayan bu sistemlerin maksimum gücü elde edebilecek şekilde çalıştırılmaları oldukça önem taşımaktadır (Duman vd., 2014). FV sistemlerin verimi, panelin ürettiği elektrik miktarının o alana gelen global güneş ışınımının oranı şeklinde hesaplanabilir. FV sistemler modellenirken bilinmesi gereken temel terimler aşağıda açıklanmıştır.

FV sistemler modellenirken belirlenen iki açı, sistem verimini önemli ölçüde etkiler. Bunlar azimut ve eğim açılarıdır. Güneş açılarının şematik gösterimi Şekil 3.2'de sunulmuştur.

Azimut açısı: Azimut açısı güneş panellerinin ekvator çizgisine olan uzaklığını gösterir. Eğer bulunulan bölge kuzey yarım kürede ise, güney yönünde azimut açısı 0° ve batı yönünde azimut açısı 90°dir. Eğer bulunulan bölge güney yarım kürede ise, azimut açısı kuzey yönünde 0°'dir.

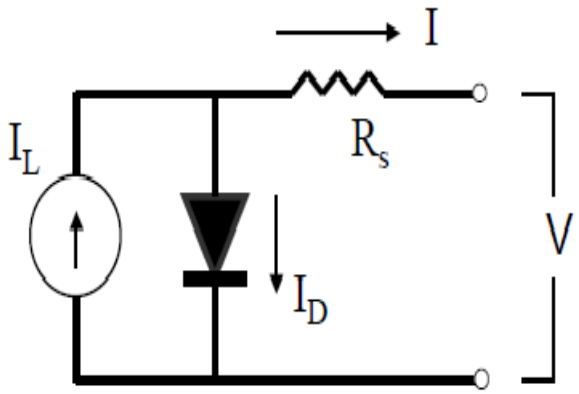
Eğim açısı: FV panel yüzeyi ile yatay yüzey arasındaki açıya eğim açısı (slope angle) denir. En yüksek FV sistem verimi için güneş ışınlarının panel yüzeyine dik açı ile gelmesi gerekir. Optimum eğim açısı günlük ve mevsimsel olarak değişkenlik göstermektedir, ancak bu açının sürekli olarak değiştirilmesi pratik bir uygulama değildir. Bu sebeple genellikle yıllık elektrik üretimi bütünsel olarak düşünülerek, bulunulan bölgenin enlemi dikkate alınarak sabit bir eğim açısı belirlenir (Bitirgen, 2018).

Işınım: Yataydaki toplam ışınım, direkt, dağınık ve yerden yansımış güneş ışınımının toplamıdır (Livatyalı ve Yıldırım, 2011). Direkt veya doğrudan gelen ışınım, hiçbir yere sapmadan, birim alana dik olarak düşen ışınımdır. Atmosfer partiküllerinden yayılarak ya da saçılarak yüzeye düşen ışınıma dağınık gelen (yayılı) ışınım denir (Şimşek, 2018). Direk ve yayılı ışınımların toplamı global ışınım olarak tanımlanır. Global ışınım, bulunulan bölgenin enlem, boylam rakımı gibi coğrafi faktörlere, yüzeyin azimut ve eğim açısı gibi geometrik faktörlere, bulutların etkisi gibi meteorolojik faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir (Ajder, 2011).



Şekil 3.2. Güneş açıları (Yılmaz vd., 2015b)

FV sistemlerin modellenmesinde en yaygın kullanılan model Şekil 3.3'te gösterilen tek diyotlu basitleştirilmiş modeldir. Burada I_L güneş ışınımıyla değişen foton akımını ve I_D diyot akımını göstermektedir.



Şekil 3.3. Basitleştirilmiş FV modeli

Akım-gerilim arasındaki ilişki Eşitlik (3.16)'daki gibi gösterilebilir (Buonomano vd., 2018). Bu eşitlikte *V* hücre gerilimi (V), q elektron yükü (1,60 x 10^{-19}C), *k* Boltzmann sabiti (1,38 x 10^{-23} J/K) ve *I* panelin çıkış akımını göstermektedir.

$$I = I_{L,ref}\frac{G_T}{G_{T,ref}} - I_0\left[exp\left(\frac{q}{\gamma k T_c}(V + IR_s)\right) - 1\right] \tag{3.16}$$

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T_C}{T_{C,ref}}\right)^3 \tag{3.17}$$

Eşitlik 3.16 ve 3.17'de verilen $I_{o,ref}$ referans durumda diyodun ters doyum akımını, $G_{T,ref}$ referans ışınım değeri (Wh/m^2), G_T panelin bulunduğu ortamdaki güneş ışınım miktarını, γ ampirik eğri uydurma parametresini ve R_s seri direnci göstermektedir.

$$I_{L,ref} \approx I_{SC,ref} \tag{3.18}$$

$$\gamma = \frac{q\left(V_{mp,ref} - V_{oc,ref} + I_{mp,ref}R_s\right)}{kT_{c,ref}In\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \tag{3.19}$$

$$I_{o,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp\left(\frac{qV_{oc,ref}}{\gamma k T_{c,ref}}\right)} \tag{3.20}$$

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c} = \mu_{voc} = \frac{\gamma k}{q}\left[In\left(\frac{I_{sc,ref}}{I_{o,ref}}\right) + \frac{T_c\mu_{isc}}{I_{sc,ref}} - \left(3 + \frac{q\varepsilon}{AkT_{c,ref}}\right)\right] \tag{3.21}$$

Eşitlik (3.18), (3.19), (3.20), (3.21)'in iteratif bir şekilde çözülmesiyle bilinmeyen tüm parametreler bulunur ve devre karakteristiği hesaplanır.

Güneş paneli için en verimli çalışma noktası maksimum güç noktası (MGN) olarak isimlendirilir ve bu noktada çekilen güç (P_{maks}) (Onat ve Ersöz, 2009):

$$P_{maks} = I_{maks}.V_{maks} \tag{3.22}$$

Maksimum çalışma noktasındaki panel verimi ise:

$$\eta_{maks} = \frac{P_{maks}}{P_{in}} = \frac{P_{maks}}{A.G_T} \tag{3.23}$$

Eşitlik (3.23)'de A değeri panel alanını (m^2) göstermektedir. FV sistemlerin maksimum güç ve verimle çalışması panel sıcaklığı, güneş ışınlarının gelme açısı gibi çeşitli parametrelere göre değişiklik gösterir. Panellerin sürekli maksimum güç noktasında çalışabilmesi için maksimum güç noktası izleyicisi (MGNİ) olarak adlandırılan güç konvertörleri kullanılabilir (Onat ve Ersöz, 2009).

İhtiyaç duyulan güce bağlı olarak paneller birbirlerine seri ya da paralel olarak bağlanarak dizileri oluşturur. Panel sayısı (n) ile bir panelin gücü çarpılarak kurulu sistemin toplam gücü $\left(P_{Top}\right)$ elde edilir:

$$P_{Top} = n.P_{Panel} \tag{3.24}$$

FV sistem uygulamaları iki ana grupta incelenebilir: Şebekeye bağlı FV sistemler (On-Grid), şebekeden bağımsız sistemler (Off-Grid). Şebeke bağlantılı sistemlerde enerji depolama söz konusu değildir. Bu sistemlerde, ihtiyaçtan fazla üretilen elektrik enerjisi şebekeye satılır ve ihtiyaçtan daha az enerji üretildiği durumlarda şebekeden enerji satın alınır. Şebekeden bağımsız FV sistemler genellikle bağlantının zor olduğu bölgelerde tercih edilirler. Bu sistemlerde şebekeye bağlantı söz konusu olmadığı için dizel jeneratör gibi yedek bir güç kaynağı ve güneş enerjisinin yetersiz olduğu saatlerde kullanılmak üzere akü bulundurulur. Böylelikle gün içinde üretilen enerji fazlası aküde depolanır ve ihtiyaç durumunda kullanılır. Ancak enerji depolama sistemlerinin ilavesi FV sistemlerin kurulum maliyetini oldukça arttırır.

Çevre sıcaklığında çalışan enerji sistemleri için kullanılabilir enerjiyi ya da diğer adıyla ekserjiyi hesaplamak oldukça önemlidir. FV sistemlerin enerji hesabında iki temel bileşen söz konusudur; bunlar ısı enerjisi ve elektrik enerjisidir. FV panellere olan ekserji girdisi aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanabilir (Ozden, 2015):

$$\dot{X}_{giren} = G_T A \left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right)^4\right] \tag{3.25}$$

Bu denklemde A, FV panellerin toplam alanı, G_T panel yüzeylerine düşen güneş radyasyonu, $T_{çevre}$ hava sıcaklığı ve $T_{güneş}$ güneşin yüzey sıcaklığıdır. Panellerden olan net ekserji transferi ise üretilen elektrik ekserji olduğundan direk olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{X}_{çıkan} = I_{maks}.V_{maks} \tag{3.26}$$

FV panellerden olan ekserji kaybı ise aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{X}_{kayıp} = \dot{Q}_{kayıp}\left(1 - \frac{T_{çevre}}{T_{FV}}\right) \tag{3.27}$$

T_{FV}, FV panellerin yüzey sıcaklığı olup, $\dot{Q}_{kayıp}$ ise panellerden olan ısı kayıp hızıdır.

$$\dot{Q}_{kayıp} = h_{taşınım}.A_{FV}.(T_{FV} - T_{çevre}) \tag{3.28}$$

Bu denklemde $h_{taşınım}$ panel yüzeyi ile ortam havası arasındaki ısı taşınım katsayısıdır ve rüzgar hızına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$h_{taşınım} = 2{,}8 + 3.u \tag{3.29}$$

Ekserji kayıp akımı ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{XD}_{FV} = \dot{X}_{giren} - \dot{X}_{çıkan} - \dot{X}_{kayıp} \tag{3.30}$$

FV panellerin ekserji verimi ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\epsilon_{FV} = \frac{\dot{X}_{çıkan}}{\dot{X}_{giren}} \tag{3.31}$$

3.3 Dizel Jeneratörlerin Modellenmesi

Sürdürülebilir enerji kaynaklarından günün belli saatlerinde enerji sağlanabilmekte ve kalan saatlerde yük enerjisiz kalabilmektedir. Eğer akü gibi bir enerji depolama sistemi

mevcut ise, akü yüke belli bir noktaya kadar enerji sağlar. Ancak belli bir deşarj noktasına indikten sonra, sistem aküden enerji çekmeyi bırakır ve dizel jeneratör devreye girer. Dizel jeneratörler şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemlerinde ilave güç kaynağı olarak kullanılırlar. Dizel jeneratörün elektrik verimi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir:

$$\eta_{el} = \frac{P_D}{\rho_D \dot{V}_D \, LHV_D} \tag{3.32}$$

Eşitlik (3.32)'de P_D dizel jeneratörün nominal gücünü [W], ρ_D dizel yakıtın yoğunluğunu [kg/m^3], $\dot{V}_D$ yakıtın hacimsel debisini [m^3/s], LHV_D yakıtın alt ısıl değerini [J/kg] göstermektedir. Birden fazla eşdeğer dizel motor olması durumunda, dizel jeneratör ünitesinin toplam güç değeri ise,

$$P_{toplam} = N_D P_D \tag{3.33}$$

Eşitlik (3.33)'de N_D eşdeğer dizel motor sayısını göstermektedir. Dizel jeneratör ünitesinin toplam yakıt tüketimi ise her bir jeneratörün tükettiği yakıtın jeneratör sayısına çarpılması ile bulunur:

$$\dot{V}_D = N_D . \dot{V}_D \tag{3.34}$$

Termal kayıplar ise aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$Q_T = N_D . P_D . \frac{100 - \eta_{el}}{\eta_{el}} \tag{3.35}$$

3.4 Bataryanın Modellenmesi

Rüzgar ve güneş enerjisinin temel handikapı üretilen enerjinin kesikli oluşu ve saatlik, aylık veya mevsimlik olarak değişim göstermesidir. Bu sebeple rüzgar ve güneş enerjisi gibi sürdürülebilir kaynaklara bağlı sistemlerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için enerji depolama sistemlerini kullanmak kaçınılmazdır. Enerji depolama için farklı alternatifler bulunmaktadır. Bataryalar elektrik enerjisini kimyasal formda depolayan

elektrokimyasal cihazlardır. Depolama prosesi tersine çevrilerek benzer şekilde kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı olan güç sistemlerinde, bataryalar ihtiyaç fazlası enerjinin depolanmasını sağlar. Pek çok batarya çeşidi olsa da, kurşun- asit (lead-acid) bataryalar en yaygın kullanılan bataryalardandır (Kirçiçek vd., 2017). Kurşun asit bataryalar enerji depolama konusunda en olgun teknolojilerdendir. Düşük ilk yatırım maliyeti, kolay bakım gibi avantajları sayesinde çokça tercih edilirler (Erdinç vd., 2011). Ancak bunun yanında düşük enerji yoğunluğuna sahip olma, kurşun bileşeninin çevreye zararlı olması gibi dezavantajları da mevcuttur. TRNSYS kütüphanesindeki *Type 47* modeli kurşun-asit bataryanın şarj ve deşarj durumunun modellenmesini sağlamaktadır. Bu modelde kullanılan temel denklemler Shepherd (1965) tarafından türetilmiştir. Deşarj durumu içim (I<0), Shepherd denklemi aşağıdaki gibidir:

$$V = e_{qd} - g_d H + I r_{qd}\left(1 + \frac{m_d H}{{Q_d}/{Q_m} - H}\right) \tag{3.36}$$

Denklem (3.36)'da, V batarya voltajı, e_{qd} tam şarjda açık devre voltajı, H 1 eksi oransal şarj durumu, I batarya akımı, r_{qd} iç direnç, Q_d Amp-saat biriminde şarj durumu, Q_m hücre kapasitesidir (Mccormick, 2018). Şarj durumunda ise Shepherd denklemi aşağıdaki gibidir (Shepherd, 1965):

$$V = e_{qd} - g_d H + I r_{qd}\left(1 + \frac{m_d H}{{Q_d}/{Q_m} - H}\right) \tag{3.37}$$

3.5 Yakıt Hücresinin Modellenmesi

Yakıt hücreleri yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. Sessiz çalışmaları, sera gazı emisyonu yaymamaları, bakım ihtiyaçlarının az olması, hareketli parça içermemeleri ve kaliteli doğru akım üretmeleri en önemli avantajlarındandır (Kapusuz, 2019). Yakıt pili hücrelerden meydana gelmektedir ve her hücre anot (negatif) ve katot (pozitif) isminde iki elektrot ve bu elektrotların sardığı elektrolitten oluşmaktadır (Çamcı, 2007). Hidrojen, yakıt pilinin anot elektrotuna, oksijen

veya hava ise katot kısmına giriş yapmaktadır. Katalizör etkisiyle hidrojen atomları proton ve elektronlarına ayrılmakta ve ayrılan elektronlar bir elektrik devresinden geçip elektrik akımı oluşturmaktadır (Alkaya vd., 2008). Yakıt hücresi ile elektrik üretimi sonucu çıkan yan ürün sadece su ve ısıdır. Yakıt hücresini bataryadan farklı kılan temel özellik, hidrojen sağlandığı sürece elektrik üretiminin devam etmesi ve şarja gerek olmamasıdır.

Düşük sıcaklıkta çalışabilen iki yakıt hücresi tipi vardır: Alkali ve PEM yakıt hücreleri. Alkali yakıt hücreleri geliştirilen ilk yakıt hücrelerindendir. Çizelge 3.1'de çeşitli yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklığı aralıkları ve verimleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yakıt hücresi çeşitleri. (Ulleberg, 1998)

Yakıt hücresi çeşidi	Elektrolit	Çalışma sıcaklığı (°C)	Verim (%)
Alkali YH	%35-50 su-Potasyum Hidroksit (KOH)	60-90	50-60
Polimer Elektrolit Membranlı YH	Polimer Membran	50-80	50-60
Fosforik Asit YH	Konsantre fosforik asit (H_3PO_4)	160-220	55
Erimiş Karbonatlı YH	Erimiş karbonat (Li_2CO_3/Na_2CO_3)	620-660	60-65
Katı oksit YH	Çinko üzerine tutturulmuş yittria (ZrO_2/Y_2O_3)	800-1000	55-65

Hücrede gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:

$$Anot: \ H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^- \tag{3.38}$$

$$Katot: \ {}^1/_2 \ O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^- \tag{3.39}$$

Yakıt hücresi modelinde kullanılan parametreler Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Hücre gerilimini, modül gerilimini ve yığın gerilimini hesaplamak için kullanılan temel denklemler aşağıda verilmiştir (Ø. Ulleberg ve Glöckner, 2001):

$$V_c = \frac{U_{mod}}{n_{c,ser}} \tag{3.40}$$

$$V_{mod} = V_0 - blog(I_y) - R_{ohm} I_y \tag{3.41}$$

$$V_y = n_{m,ser} V_{mod} \tag{3.42}$$

Çizelge 3.2. Yakıt hücresi modelinde kullanılan parametreler

V_c	Hücre gerilimi [V]
V_{mod}	Modul gerilimi [V]
V_y	YH yığınının toplam gerilim değeri [V]
V_{tn}	Termo-nötral gerilim değeri [V]
$n_{c,ser}$	Her bir modüldeki seri bağlı hücre sayısı [-]
$n_{m,ser}$	Her bir yığındaki seri bağlı modül sayısı [-]
$n_{c,par}$	Paralel bağlı hücre sayısı [-]
$n_{y,par}$	Paralel bağlı yığın sayısı [-]
R_{ohm}	Ohmik direnç [ohm]
I_y	Yığın elektrik akımı [A]
I_{YH}	YH'nin toplam elektrik akımı [A]
I_c	Hücre elektrik akımı [A]
P_y	YH yığınının çıkış gücü [W]
η_E	Enerji verimi [-]
η_F	Faraday verimi [-]
$\dot{n}_{H_2}$	Hidrojenin molar debisi [mol s^{-1}]
$\dot{V}_{H_2}$	Hidrojen tüketimi [Nm^3/saat]
S_{H_2}	Hidrojenin stokiyometrik oranı [-]
z	Reaksiyondaki elektron sayısı
F	Faraday sabiti

$$P_y = V_y I_y \tag{3.43}$$

Hücre ve yığın akımı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$I_c = \frac{I_{YH}}{n_{c,par} n_{y,par}} \tag{3.44}$$

$$I_y = \frac{I_{YH}}{n_{y,par}} \tag{3.45}$$

Enerji verimi ise aşağıdaki gibi bulunur:

$$\eta_E = \frac{V_c}{V_{tn}} \tag{3.46}$$

Hidrojenin stokiyometrik molar debisi (Ø. Ulleberg ve Glöckner, 2001):

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{n_{c,ser} n_{m,ser} I_{YH}}{zF} \eta_F \tag{3.47}$$

Toplam hidrojen tüketimi ise,

$$\dot{V}_{H_2} = \frac{\dot{n}_{H_2}}{\rho_{gaz}} S_{H_2} \tag{3.48}$$

Stokiyometrik oran yakıt hücrelerinde anlık yük miktarı için gerekli yakıt miktarını gösteren bir orandır (Kahraman vd., 2019) ve hesaplamalarda hidrojenin stokiyometrik oranı 1 kabul edilmiştir. Yakıt hücresinin genel verimi ise üretilen gücün, yakıt hücresine verilen enerjiye oranı şeklinde ifade edilebilir:

$$\eta_{enerji} = \frac{\text{Güç üretimi}}{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}} \tag{3.49}$$

Birinci kanun verimi yakıt hücresinin performansını incelemek için yetersiz olabilir. İkinci kanun veriminde üretilen elektrik enerjisi mümkün olan maksimum iş potansiyeline bölünerek yakıt hücresinin performansı daha gerçekçi bir şekilde sunulabilir:

$$\epsilon_{YH} = \frac{\dot{X}_{çıkan}}{\dot{X}_{giren}} = \frac{Güç\ üretimi}{\dot{m}_{H_2}.\dot{x}_{H_2}} \tag{3.50}$$

Yukarıdaki eşitlikte $\dot{m}_{H_2}$ yakıt hücresinin tükettiği hidrojenin kütlesel debisidir. Yakıt hücresine giren hidrojenin özgül ekserjisi iki bileşenden oluşur: fiziksel ve kimyasal ekserji. Literatürde hidrojenin kimyasal enerjisi 117 113 kJ/kg olarak verilmiştir (Calderón vd., 2011; Ozden, 2015).

$$\dot{x}_{H_2} = \dot{x}_{kimyasal} + \dot{x}_{fiziksel} \tag{3.51}$$

Yakıt hücresine giren hidrojenin fiziksel ekserjisi ise (Arshad vd., 2019):

$$\dot{x}_{fiziksel} = c_p T_0 \left[\frac{T_{H_2}}{T_0} - 1 - ln\left(\frac{T_{H_2}}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{P_{H_2}}{P_0}\right)^{\frac{\varphi-1}{\varphi}}\right] \tag{3.52}$$

Eşitlik 3.52'de T_{H_2} ve P_{H_2} yakıt hücresine giren hidrojenin sıcaklığı ve basıncıdır. T_0 ve P_0 ise referans çevre sıcaklığı ve basıncıdır. Ekserji verimi hesaplanırken hidrojenin özgül ısısı c_p (14,89 kJ/kg.K) ve φ adyabatik üssü 1,4 olarak alınmıştır (Calderón vd., 2011).

3.6 Elektrolizörün Modellenmesi

Hidrojen çeşitli kaynaklardan farklı teknolojiler kullanılarak üretilebilir. Hidrojen içeren ürünler, örneğin fosil yakıtlar, su veya biyokütle hidrojen kaynağı olabilir (Ete, 2009). Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen üretimi elektroliz yöntemi ile sağlanabilir. Elektroliz yöntemi, 1800'lü yıllarda Faraday'ın suyun ayrıştırılabildiğini gösterdiğinden beri kullanılan ve gitgide yaygınlaşan bir teknolojidir (Yilanci, 2008). Elektroliz işlemi, sıvı elektrolit ile ayrılmış iki elektrot arasından elektrik akımı (DA)

geçirilerek suyun hidrojen ve oksijene ayrıştırılmasıdır (Ulleberg, 1998). Elektrolizör modelinde kullanılan parametreler Çizelge 3.3'de sunulmuştur.

Bir alkali elektrolizörde KOH gibi bir alkali elektrolit iyon transferini sağlar. Ayrıştırma için iki elektroda minimum voltaj uygulanmalıdır, bu minimum voltaj diğer adıyla tersinir voltaj Gibbs enerjisinden gelmektedir ve standart koşullardaki değeri $V_{rev} = 1{,}229\ V$'tur (Ulleberg, 1998).

Çizelge 3.3. Alkali elektrolizör modelinde kullanılan parametreler

V_{rev}	Tersinir hücre gerilimi [V]
V_c	Hücre gerilimi [V]
V_{tn}	Termo-nötral gerilim değeri [V]
r	Elektrolitin ohmik direnci
s_i, t_i	Elektrotların aşırı gerilim katsayıları (i=1,2….)
A	Elektrot alanı [m^2]
I	Hücre akımı [A]
ΔG	Gibbs Enerjisi [Su ayrıştırma için standard Gibbs Enerjisi: 237 kJ mol^{-1}]
z	Reaksiyondaki elektron sayısı
F	Faraday sabiti [F=96,48 C mol^{-1}]
n	Bir mol su için transfer edilen elektron mol sayısı [n=2]
T	Elektrolit sıcaklığı [°C]
η_F	Faraday verimi [-]
a_1	Faraday verim katsayısı [mA/cm]
a_2	Faraday verim katsayısı [0-1]
$\dot{n}_{H_2}$	Hidrojen üretim oranı [mol s^{-1}]
n_c	Seri bağlı hücre sayısı [-]

Ancak bu değer, sıcaklık ve basınçla değişim gösterir. Anot ve katot reaksiyonları aşağıda belirtilmiştir (Ulleberg, 2003):

$$\text{Katot:}\quad 2H_2O + 2e^- = H_2 + 2OH^- \tag{3.53}$$

$$\text{Anot:}\quad 2OH^- = {}^1\!/_2\, O_2 + H_2O + 2e^- \tag{3.54}$$

$$\text{Toplam: } H_2O = H_2 + {}^1/_2\, O_2 \tag{3.55}$$

$$V_{rev} = \frac{\Delta G}{nF} \tag{3.56}$$

Elektroliz ünitesinin detaylı akım-gerilim modeli Ulleberg tarafından oluşturulmuş olup aşağıda gösterilmiştir (Ulleberg, 1998; Ulleberg, 2003):

$$V = V_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + slog\left(\frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} I + 1\right) \tag{3.57}$$

Faraday verimi gerçek ve teorik maksimum hidrojen üretiminin oranıdır ve aşağıda gösterilmiştir (Ulleberg, 1998):

$$\eta_f = \left(\frac{(I/A)^2}{a_1 + (I/A)^2}\right) a_2 \tag{3.58}$$

Elektrolizördeki toplam hidrojen üretimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{n}_{H_2 = \eta_f \frac{\eta_C I}{zF}} \tag{3.59}$$

Enerji verimi ise aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\eta_E = \frac{V_{tn}}{V_C} \tag{3.60}$$

Elektrolizörün genel enerji verimi ise aşağıdaki gibi bulunabilir (Calderón vd., 2011):

$$\eta_{enerji} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{\text{Güç girişi}} \tag{3.61}$$

Eşitlik (3.61)'de $\dot{m}_{H_2}$ hidrojen üretimi kütlesel debisidir, LHV_{H_2} ise hidrojenin alt ısıl değeridir ve 33,3 kWh/kg olarak alınmıştır. Elektrolizörün verimini daha detaylı bir şekilde inceleyebilmek için ekserji verimi aşağıda sunulmuştur:

$$\epsilon_{El} = \frac{\dot{X}_{çıkan}}{\dot{X}_{giren}} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot x_{H_2}}{Elektrolizörün\ güç\ tüketimi} \tag{3.62}$$

Eşitlik (3.62)'de çıkan ekserji $\dot{X}_{çıkan}$ birim zamanda elektrolizörün ürettiği hidrojen debisi ile onun özgül ekserjisinin çarpımına eşittir. Hidrojenin özgül ekserjisi ise kimyasal ekserji ile fiziksel ekserjinin toplamına eşittir:

$$\dot{x}_{H_2} = \dot{x}_{kimyasal} + \dot{x}_{fiziksel} \tag{3.63}$$

Literatürde hidrojenin kimyasal enerjisi 117 113 kJ/kg olarak verilmiştir (Calderón vd., 2011; Ozden, 2015). Fiziksel ekserji, bir maddenin ilk durumundan, T_0, P_0 çevre şartları ile denge haline geldiğinde elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanmıştır. İdeal gaz için fiziksel ekserji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir (Caliskan vd., 2013):

$$\dot{x}_{fiziksel} = c_p T_0 \left[\frac{T}{T_0} - 1 - ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{P_{H_2}}{P_0}\right)^{\frac{\varphi}{\varphi-1}}\right] \tag{3.64}$$

Eşitlik (3.64)'de T_0, P_0 referans alınan çevre sıcaklığı ve basıncıdır. T ve P_{H_2} ise elektrolizör çıkışındaki hidrojenin sıcaklık ve basıncıdır.

3.7 Basınçlı Gaz Depolama

Hidrojenin depolanabilir olması en önemli avantajlarından biridir. Hidrojenin depolanması için üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar: basınçlı gaz şeklinde depolama, metal hidrid şeklinde depolama ve sıvı depolama şeklinde ifade edilebilir (Telli, 2010). Yüksek basınçlı bir depolama tankı kullanıldığı durumlarda, düşük basınçta hidrojen üreten elektrolizör ile tank arasında gazı sıkıştırmak için kompresör kullanılmalıdır. Basınçlı gaz depolama modeli gazlar için Van Der Walls bağıntısı kullanılarak oluşturulabilir. Modelde kullanılan parametreler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Basınçlı gaz modelinde kullanılan parametreler

p	Basınç (Pa)
n	Mol sayısı (mol)
R	Üniversal gaz sabiti (8,314 J K^{-1} mol^{-1})
T	Sıcaklık (K)
Q	Tank hacmi (m^3)
T_{kr}	Kritik sıcaklık (K)
P_{kr}	Kritik basınç (Pa)

Tanktaki gaz basıncı Van der Walls bağıntısından aşağıdaki gibi hesaplanabilir (McCormick, 2018):

$$p = \frac{nRT_g}{Q-nb} - a\frac{n^2}{Q^2} \quad (3.65)$$

$$a = \frac{27 .R^2.{T_{kr}}^2}{64.p_{kr}} \quad (3.66)$$

$$b = \frac{R.T_{kr}}{8.p_{kr}} \quad (3.67)$$

3.8 Hibrit Enerji Sisteminin Ekonomik Modeli

Şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin tekno-ekonomik fizibilitesi pek çok araştırmacının incelediği bir hususdur. Literatürde yapılan pek çok çalışmada, hibrit enerji sistemlerinin seviyelendirilmiş enerji maliyeti, konvansiyonel sistemlerle üretilen enerjinin seviyelendirilmiş maliyetiyle kıyaslanarak ekonomik avantaj ve dezavantajlar karşılaştırılmıştır (Altun ve Kilic, 2020b). Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) analizinde kullanılan tüm parametreler Çizelge 3.5'te verilmiştir. Ekonomik analizde kullanılan parametreler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE), sistemin yıllık maliyetinin, sistemin yıllık ürettiği elektrik enerjisine oranıdır:

$$LCOE = \frac{C_{yıllık}}{E_{üretilen}} \quad (3.68)$$

Çizelge 3.5. Ekonomik analizde kullanılan parametreler

LCOE	Seviyelendirilmiş enerji maliyeti [$/kWh]
$C_{yıllık}$	Yıllık sistem maliyeti [$/yıl]
$E_{üretilen}$	Sistem tarafından üretilen toplam enerji [kWh]
SGF	Sermaye geri kazanım faktörü
i	Faiz oranı [%]
N	Faydalı proje ömrü [yıl]
C_{OM}	Yıllık işletme-bakım maliyeti [$/yıl]
C_{YM}	Yıllık yakıt maliyeti [$/yıl]
C_{KM}	Sistemin kurulum maliyeti [$]
C_{DM}	Sistemin değiştirme maliyeti [$]
C_{HM}	Sistemin hurda maliyeti [$]
STF	Düzgün seri tasarruf miktarı faktörü
$E_{yakıt}$	Sistemin yıllık yakıt ihtiyacı [litre/yıl]
$K_{yakıt}$	Dizel yakıtın birim maliyeti [$/litre]
FÖ	Sistemdeki her bir ekipmanın faydalı ömrü [yıl]
KÖ	Proje ömrü sona erdiğinde sistemdeki her bir ekipmanın kalan ömrü [yıl]

Sermaye geri kazanım faktörü, belli bir zaman aralığı için yıllaştırılmış proje maliyetini hesaplamak için kullanılır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$SGF(i,N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \tag{3.69}$$

Eşitlik (3.69)'da i faiz oranı %6 kabul edilmiştir, faydalı proje ömrü N ise 20 yıl olarak belirlenmiştir.

Projenin yıllaştırılmış veya yıllık maliyeti ise aşağıda verilmiştir:

$$C_{yıllık} = \sum(C_{KM}.SGF) + \sum(C_{DM}.STF) - \sum(C_{HM}.STF) + \sum(C_{OM} + C_{YM}) \tag{3.70}$$

Düzgün seri tasarruf miktarı faktörü ise aşağıda verilmiştir:

$$STF = \frac{i}{(1+i)^N - 1} \tag{3.71}$$

Çizelge 3.6. Ekonomik analizde kullanılan maliyetler

Ekipman	Kurulum Maliyeti	İşletme Maliyeti	Değişim Maliyeti	Faydalı Ömür
FV panel	1500 $/kW (Marchenko ve Solomin, 2017)	Yıllık olarak ilk yatırım maliyetinin %1'i (Kalinci vd., 2015)	%100 (Ozden ve Tari, 2016), (Kalinci vd., 2015), (Marchenko ve Solomin, 2017)	30 yıl
Elektrolizör	2500 $/kW (1.senaryo) 1250 $/kW (2. senaryo) 625 $/kW (3. senaryo)	Yıllık olarak ilk yatırım maliyetinin %5'i (Marchenko ve Solomin, 2017)	%100 (Kalinci vd., 2015)	15 yıl (Kalinci vd., 2015), (A. Yilanci vd., 2009)
Yakıt hücresi	4000 $/kW (Marchenko ve Solomin, 2017)	Yıllık olarak ilk yatırım maliyetinin %2,5'u (Marchenko ve Solomin, 2017)	%100 (Kalinci vd., 2015)	10 yıl (Marchenko ve Solomin, 2017)
Depolama tankı	100 $/$m^3$ (Ozden ve Tari, 2016)	Yıllık olarak ilk yatırım maliyetinin %0,5'i (Ozden ve Tari, 2016)	%100 (Ozden ve Tari, 2016)	25 yıl (Ozden ve Tari, 2016)
Rüzgar türbini	3000 $/kW (Marchenko ve Solomin, 2017)	Yıllık olarak ilk yatırım maliyetinin %2,2'si (Marchenko ve Solomin, 2017)	%80 (Kalinci vd., 2015)	20 yıl
Dizel Jeneratör	550 $/kW (Ozden, 2015)	0,025 $/saat/kW (Lau vd., 2010)	%100	20,000 saat (Rehman ve Al-Hadhrami, 2010)
Dönüştürücü (Konvertör)	1000 $/kW (Kalinci vd., 2015)	Yıllık olarak ilk yatırım maliyetinin %0,5'i (Ozden ve Tari, 2016)	%100 (Kalinci vd., 2015)	20 yıl (Ozden ve Tari, 2016)
Batarya Ünitesi	0,213 $/Wh (Kaabeche ve Ibtiouen, 2014)	Yıllık olarak ilk yatırım maliyetinin %3'ü (Kaabeche ve Ibtiouen, 2014)	%100 (Ramli vd., 2016)	12 yıl (Ramli vd., 2016)

Yıllık yakıt maliyeti, sistemin bir yıl boyunca ihtiyaç duyduğu toplam yakıt miktarının, birim dizel yakıt fiyatıyla çarpılması ile bulunabilir:

$$C_{YM} = E_{yakıt}.K_{yakıt} \tag{3.72}$$

Hurda maliyeti, sistemde kullanılan her bir ekipmanın, proje ömrü bittiğinde sahip olduğu değer şeklinde ifade edilebilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$C_{HM} = C_{KM}.{K\ddot{O}}/_{F\ddot{O}} \tag{3.73}$$

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Önceki bölümlerde detayları verilen hibrit enerji sistemleri için TRNSYS programı kullanılarak modelleme çalışmaları gerçekleştirilerek elde edilen analiz sonuçları bu bölüm kapsamında sunulmuştur. Her sistem için farklı parametreler ele alınarak sistem iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bu kısmında, yenilenebilir enerji kaynaklı ve dizel jeneratör destekli, şebekeden bağımsız hibrit güç üretim sistemi detaylı olarak araştırılmıştır. Hibrit güç üretim sistemi için iki farklı enerji depolama çeşidi alternatifli olarak incelenmiştir, bunlar: hidrojen depolama ve batarya depolamadır. Bir örnek vaka analizi yapılarak farklı iklim koşulları için, sistemlerin performans analizi ve ekonomik fizibilitesi kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Tasarlanan enerji sisteminin 10 kW'lık bir yükü güvenli bir şekilde karşılayabilmesi istenmektedir. Hibrit güç üretim santralinin performansı farklı iklim koşulları için incelenerek, seçilen dört farklı şehrin iklim verileri kullanılarak sistem optimize edilmiştir.

Tasarlanan sistem temel olarak bir FV dizisi, rüzgar türbini, dizel jeneratörü ve invertör-dönüştürücüden oluşmaktadır. Dinamik analizler TRNSYS 18 enerji simülasyon programında gerçekleştirilmiştir. Bu programın kütüphanesinde enerji sistemleri ile ilgili pek çok modül bulunmaktadır. Dinamik simülasyonda zaman adımı 0,05 saat olarak belirlenmiştir.

4.1 Hidrojen Depolamalı Hibrit Enerji Sisteminin Çalışma Prensibi

Hidrojen depolamalı hibrit enerji sistemi temel bileşenlerin yanında, bir alkali elektrolizör, alkali yakıt hücresi, basınçlı hidrojen depolama tankı ve sistem kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Sistem kontrolünü sağlamak için program kütüphanesinden *"Type 105 Mini-grid controller"* modeli seçilmiştir. Güvenlik önemleri nedeniyle genellikle çoğu alkali elektrolizör, güç kapasitesinin yalnızca yaklaşık %20'sine kadar çalışabilir. Bu nedenle, tamamen kapanmayı önlemek için elektrolizör ve yakıt hücresi için bir rölanti akımı (idling current) belirlenmiştir. Yakıt hücresi ve elektrolizör belirlenen maksimum ve minimum (rölanti) güç kapasite aralıklarında çalışmaktadır.

Bunun yanı sıra, elektrolizör ve yakıt hücresi, hidrojen tankı için belirlenen minimum ve maksimum şarj durumu (SOC) sınırlarına göre çalışıp kapanmaktadır. Sistemin enerji kontrol ünitesi, enerji üretiminin yük ihtiyacını karşılayıp karşılayamama durumunu ve hidrojen tankının şarj durumunu dikkate alarak sistemi yönetmektedir.

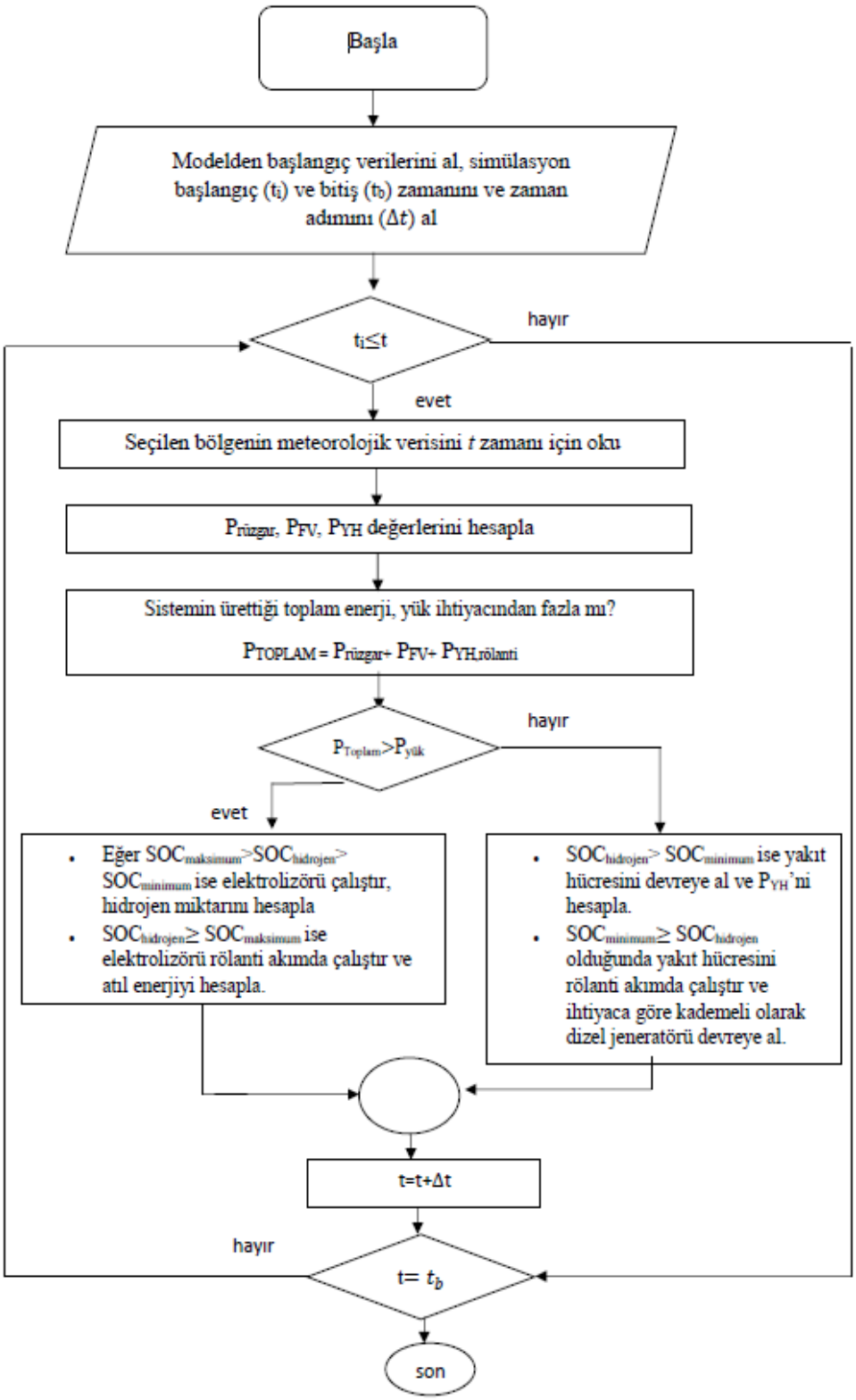
Bu yönetim mekanizmasına göre, eğer rüzgar türbininin ($P_{rüzgar}$), FV dizisinin (P_{FV}), yakıt hücresinin (P_{YH}) ürettiği toplam enerji (P_{toplam}), sistemin enerji ihtiyacı ile elektrolizörün minimum güçte çalışması için gerekli enerjinin toplamından fazla ise elde edilen bu fazladan enerjinin kullanımına depodaki hidrojen durumuna bakılarak karar verilir. Eğer depodaki şarj durumu (SOC) seviyesi, belirlenen maksimum değerin üzerinde ise, daha fazla hidrojen üretilemez ve ekstra enerji kullanılamaz. Eğer üretilen toplam enerji $P_{toplam,}$ elektrik yük ihtiyacı ve elektrolizörün minimum güçte çalışması için gerekli enerjinin toplamından küçük ise, elektrik ihtiyacının kalan kısmını yakıt hücresi sağlar. Ancak, depodaki şarj durumu seviyesi (SOC) minimum seviyenin altında ise, yakıt hücresi rölanti- düşük güç seviyesinde çalışmaya devam eder ve dizel jeneratör devreye girer.

Hidrojen depolamalı sistemin akış şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.2'de ise sistemin şematik gösterimi verilmiştir. Tüm sistem parametreleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur. TRNSYS modelinin görüntüsü Şekil 4.3'de sunulmuştur. Sistemin TRNSYS modeli temel olarak, aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

Hava verisi *(Type 15)*: Bu bileşen, harici bir veri dosyasından, seçilen zaman adımında, istenen bölgenin rüzgar hızı, güneş ışınımı, hava sıcaklığı vb. meteorolojik verilerini okuyarak, bu verileri diğer bileşenlere iletir.

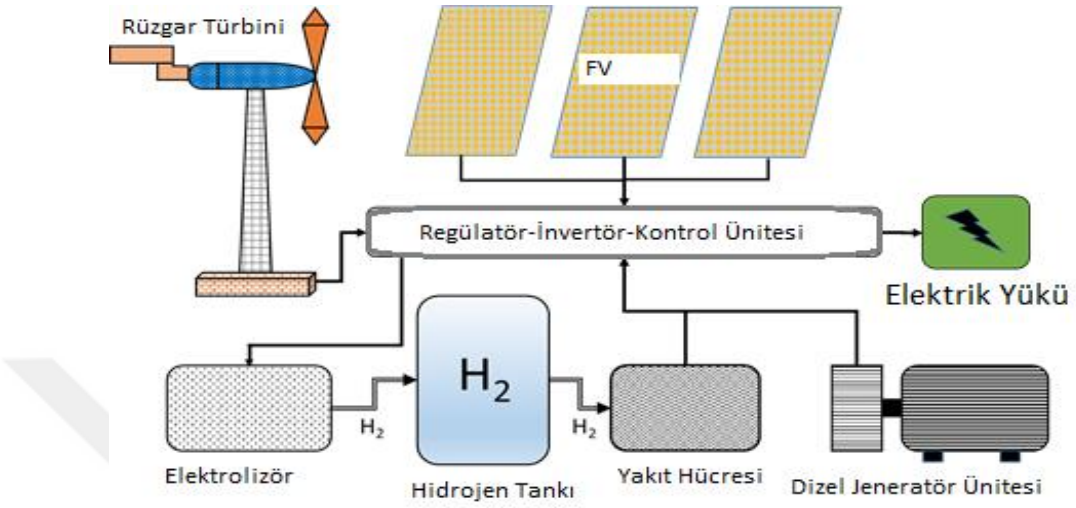
Elektrik yükü *(Type 14)*: Bu bileşen, zamana bağlı olarak tanımlanan fonksiyon değerleri ile istenilen elektrik yükünü karakterize etmek için kullanılmıştır.

Güç üretim sistemleri ve hidrojen döngüsü: FV paneller, rüzgar türbinleri, dizel jeneratör, elektrolizör, yakıt hücresi sistem modelleri, program kütüphanesinden seçilmiştir. Sistem modellerinin input girişleri, elektrik yükü, hava verisi ve kontrolör gibi diğer sistem elemanlarına bağlanmıştır.

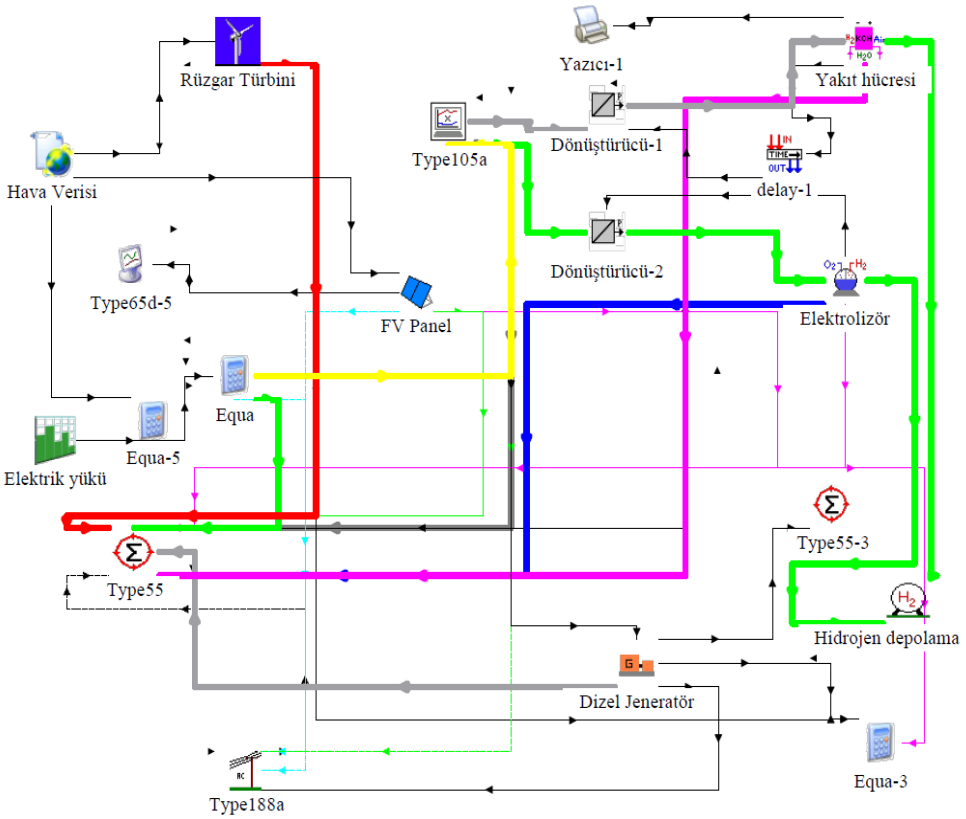


Şekil 4.1. Hidrojen depolamalı sistemin akış diyagramı

Yazıcı, grafik çizici ve integratörler: Simülasyon sonuçlarını görüntülemek ve analiz etmek için integratörler, yazıcılar ve grafik çiziciler (plotter) kullanılmıştır. Birim dönüşümü gibi ara hesaplamaları yapabilmek için ilave denklemler tanımlanmıştır.



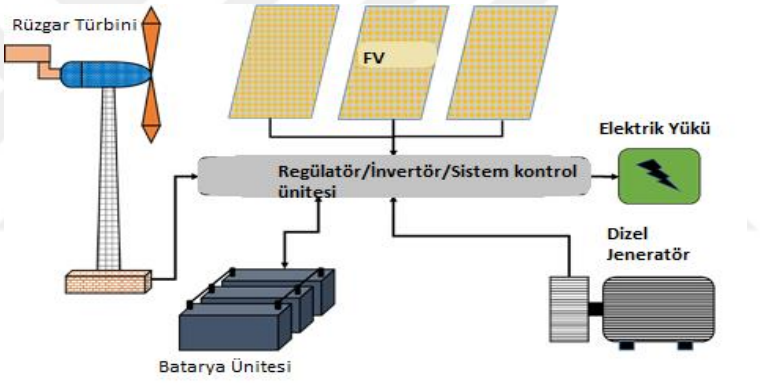
Şekil 4.2. Hidrojen depolamalı hibrit enerji sisteminin şematik gösterimi



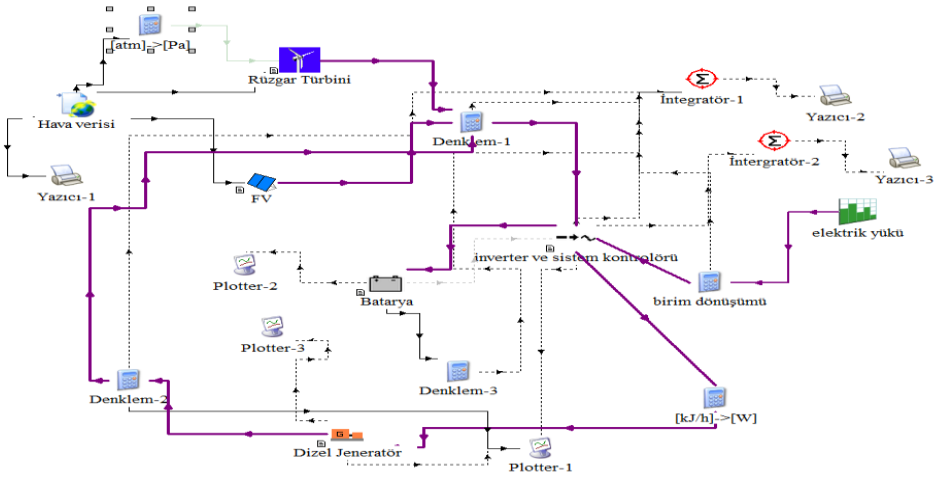
Şekil 4.3. Hidrojen depolamalı hibrit enerji sisteminin TRNSYS modeli görüntüsü

4.2. Batarya Depolamalı Hibrit Enerji Sisteminin Çalışma Prensibi

Bu sistemde de yine FV modüller ve rüzgar türbini, sistemin temel enerji kaynaklarıdır. Eğer rüzgar türbininin ve FV modüllerin ürettiği toplam enerji, yükün elektrik ihtiyacını sağladıktan sonra hala yeterli seviyedeyse, arta kalan bu ekstra enerji ile batarya üniteleri şarj edilir. Bataryanın şarj durumu, üst limite ulaştıktan sonra hala enerji fazlası mevcut ise, bu ekstra enerji kullanılamaz ve şarj durdurulur. Eğer sürdürülebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji, yükün enerji ihtiyacı için yeterli değilse, enerji ihtiyacı batarya deşarj edilerek sağlanır. Minimum şarj durumuna ulaşıldıktan sonra ise, deşarj durdurulur ve arta kalan enerji ihtiyacı dizel jeneratörler devreye alınarak sağlanır. Sistem şeması Şekil 4.4'te sunulmuştur. Batarya depolamalı sistemin TRNSYS şeması Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Batarya depolamalı hibrit enerji sisteminin şeması



Şekil 4.5. Batarya depolamalı sistemin TRNSYS modeli görüntüsü

Çizelge 4.1. Hidrojen depolamalı hibrit enerji sisteminin tasarım parametreleri

Sistem Bileşeni	**Değer**
Rüzgar Türbini (Type 90)	
Kapasite	5 kW
Kullanılan türbin sayısı	0,1,2,3,4
FV paneller (Type 103b)	
Maksimum Güç Noktasındaki Voltaj	17 V
Maksimum Güç Noktasındaki Akım	5,9 Amper
Eğim açısı	35˚
Toplam Kapasite	15,20,25,30,35,40 kW
DEGS (Type 120a)	
Devredeki minimum dizel jeneratör sayısı	0
Devredeki maksimum dizel jeneratör sayısı	15
Nominal Kapasite	1 kW
Alkali Yakıt Hücresi (Type 173a)	
Yakıt hücresi minimum kapasite	1,5 kW
Yakıt hücresi nominal kapasite	6 kW
Alkali Elektrolizör (Type 160a)	
Nominal güç (Minimum güç, nominal gücün %25'idir.)	18 kW 20 kW 22 kW
Kontrol Ünitesi (Type 105a)	
Hidrojen depolama için üst limit (elektrolizör için)	90%
Hidrojen depolama için alt limit (elektrolizör için)	85%
Hidrojen depolama için üst limit (yakıt hücresi için)	20%
Hidrojen depolama için alt limit (yakıt hücresi için)	15%
Sıkıştırılmış gaz depolama tankı (Type 164)	
Tank hacmi	300 m^3
Maksimum basınç	20 bar
Başlangıç basınç seviyesi (gaz doluluk oranı)	0,5
Gaz sıcaklığı	20°C

Batarya depolamalı sistem için seçilen tüm sistem parametreleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Batarya ünitesini kontrol etmek için oransal şarj durumunun *(FSOC)* üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Bu kontrol algoritmasına göre eğer oransal şarj durumu %95'e çıkarsa, sistem bataryayı şarj etmeyi durdurur ve üretilen fazladan enerji kullanılamaz. Benzer şekilde, deşarj esnasında oransal şarj durumu %10'a indiğinde sistem bataryayı deşarj etmeyi durdurur. Sistemin deşarja tekrar başlayabilmesi için bataryanın öncelikle %30 oransal şarj durumuna kadar şarj edilmesi gerekir. Bu oran sağlandıktan sonra, gerektiğinde tekrar deşarja başlanabilir.

Çizelge 4.2. Batarya depolamalı hibrit enerji sisteminin tasarım parametreleri

Sistem Bileşeni	Parametre	Değer
Batarya	Şarj verimi	90%
	Toplam kapasite	-3 saatlik enerji otonomisi (17,25 kWh) -6 saatlik enerji otonomisi (34,5 kWh) -9 saatlik enerji otonomisi (52,8 kWh) -12 saatlik enerji otonomisi (69,0 kWh)
Kontrol Ünitesi	Oransal şarj durumunun (FSOC) üst limiti	0,95
	Oransal şarj durumunun (FSOC) alt limiti	0,10
	Şarj-Deşarj Limiti	0,30

4.3 İklimsel Veriler

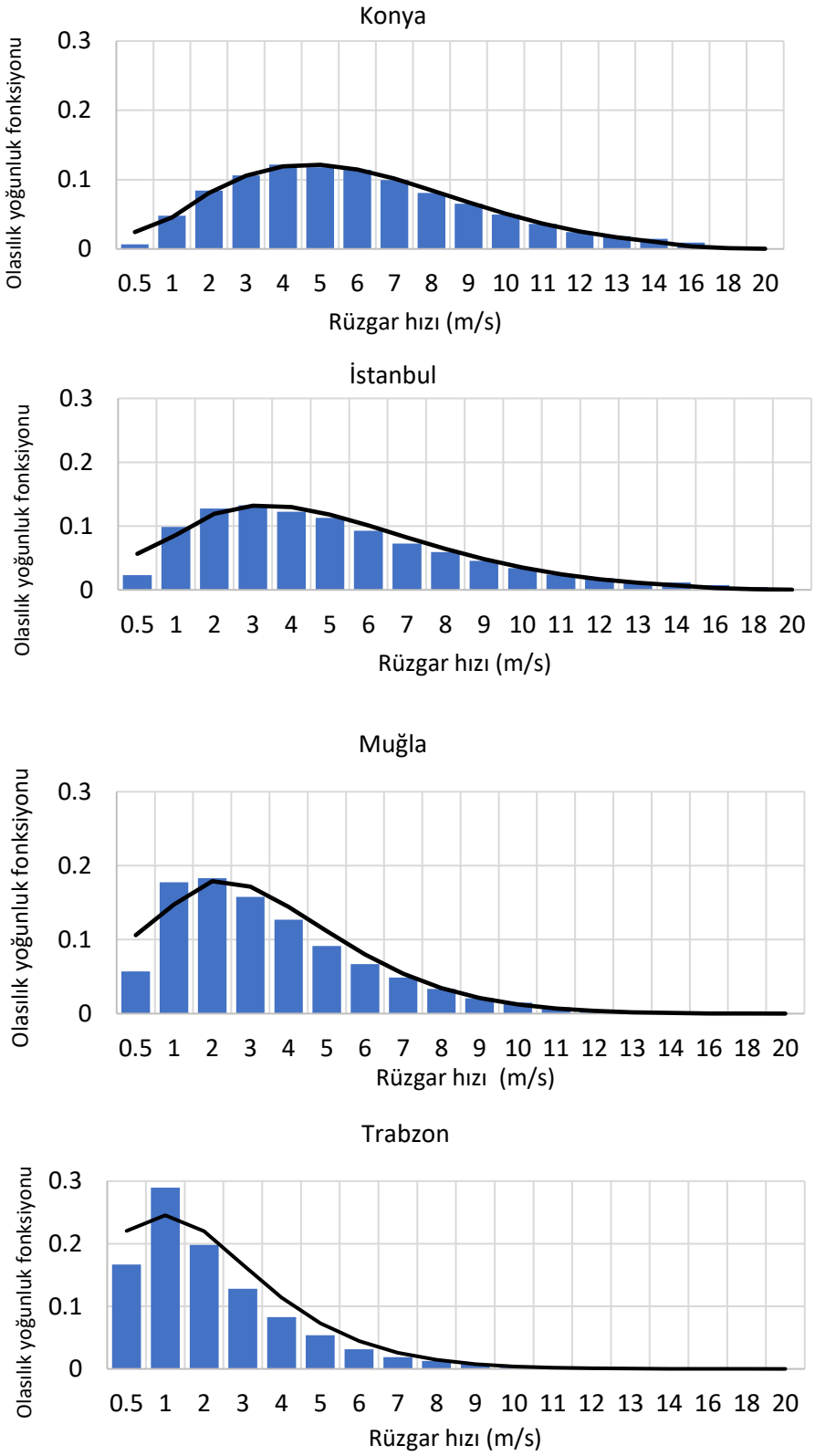
Sürdürülebilir enerji kaynakları ile çalışan sistemlerin tasarımında başlangıç noktası sistemlerin kullanılacağı yerin seçimidir. Sistemin kullanılacağı yerin iklim koşulları, rüzgar ve güneş potansiyeli gibi etkenler direk olarak hibrit sistemin performansını etkiler. 36° ve 42° enlemleri arasında bulunan ülkemiz güneş enerjisi bakımından oldukça

avantajlı bir konumdadır. Sahip olduğu bu potansiyelin, ısıtma, soğutma ve elektrik üretiminde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için sürdürülebilir kaynaklı sistemlerin yaygınlaştırılması kaçınılmazdır. Vaka analizinde, farklı iklim şartlarına sahip dört şehir seçilmiştir. Bu şehirler: Muğla, Konya, Trabzon ve İstanbul'dur. Konya, İç Anadolu bölgesinde bulunan, yüksek rakımlı bir ilimizdir. Muğla, tipik Akdeniz iklimine sahip bir sahil kentidir. İstanbul ise Marmara Bölgesi'nde bulunan ve nüfusu en yüksek ilimizdir. Trabzon ise Karadeniz kıyısında bulunan bir ilimizdir. Seçilen şehirlerin coğrafi bilgileri Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Vaka analizi için seçilen şehirlerin coğrafi bilgileri

Şehir	Enlem	Boylam	Rakım
Mugla	37:12N	38:22E	660 m
Konya	37:52 N	32:31E	1016 m
Istanbul	41:01N	28:58E	40 m
Trabzon	41:01N	39:43 E	37 m

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu, bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için sıklıkla kullanılır. Kullanılacak rüzgar türbini modeli ve kapasitesi seçilirken bu tarz olasılık dağılımları çok faydalı olur. Bu çalışmada, TRNSYS program kütüphanesinde mevcut olan Meteonorm veritabanından seçilen illerin "*Typical meteorological year*" *(TMY)* dosyaları kullanılmıştır. Her ilin saatlik rüzgar hızları kullanılarak oluşturulan Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ve rüzgar hızı histogramı Şekil 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.4'de her il için, yıl boyunca 10 m ve 24 m yüksekliklerde ölçülen maksimum, ortalama hız ve hızların standart sapması sunulmuştur. Standart sapma, rüzgar verilerinin incelenmesinde oldukça önemli bir kavramdır. Standart sapmanın küçük olması demek, o bölgedeki rüzgar verilerinin düzenli olması anlamına gelir (Kurban vd., 2007).



Şekil 4.6. Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ve rüzgar hızı histogramları

Çizelge 4.4'de görüldüğü üzere, seçilen iller içerisinden en yüksek ortalama rüzgar hızına sahip olan il Konya'dır ve Konya'yı sırasıyla İstanbul ve Muğla takip etmektedir. En düşük ortalama hıza sahip il ise Trabzon'dur. Çizelge 4.5'te, her il için hesaplanan *k* ve *c* parametreleri ile ortalama rüzgar güç yoğunlukları (RGY) sunulmuştur. Burada da görüleceği üzere, Konya ili rüzgar enerjisi açısından en avantajlı ildir ve 10 m'de ölçülen rüzgar hızları için ortalama rüzgar güç yoğunluğu 107,65 W/m^2'dir. Trabzon ise rüzgar enerjisi potansiyeli en düşük olan ildir ve yıllık ortalama rüzgar güç yoğunluğu 14,92 W/m^2'dir.

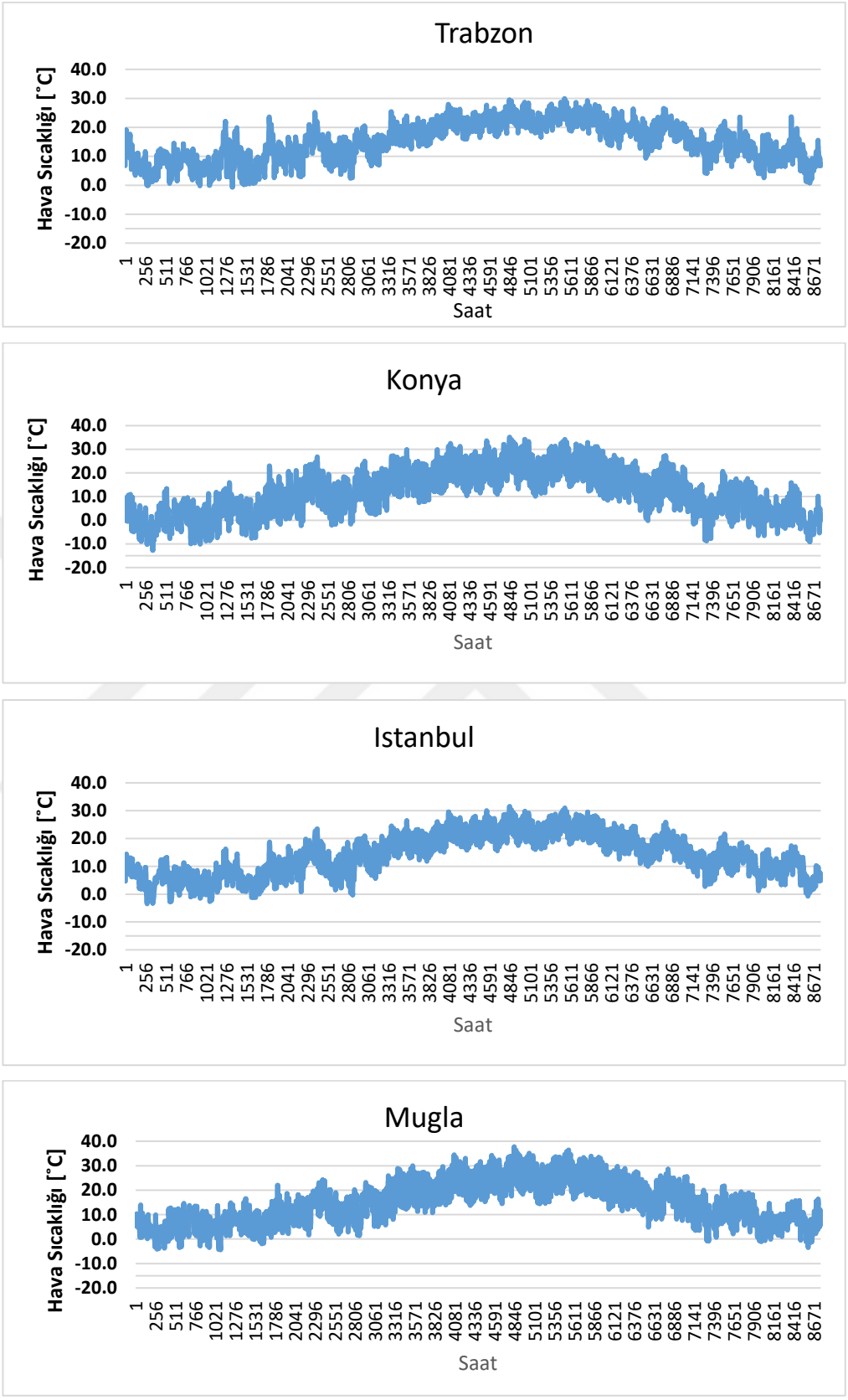
Çizelge 4.4. Seçilen şehirlerin bir tipik iklim yılı (TMY) boyunca maksimum, ortalama rüzgar hızları ve rüzgar hızlarının standart sapması

Şehir	10 m yükseklik			24 m yükseklik		
	Maksimum hız (m/s)	Ortalama hız (m/s)	Standart Sapma	Maksimum hız (m/s)	Ortalama hız (m/s)	Standart Sapma
Mugla	16,03	3,18	2,35	18,2	3,60	2,67
Konya	18,80	5,35	2,95	21,3	6,07	3,34
Istanbul	19,60	4,52	3,03	22,2	5,12	3,43
Trabzon	15,0	2,3	2,1	16,8	2,6	2,4

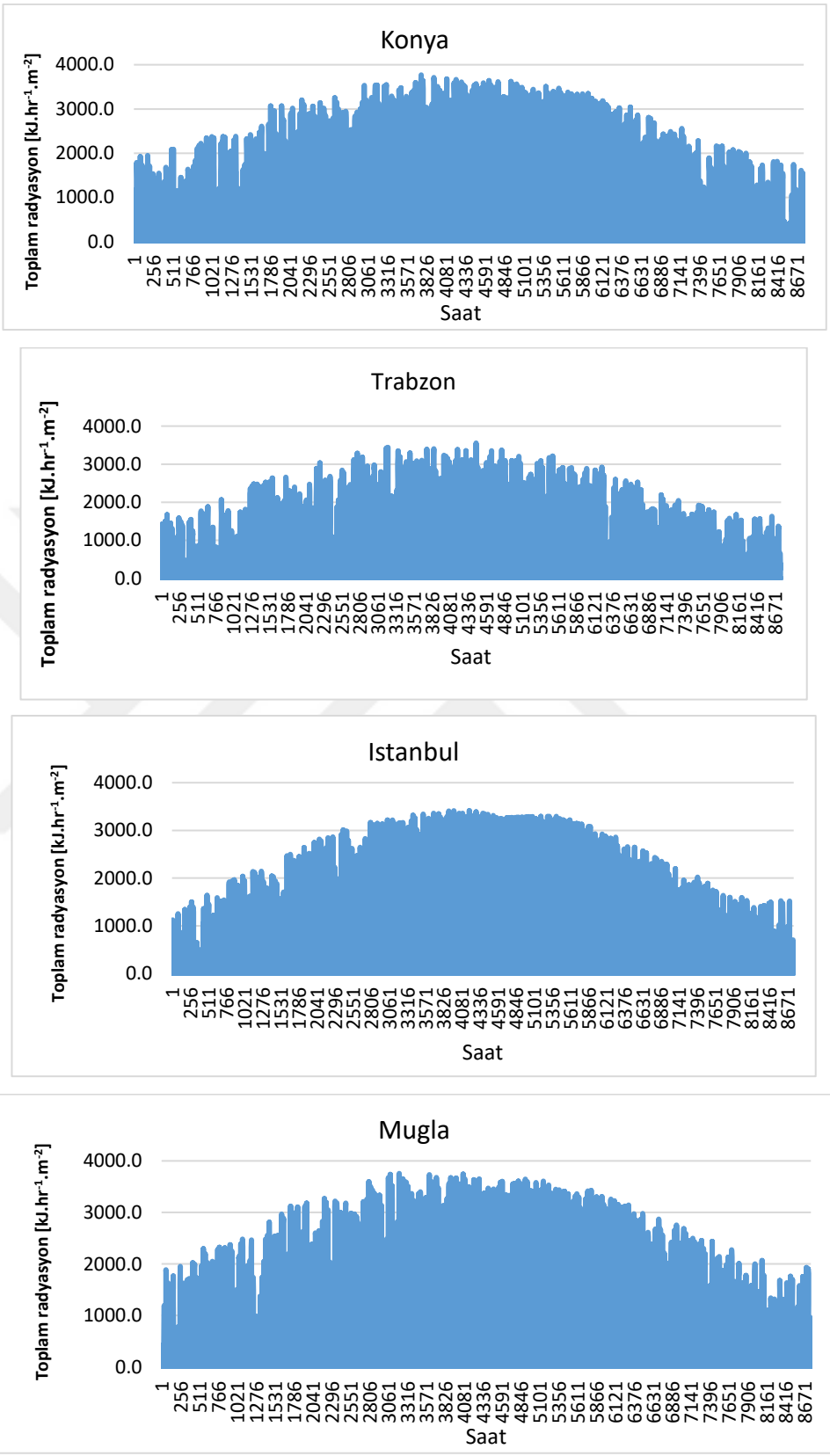
Çizelge 4.5. Seçilen şehirlerin tipik iklim yılı (TMY) rüzgar hız verileri için Weibull dağılımı parametreleri ve rüzgar gücü yoğunluğu (RGY)

Şehir	10 m yükseklik				24 m yükseklik			
	k	c(m/s)	R	RGY (W/m^2)	k	c(m/s)	R	RGY (W/m^2)
Mugla	1,59	3,77	0,97	29,49	1,57	4,20	0,97	41,00
Konya	1,94	6,06	0,99	107,65	1,93	6,88	0,99	157,15
Istanbul	1,67	5,16	0,98	75,32	1,64	5,81	0,98	107,90
Trabzon	1,35	2,98	0,97	14,92	1,35	3,28	0,97	19,82

Şekil 4.7'de seçilen illerin hava sıcaklığının yıl boyunca saatlik değişimleri verilmiştir. Şekil 4.8'de ise, seçilen illerin yıl boyunca saatlik toplam, yatay yüzeye gelen güneş radyasyonları verilmiştir.



Şekil 4.7. Vaka analizi için seçilen şehirlerin bir yıl boyunca saatlik hava sıcaklıkları

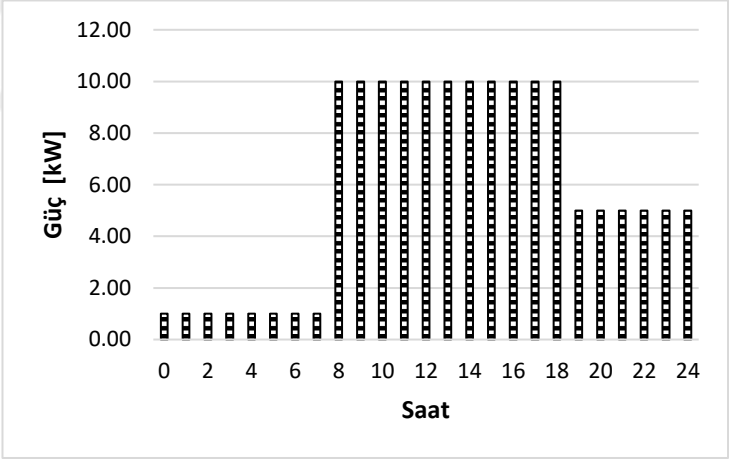


Şekil 4.8. Vaka analizi için seçilen şehirlerin bir yıl boyunca saatlik toplam, yatay yüzeye gelen güneş radyasyonları

Seçilen iller arasında Muğla en yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olup, yatay yüzeye gelen yıllık toplam güneş radyasyonu 1793 kWh/ m^2'dir. Konya ili, 1755 kWh/m^2'lik yıllık toplam ile Muğla'dan sonraki en yüksek güneş radyasyonuna sahiptir. İstanbul ili 1630 kWh/m^2 yıllık toplam güneş radyasyonuna sahiptir. Trabzon ili ise 1330 kWh/m^2 ile seçilen iller arasındaki en düşük güneş enerjisi potansiyeline sahiptir.

4.4 Elektrik Yükü

Elektrik yükünün tahmini sistem bileşenlerinin kapasitelerinin tayini için oldukça önemlidir. Vaka analizi için seçilen binanın günlük yük profili Şekil 4.9'da verilmiştir. Gün boyunca sabah 08:00 ile 18:00 arasında enerji tüketimi pik yükte olup 10 kW'tır. 18:00 ile 24:00 arasında enerji tüketimi 5 kW'a düşmektedir. 24:00 ile 08:00 arasında ise yalnızca aydınlatma ve elektronik cihazların stand-by modunda çalışabilmeleri için cüzi elektrik bir tüketimi söz konusudur.



Şekil 4.9. Günlük elektrik yük profili

4.5 Değerlendirme Kriteri

Çalışmanın bu kısmında, karar verilen yük profilini güvenle karşılayabilecek, seçilen her bir iklim bölgesi için enerji verimliliği açısından ve ekonomik açıdan en avantajlı hibrit enerji sistem konfigürasyonu belirlenecektir. Beş farklı alternatif senaryo incelenecektir, bunlar sırasıyla:

(1) FV/YH/ Dizel Jeneratör

(2) FV/Rüzgar Türbini/ YH /Dizel Jeneratör

(3) FV/Batarya/ Dizel Jeneratör

(4) FV/Rüzgar Türbini/ Batarya /Dizel Jeneratör

(5) Yalnızca Dizel Jeneratör

Sistem değerlendirme kriterleri olarak:

- sürdürülebilir enerji oranı (%),
- sistem tarafından kullanılamayan atıl enerji (kWh/yıl),
- sistemden salınan yıllık CO_2 emisyonu
- seviyelendirilmiş enerji maliyeti ($/kWh)

kriterleri belirlenmiştir. Sistemin ana elemanlarının boyutlandırılması için Çizelge 4.6'da verilen çeşitli kapasite aralıkları çalışılmıştır.

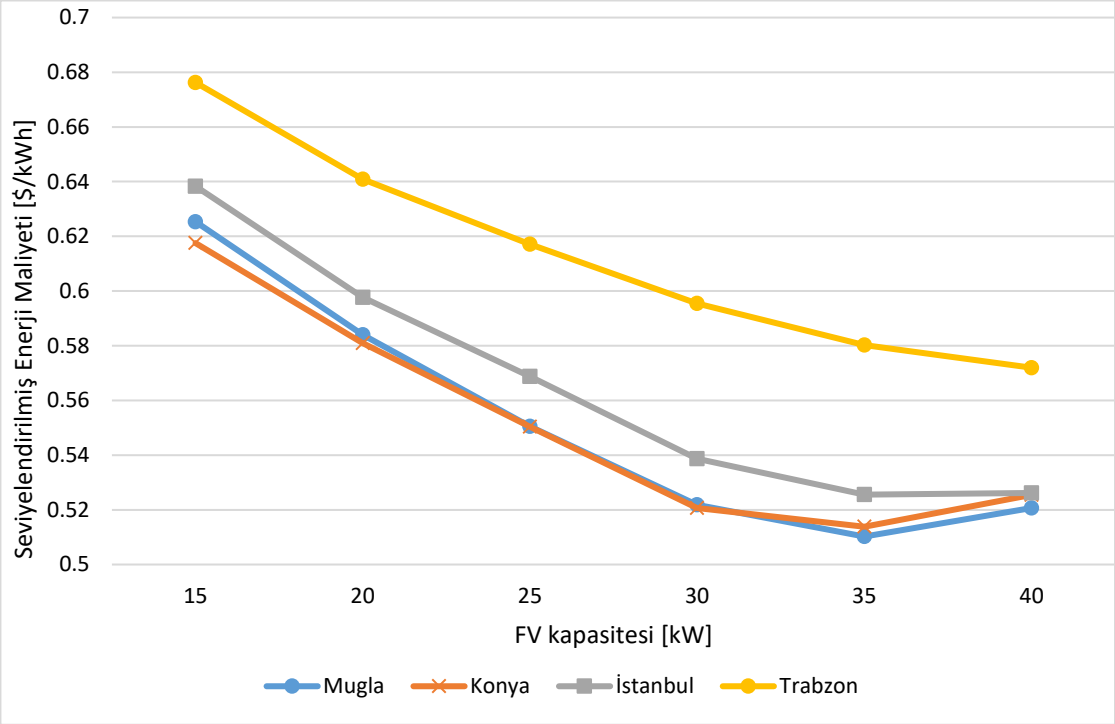
Çizelge 4.6. Hidrojen depolamalı sistem için incelenecek olan sistem bileşenlerinin kapasite aralıkları

Sistem Bileşeni	**Kapasite veya ünite sayısı**
FV dizisi	15-20-25-30-35-40 kW
Rüzgar türbini	0-1-2-3-4
Elektrolizör	Nominal Güç:18-20-22 kW Minimum Güç: 4.5-5-5.5 kW

4.6 Birinci Senaryo: FV/YH/ Dizel Jeneratör Konfigürasyonu

İlk durumda, hibrit enerji sistemine enerji iki ana kaynaktan sağlanmaktadır: FV dizisi ve dizel jeneratör. Bu senaryoda, eğer elektrik yükü, FV panellerinin ürettiği enerjiden daha düşük ise, üretilen fazladan enerji hidrojen depolama sisteminde depolanmaktadır. Depolanan elektrik enerjisine ihtiyaç duyulduğunda, yakıt hücresi devreye girerek sisteme enerji sağlamaktadır. Ancak yakıt hücresinin kullanabileceği yeteri kadar hidrojen depolanmamışsa, bu durumda dizel jeneratör, sisteme ihtiyaç duyulan enerjiyi sağlamaktadır.

Ülkemiz güneş potansiyeli bakımından avantajlı bir konumdadır. Ülkemizdeki günlük ortalama güneşlenme süresi 7,2 saat iken, günlük ortalama radyasyon 3,6 kWh'tir (Kaya vd., 2017). Çalışmanın bu kısmında yakıt hücresi, dizel jeneratör ve elektrolizör kapasiteleri sabit tutularak, yalnızca FV kapasitesi 15 kW ile 40 kW arasında değiştirilmiş ve FV kapasitesinin, sistemin seviyelendirilmiş enerji maliyetine (LCOE) ve yıllık dizel yakıt tüketimine olan etkisi incelenmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere FV kapasitesini arttırmak seviyelendirilmiş enerji maliyetini ciddi oranda düşürmektedir. En yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olan Muğla, özellikle büyük FV kapasitelerinde en düşük enerji maliyetine sahiptir. Seçilen iller arasındaki en düşük güneş enerjisi potansiyeline sahip olan Trabzon ilinde bile FV kapasitesini arttırmak seviyelendirilmiş enerji maliyetini büyük ölçüde düşürmektedir.

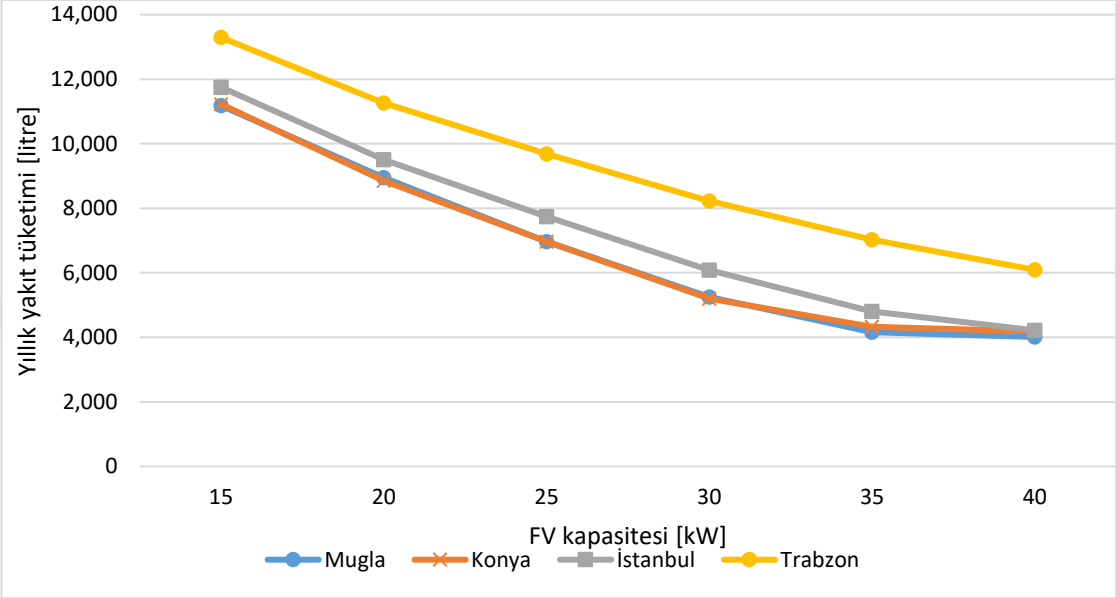


Şekil 4.10. Birinci senaryo için FV dizisi kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyetine etkisi

(Sistem konfigürasyonu: rüzgar türbini yok, 6 kW yakıt hücresi, 20 kW elektrolizör)

Şekil 4.11'de ise FV dizisi kapasitesinin yıllık dizel yakıt tüketimine olan etkisi sunulmuştur. Seçilen iller içerisinde en düşük yıllık yakıt tüketimine sahip olan il

Muğla'dır. Muğla ilinde, 15 kW FV dizisi kullanılan hibrit sistemin yıllık dizel yakıt tüketimi 11 177 litredir. FV kapasitesini 15 kW'tan 40 kW'a çıkarmak, yıllık dizel yakıt tüketimini Muğla ve İstanbul'da yaklaşık olarak %64, Konya'da %62 ve Trabzon'da %54 azaltmaktadır.



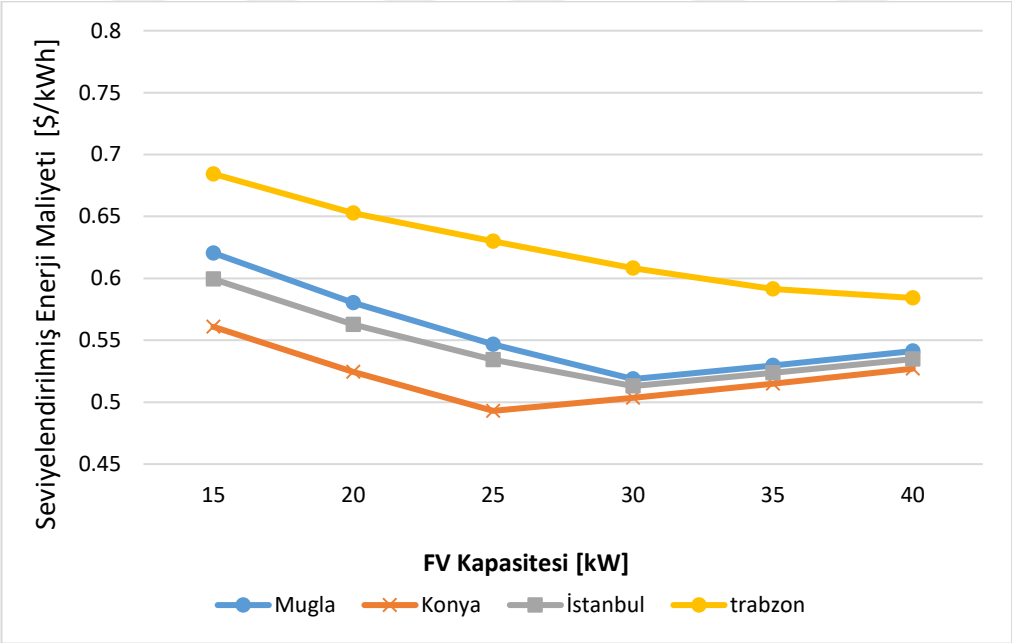
Şekil 4.11. FV dizisi kapasitesinin yakıt tüketimine olan etkisi
(Sistem konfigürasyonu: rüzgar türbini yok, 6 kW yakıt hücresi, 20 kW elektrolizör)

4.7 İkinci Senaryo: FV/Rüzgar Türbini/ YH /Dizel Jeneratör

Bu bölümde incelenen sistem dört farklı enerji kaynağından beslenmektedir. FV dizisi ve rüzgar türbini sistemin temel enerji kaynaklarıdır. Dizel jeneratör ve yakıt hücresi ise sistemin yardımcı enerji kaynaklarıdır. İlk olarak 5 kW kapasitesinde tek bir rüzgar türbini kullanılıp, elektrolizör ile yakıt hücresi kapasiteleri sabit tutularak FV kapasitesi parametrik olarak incelenmiştir. Şekil 4.12, FV kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisini göstermektedir. Sonuçlardan görüleceği üzere, sisteme rüzgar türbini ilave edildiğinde, Trabzon'daki enerji maliyeti ile seçilen diğer şehirlerdeki seviyelendirilmiş enerji maliyetleri arasındaki fark büyük ölçüde artmaktadır. FV kapasitesi 15 kW'tan 40 kW'a çıkarıldığında Trabzon'daki seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0,684 $/kWh'tan 0,584 $/kWh'a düşmektedir. Ancak rüzgar türbini

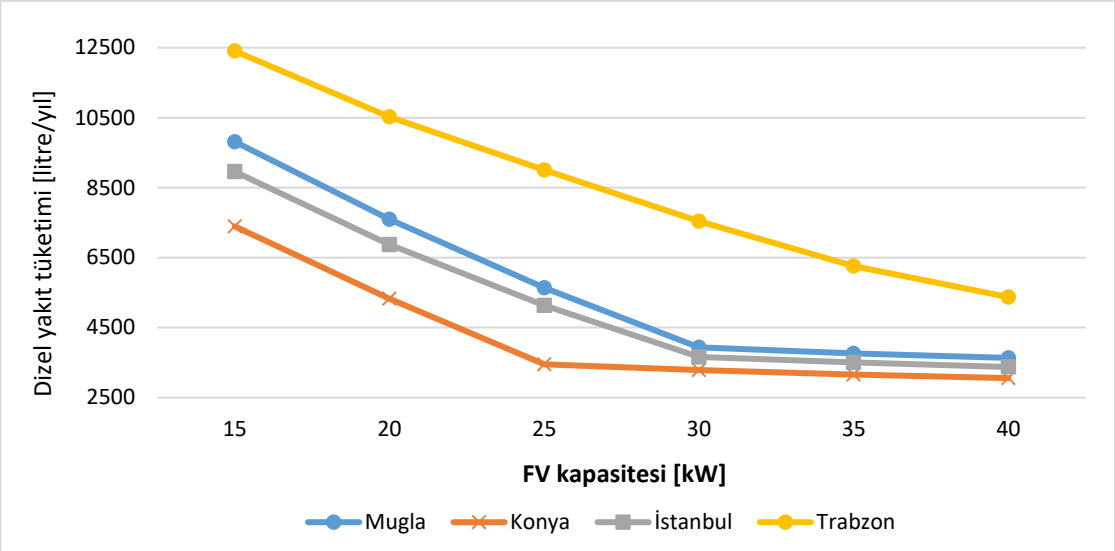
kullanılmadığında sistemin seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0,676 ile 0,571 $/kWh aralığındadır.

Yüksek güneş ve rüzgar enerjisi potansiyeli sebebiyle seçilen bölgeler arasında en düşük seviyelendirilmiş enerji maliyetine sahip olan il Konya'dır. Şekil 4.10 ve 4.12'de verilen sonuçlar kıyaslandığında görüldüğü üzere, hibrit enerji sistemine rüzgar türbini ilave etmek, Konya ilinde seviyelendirilmiş enerji maliyetini azaltmaktadır. Konya ili için, 25 kW FV kapasitesine sahip, rüzgar türbinli ve türbinsiz sistemler kıyaslandığında, türbinli sistemin seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0,493 $/kWh iken, türbinsiz sistemin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyeti 0,550 $/kWh'tır. Şekil 4.13'de, artan FV kapasitesine karşılık sistemin yıllık yakıt tüketimi verilmiştir. Sonuçlardan görülebileceği gibi, en düşük dizel yakıt tüketimine sahip olan il Konya'dır. Trabzon ise en yüksek yıllık dizel yakıt tüketimine sahiptir. Tüm iller göz önüne alındığında, FV modül kapasitesini 15 kW'tan 40 kW'a çıkarmak, yıllık dizel yakıt tüketimini %55 ile %60 arasında azaltmaktadır.



Şekil 4.12. İkinci Senaryo için FV dizisi kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisi

(Sistem konfigürasyonu: 5 kW rüzgar türbini, 6 kW yakıt hücresi, 20 kW elektrolizör)

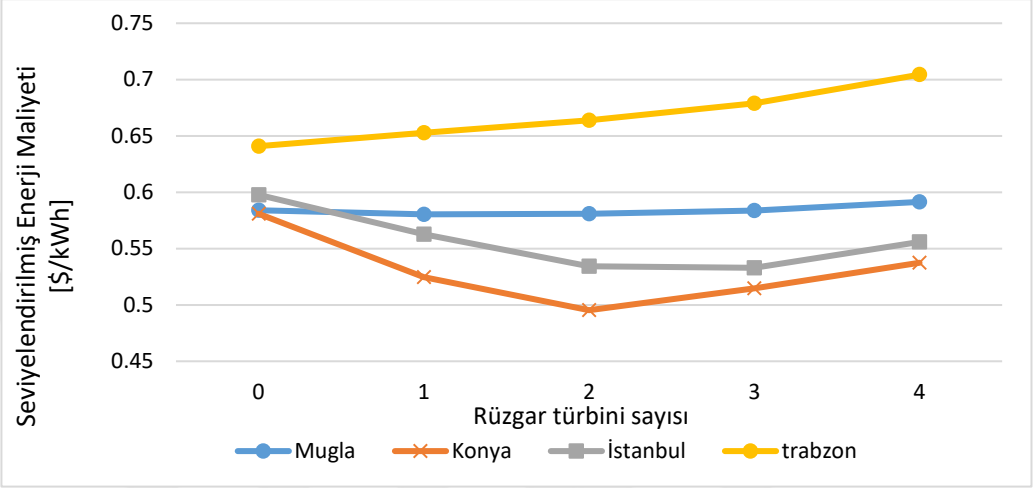


Şekil 4.13. İkinci senaryo için FV dizisi kapasitesinin yakıt tüketimine olan etkisi (Sistem konfigürasyonu: 5 kW rüzgar türbini, 6 kW yakıt hücresi, 20 kW elektrolizör)

Kurulu rüzgar türbini gücünün seviyelendirilmiş enerji maliyeti ve yıllık yakıt tüketimine olan etkisini incelemek için kurulu rüzgar türbini sayısı (her bir türbin kapasitesi eşdeğer ve 5 kW olacak şekilde) 0 ile 4 arasında değiştirilmiştir. Şekil 4.14'de kurulu türbin sayısının, seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisi gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, Trabzon ve Muğla illerinde düşük rüzgar enerjisi potansiyeli sebebiyle türbin kullanılmayan hibrit enerji sisteminin maliyeti, türbin kullanılan sisteme göre daha düşüktür. Özellikle Trabzon'da, türbin ilavesi, seviyelendirilmiş enerji maliyetini çok büyük ölçüde arttırmaktadır. Konya ve İstanbul'da ise iki adet 5 kW'lık türbin kullanılan sistem konfigürasyonunun seviyelendirilmiş enerji maliyeti en düşüktür. Şekil 4.15'de kurulu türbin gücünün yıllık dizel yakıt tüketimine olan etkisi sunulmuştur. Sonuçlara bakıldığında, türbinsiz sistem konfigürasyonundan, iki adet rüzgar türbinli konfigürasyona geçildiğinde, yıllık yakıt tüketimi Konya'da % 66, İstanbul'da % 52, Muğla'da % 28 ve Trabzon'da ise % 13 azalmaktadır.

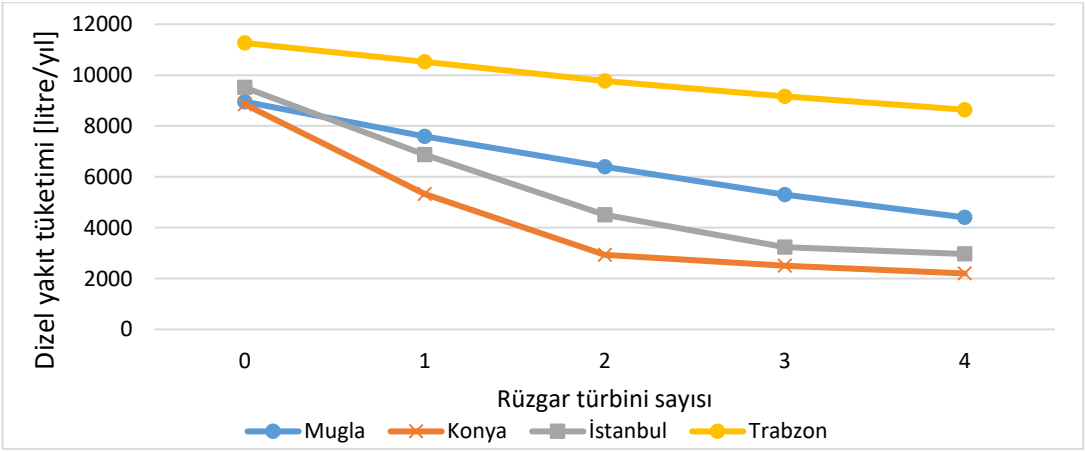
Tüm FV/YH/Dizel ve FV/Rüzgar Türbini/YH/Dizel alternatifleri incelendiğinde, Konya ili için en düşük seviyelendirilmiş enerji maliyeti olan 0,493 $/kWh'i veren sistem konfigürasyonu 5 kW rüzgar türbini, 25 kW FV, 15 kW dizel jeneratör, 6 kW yakıt hücresinden oluşmaktadır. İstanbul'da ise, 5 kW rüzgar türbini, 30 kW FV, 15 kW dizel

jeneratör, 6 kW yakıt hücresi en düşük seviyelendirilmiş enerji maliyetini (0,513 $/kWh) vermiştir. Muğla'da, 35 kW FV, 15 kW dizel jeneratör, 6 kW yakıt hücresinden oluşan sistem, en düşük seviyelendirilmiş enerji maliyetini (0,510 $/kWh) vermiştir. Trabzon'da ise 40 kW FV, 15 kW dizel jeneratör, 6 kW yakıt hücresinden oluşan sistem en düşük seviyelendirilmiş enerji maliyeti olan 0,572 $/kWh değerini vermiştir.



Şekil 4.14. Rüzgar türbini kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisi

(Sistem konfigürasyonu: her bir rüzgar türbini 5 kW, 20 kW FV, 6 kW yakıt hücresi, 20 kW elektrolizör)



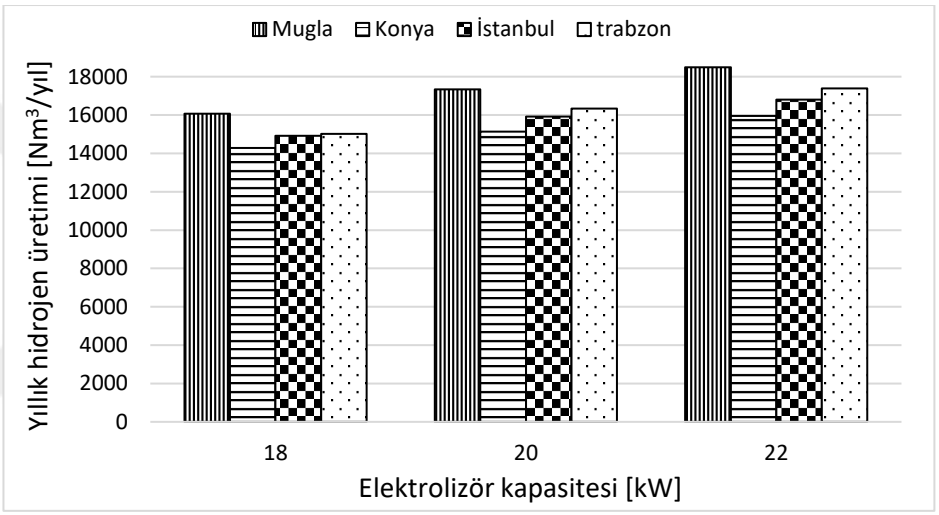
Şekil 4.15. Rüzgar türbini kapasitesinin yıllık yakıt tüketimine olan etkisi

(Sistem konfigürasyonu: her bir rüzgar türbini 5 kW, 20 kW FV, 6 kW yakıt hücresi, 20 kW elektrolizör)

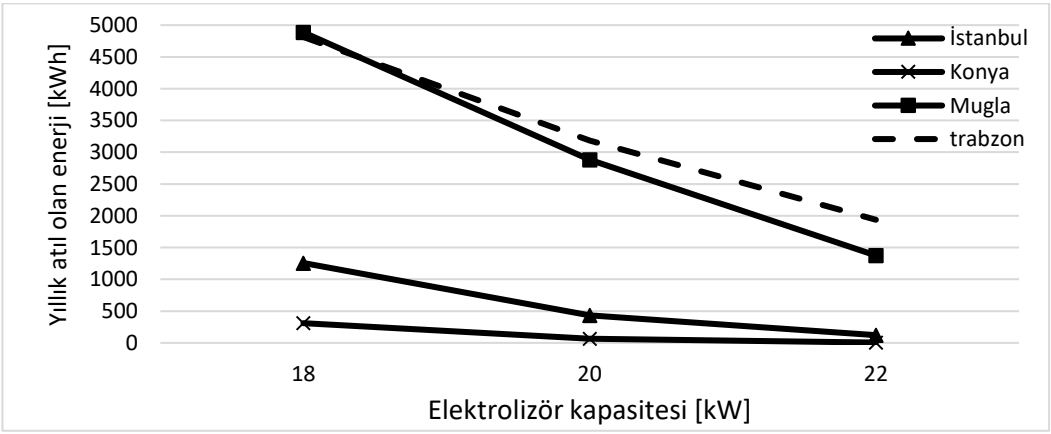
Çalışmanın bu kısmında, elektrolizör kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyetine, sistemin yıllık hidrojen üretimine ve yıllık atıl olan enerjiye olan etkisi araştırılmıştır. Sistemden atılan enerji ne kadar az ise hibrit sistem, enerji verimliliği açısından o kadar avantajlıdır. Elektrolizörler çok yüksek ilk yatırım maliyetlerine ve kısa kullanım ömrüne sahiptirler. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte bu cihazların ilk yatırım maliyetlerinin azalması ve kullanım ömürlerinin uzaması beklenmektedir.

Çalışmanın bu kısmında, elektrolizör kapasitesi 18 kW ile 22 kW arasında değiştirilmiş ve sistem tarafından kullanılamayan yıllık atıl enerji miktarı ve yıllık üretilen hidrojen miktarı incelenmiştir. Her il için önerilen sistem konfigürasyonu kullanılmıştır. Şekil 4.16'da yıllık üretilen hidrojen miktarı sunulmuştur. Şekil 4.17'de görüldüğü üzere, tüm illerde elektrolizör kapasitesi arttıkça sistem tarafından kullanılmayıp atılan enerji miktarı azalmaktadır. Ayrıca, sonuçlardan, birden fazla enerji kaynağından sisteme enerji sağlamanın atıl enerjiyi azalttığı görülebilir. Konya ve İstanbul'da FV dizisi ve rüzgar türbini sistemin birincil enerji sağlayıcıları iken, Trabzon ve Muğla'da FV dizisi sistemin temel enerji kaynağıdır. Yakıt hücresi ve dizel jeneratör ise ikincil enerji kaynaklarıdır. Enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi, enerji ihtiyacının daha verimli bir şekilde tedarik edilmesine yardımcı olur; bu nedenle sistem ürettiği temiz enerjiyi boşa harcamaz. Elektrolizör kapasitesi arttırıldıkça hidrojen üretimi artmaktadır. 22 kW kapasiteli elektrolizörlü sistemlerin yıllık hidrojen üretimleri 16 000 ile 19 000 Nm^3/yıl arasında değişmektedir. Elektrolizör kapasitesinin arttırılması, hidrojen üretimini arttırırken, yıllık atıl enerjiyi azaltır. Ancak elektrolizörlerin ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olduğu için minimum enerji maliyetine göre optimum kapasite seçiminin elektrolizöre uygulanamayacağı gözlenmiştir, çünkü kapasite artışı her zaman enerji üretim maliyetini arttırmaktadır. Şekil 4.18'de elektrolizör kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisi sunulmuştur. Sonuçlardan görüleceği üzere, elektrolizör kapasitesini arttırmak, her ne kadar hidrojen üretimini arttırsa da, seviyelendirilmiş enerji maliyetini yükseltmektedir. Yapılan ekonomik analizlerde alkali elektrolizörün ilk yatırım maliyeti 2500 $/kW olarak alınmıştır. Ancak yakın gelecekte, gelişen teknoloji ve kullanım yaygınlığı ile birlikte ilk yatırım maliyetlerinde azalma beklenmektedir. Bu durum çeşitli bilimsel çalışmalarda öngörülmüştür (Buttler ve Spliethoff, 2018; Ferrero vd., 2016; Proost, 2019). Bu bağlamda, elektrolizörün ilk yatırım maliyetinin, seviyelendirilmiş

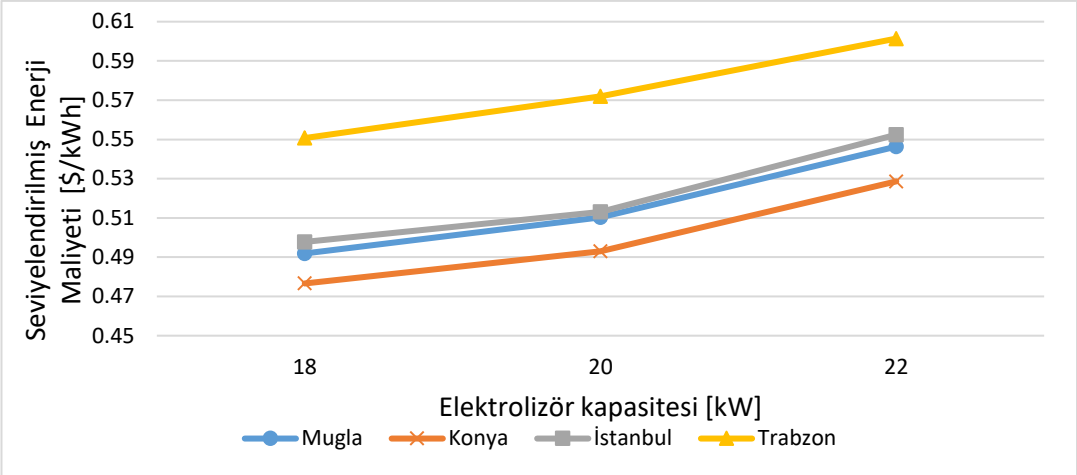
enerji maliyetine olan etkisini incelemek ve hidrojen depolamalı sistemlerin gelecekteki ekonomik fizibilitesini öngörmek amacıyla üç farklı senaryo oluşturulmuştur. Elektrolizörün yakın gelecekteki ekonomik fizibilitesini incelemek için elektrolizörün ilk yatırım maliyeti 1250 $/kW alınarak 2. Senaryo oluşturulmuştur. Elektrolizörün daha uzun vadedeki ekonomik fizibilitesini incelemek için ise elektrolizörün ilk yatırım maliyeti 625 $/kW alınarak 3. Senaryo oluşturulmuştur. Ele alınan üç senaryonun seviyelendirilmiş enerji maliyeti Çizelge 4.7'de verilmiştir. Sonuçlardan görülebileceği gibi 3. Senaryodaki sistemlerin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetleri temel senaryoya göre yaklaşık olarak % 22 daha düşüktür.



Şekil 4.16. Elektrolizör kapasitesindeki değişimin yıllık hidrojen üretimine olan etkisi



Şekil 4.17. Elektrolizör kapasitesindeki değişimin yıllık atıl olan enerjiye olan etkisi



Şekil 4.18. Elektrolizör kapasitesindeki değişimin seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisi

Çizelge 4.7. Her il için önerilen hibrit enerji sisteminin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetinin elektrolizör ilk yatırım maliyetine göre değişimi

	Alkali elektrolizör ilk yatırım maliyeti		
	2500 $/kW (Temel senaryo)	1250 $/kW (2. senaryo)	625 $/kW (3. senaryo)
LCOE (Mugla)	0,510	0,438	0,401
LCOE (Konya)	0,493	0,420	0,384
LCOE (İstanbul)	0,513	0,440	0,404
LCOE (Trabzon)	0,571	0,499	0,463

Çizelge 4.8'de her il için önerilen hibrit sistem konfigürasyonu sunulmuştur. Ayrıca, önerilen hibrit sistemlerin yıllık dizel yakıt tüketimleri ve yıllık CO_2 emisyonları, konvansiyonel, şebekeden bağımsız bir dizel jeneratör sistemiyle kıyaslanmıştır. Güneş ve rüzgar enerjisinden elektrik üretimi, karbondioksit emisyonlarını azaltmasına rağmen, sistemde mevcut olan dizel jeneratörün yakıt tüketimi, yüksek kirletici emisyonlara neden olabilir. Bu sebeple hibrit sistemin çevresel etkisi, bir litre dizel yakıt tüketimi başına 2,68 kg eşdeğer CO_2 salınımı gerçekleştiği dikkate alınarak hesaplanmıştır. Yalnızca dizel jeneratör ile çalışan sistemin yıllık yakıt tüketimi 18 570 L'dir. Önerilen hibrit sistemlerin kurulumuyla, yıllık dizel yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonu salınımının Muğla'da %77, Konya'da %81, Istanbul'da %80 ve Trabzon'da ise %67 azaltılabilir.

Çizelge 4.8. Her il için önerilen hibrit enerji sisteminin seviyelendirilmiş enerji maliyetleri ve yıllık CO_2 emisyon değerleri

Seçilen il	Mugla	Konya	Istanbul	Trabzon	Yalnızca Dizel
FV panel sayısı	350	250	300	400	-
Toplam FV kapasitesi [kW]	35	25	30	40	-
Maks. Dizel Jeneratör Kapasitesi [kW]	15	15	15	15	15
Elektrolizör kapasitesi [kW]	20	20	20	20	-
Yakıt hücresi kapasitesi [kW]	6	6	6	6	-
Rüzgar türbini sayısı[-]	0	1	1	0	-
Toplam kurulu RT gücü [kW]	0	5	5	0	-
Seviyelendirilmiş enerji maliyeti [$/kWh]	0,510	0,493	0,513	0,571	0,472
Yıllık dizel yakıt tüketimi [L]	4158,85	3455,39	3667,09	6094,14	18570
Yıllık hidrojen üretimi [Nm^3]	17340,91	15138,40	15920,35	16328	-
Yıllık CO_2 emisyonu [kg]	11141,55	9256,98	9824,13	16270,98	49767,51

Yakıt fiyatları stabil değildir ve pek çok değişkene bağlı olarak sürekli değişim gösterir. Rezervler azaldıkça yakıt birim fiyatları artmaktadır. Dizel yakıt fiyatı varyasyonunun seviyelendirilmiş enerji maliyetine olan etkisini görebilmek için toplamda dört farklı senaryo incelenmiştir. Temel senaryoda güncel yakıt birim fiyatı 1 $/L alınmıştır. Bunun dışında yakıt birim fiyatının 1,5 $/L, 2 $/L, 2,5 $/L alındığı üç farklı senaryo daha incelenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir. Sonuçlardan görülebileceği gibi, 1 $/L birim yakıt fiyatı için yalnızca dizel jeneratör kullanılan sistemin ürettiği elektrik birim fiyatı en ucuzdur.

Çizelge 4.9. Birim yakıt fiyatı değişiminin birim enerji maliyetine olan etkisi

	LCOE [$/kWh] 1 $/L Yakıt birim fiyatı	LCOE [$/kWh] 1,5 $/L Yakıt birim fiyatı	LCOE [$/kWh] 2 $/L Yakıt birim fiyatı	LCOE [$/kWh] 2,5 $/L Yakıt birim fiyatı
Mugla	0,510	0,551	0,592	0,634
Konya	0,493	0,527	0,561	0,595
Istanbul	0,513	0,549	0,585	0,622
Trabzon	0,571	0,632	0,692	0,753
Yalnızca Dizel	0,472	0,656	0,841	1,025

Ancak 1 $/L birim yakıt fiyatının üzerinde, yalnızca dizel jeneratör kullanılan sistemin seviyelendirilmiş enerji maliyeti en yüksektir. Yalnızca dizel jeneratör kullanılan sistemin yakıt birim fiyatlarına olan duyarlılığı daha fazladır.

Çizelge 4.10. Her il için önerilen optimum sistem konfigürasyonunun yıllaştırılmış maliyeti

		Sistemin NBD maliyeti	**C_{DM}**	**C_{OM}**	**C_{YM}**	**C_{HM}**	**Toplam ($/yıl)**
Muğla	FV	4577,19	0	1050	0	-474.25	5152,93
	Rüzgar Türbini	0	0	0	0	0	0
	Elektrolizör	4359,23	1355	2500	0	- 903,33	7310,89
	Invertör	1307,77	0	75	0	0	1382,77
	Yakıt hücresi	2092,43	650,4	600	0	0	3342,83
	Dizel Jeneratör	719,27	670,72	359,5	4158,85	-27,48	5880,88
	Depolama tankı	2615,54	0	150	0	-162,6	2602,94
	Toplam sistem						**25673,25**
İstanbul	FV	3923,31	0	900	0	-406,5	4416,81
	Rüzgar Türbini	1307,77	0	200	0	0	1507,77
	Elektrolizör	4359,23	1355	2500	0	- 903,33	7310,89
	Invertör	1307,77	0	75	0	0	1382,77
	Yakıt hücresi	2092,43	650,4	600	0	0	3342,83
	Dizel Jeneratör	719,27	670,72	316,97	3667,09	-102,28	5271,28
	Depolama tankı	2615,54	0	150	0	-162,6	2602,94
	Toplam sistem						**25835,78**
Konya	FV	3269,42	0	750	0	-338,75	3680,67
	Rüzgar Türbini	1307,77	0	200	0	0	1507,77
	Elektrolizör	4359,23	1355	2500	0	- 903,33	7310,89
	Invertör	1307,77	0	75	0	0	1382,77
	Yakıt hücresi	2092,43	650,4	600	0	0	3342,83
	Dizel Jeneratör	719,27	670,72	298,67	3455,39	-136,22	5007,84
	Depolama tankı	2615,54	0	150	0	-162,6	2602,94
	Toplam sistem						**24835,70**
Trabzon	FV	5231,07	0	1200	0	-542	5889,07
	Rüzgar Türbini	0	0	0	0	0	0
	Elektrolizör	4359,23	1355	2500	0	- 903,33	7310,89
	Invertör	1307,77	0	75	0	0	1382,77
	Yakıt hücresi	2092,43	650,4	600	0	0	3342,83
	Dizel Jeneratör	719,27	1117,88	526,75	6094,14	-176,00	8282,03
	Depolama tankı	2615,54	0	150	0	-162,6	2602,94
	Toplam sistem						**28810,53**

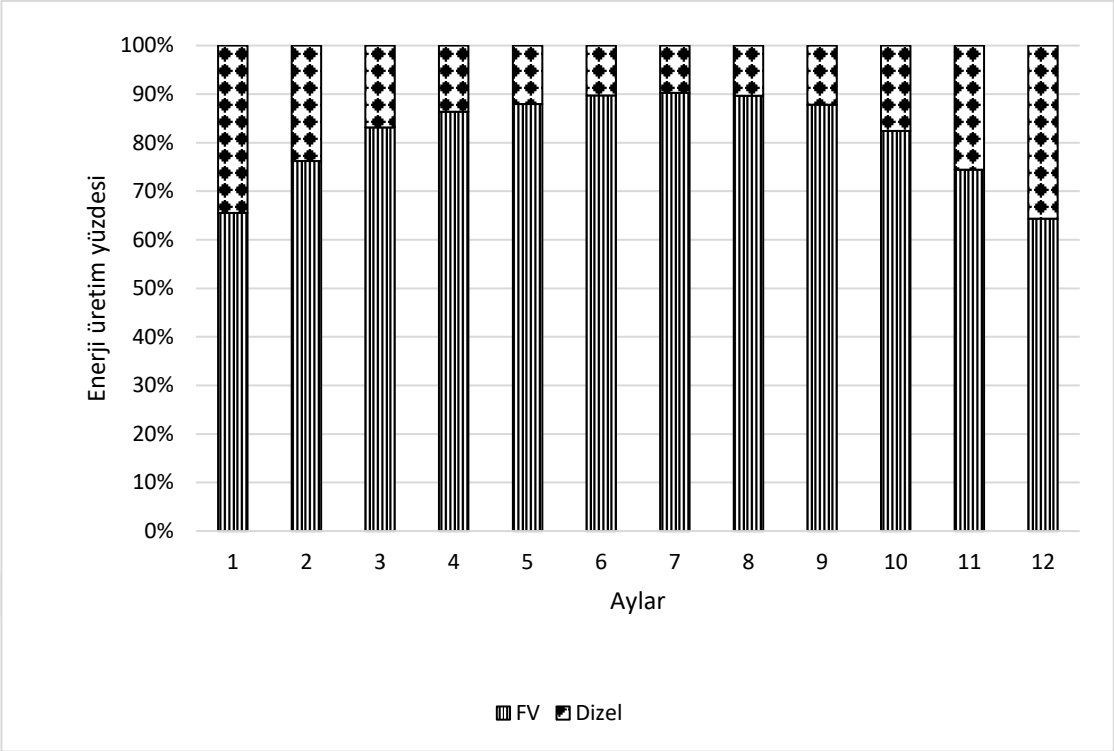
Çizelge 4.10'da her il için önerilen optimum sistem konfigürasyonlarının yıllaştırılmış sistem maliyetleri sunulmuştur. Yıllaştırılmış sistem maliyeti hesaplanırken sistemin net bugünkü değer *(NBD)* maliyeti, değiştirme maliyeti *(C_{DM})*, hurda maliyeti *(C_{HM})*, işletme

ve bakım maliyeti *(C_{OM})*, yakıt maliyeti *(C_{YM})*hesaba katılmıştır. Sonuçlardan görülebileceği gibi dizel jeneratörün yıllaştırılmış toplam maliyeti en yüksek olan il, Trabzon'dur. Trabzon'da dizel jeneratör, diğer illere göre çok daha fazla kullanıldığı için değiştirme maliyeti, yakıt maliyeti ve bakım maliyeti diğer illere göre çok daha fazladır. Konya ve İstanbul'da ise dizel jeneratör yıl boyunca diğer illere göre daha az devreye girdiği için hem işleme ve bakım maliyeti, hem değiştirme maliyeti, hem de yakıt maliyeti diğer illere göre daha azdır. Sonuçlardan görülebileceği gibi, kaynakları çeşitlendirmek fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaktadır. Trabzon dışındaki tüm illerde elektrolizör en yüksek yıllaştırılmış maliyete sahip ekipmandır. Ancak Trabzon'da, dizel jeneratöre ait yıllaştırılmış maliyet oldukça yüksektir ve elektrolizörün biraz üzerindedir.

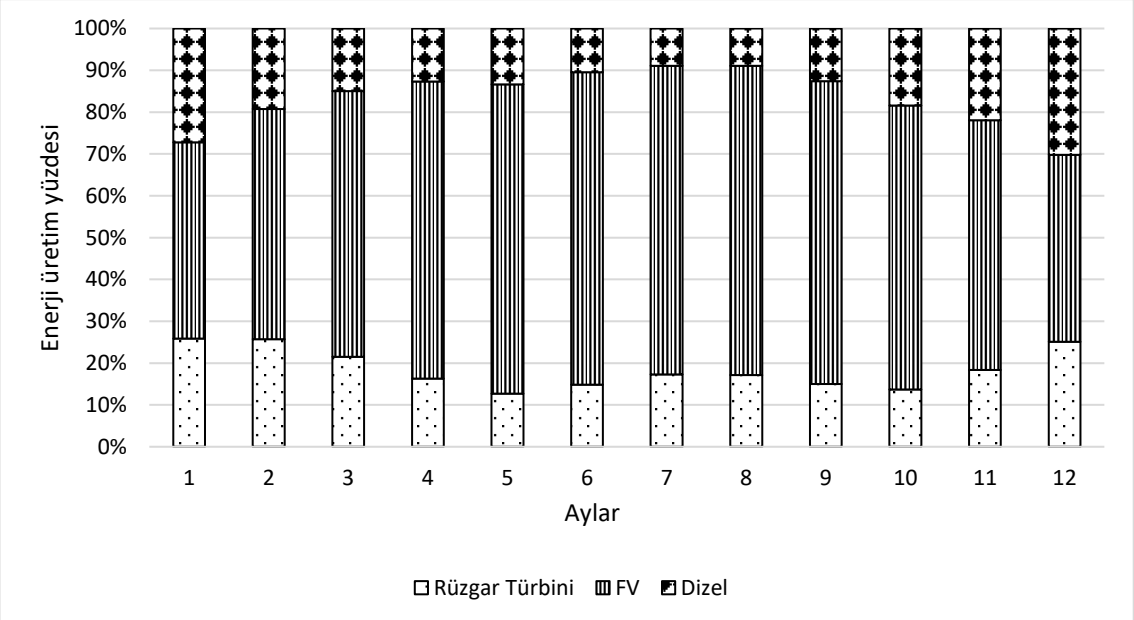
4.8 Optimum Hibrit Sistemlerin Yıl Boyunca Aylık Enerji Üretimleri

Çalışmanın bu kısmında, her il için önerilen hibrit sistemin alt bileşenlerinin yüzdesel elektrik üretimi incelenmiştir. Şekil 4.19'da Muğla ili için önerilen 35 kW FV, 15 kW Dizel Jeneratör, 6 kW yakıt hücresi ve 20 kW elektrolizörden oluşan hibrit enerji üretim sisteminin aylık yüzdesel enerji üretimi gösterilmiştir. Sonuçlardan görülebileceği gibi FV dizisi özellikle yaz aylarında elektrik yükünün büyük çoğunluğunu karşılamaktadır. Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında, FV dizisinin elektrik üretimi enerji talebinin %90'ını karşılayabilmektedir. Ancak güneş radyasyonunun daha düşük olduğu kış aylarında, dizel jeneratörün elektrik üretimi artmaktadır. Muğla ilinde kullanılan hibrit enerji sisteminin yıllık sürdürülebilir enerji yüzdesi %81,5'tir.

Şekil 4.20'de Konya ili için yüzdesel enerji üretim paylaşımları verilmiştir. Sonuçlardan görülebileceği gibi, yaz aylarında FV dizisinin enerji üretimine olan katkısı %70 ile %80 arasındadır. Dizel jeneratörün enerji üretimine katkısı %10 ile %30 arasında değişim göstermektedir. Ocak, Şubat ve Aralık aylarında rüzgar türbinlerinin sağladığı enerji, toplam enerji ihtiyacının sırasıyla %27'si, %20'si ve %30'udur. Tüm yıl göz önüne alındığında sürdürülebilir kaynaklardan üretilen toplam enerji, elektrik yükünün %84'üdür.



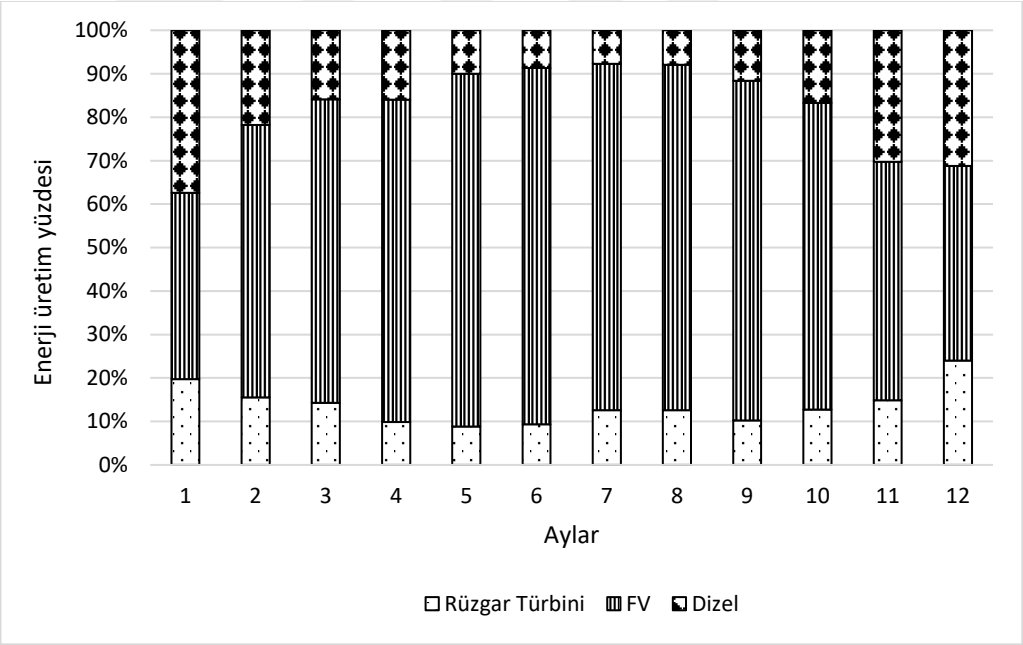
Şekil 4.19. Muğla ili için önerilen şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin alt bileşenlerinin aylık yüzdesel enerji üretimleri



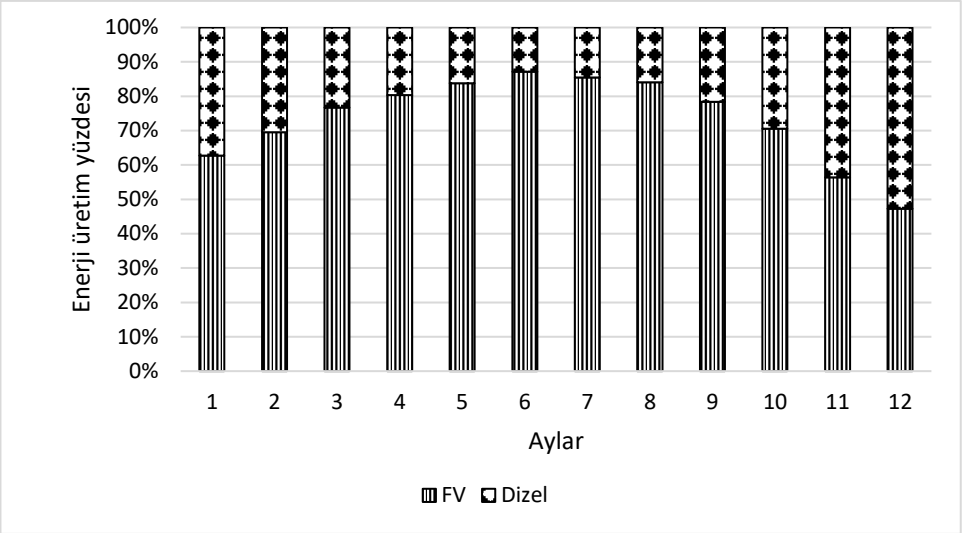
Şekil 4.20. Konya ili için önerilen şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin alt bileşenlerinin aylık yüzdesel enerji üretimleri

Şekil 4.21'de, İstanbul'da, hibrit enerji sistemi alt bileşenlerinin enerji üretimleri yüzdesel olarak sunulmuştur. Sonuçlardan görülebileceği gibi Mart ile Ekim ayları arasında, FV dizisi sistemin temel enerji sağlayıcısıdır. Dizel jeneratörün aylık enerji üretimi, sistem yükünün %8'i ile %40'ı arasında değişmektedir. Rüzgar türbini, aylık olarak yük ihtiyacının %8 ila %24'ünü beslemektedir. Yıllık olarak bakıldığında ise, İstanbul'da üretilen elektrik enerjisinin %82'si sürdürülebilir kaynaklardan sağlanmıştır.

Şekil 4.22, Trabzon ilindeki hibrit enerji sisteminin aylara göre enerji paylaşımını ifade etmektedir. Yaz döneminde FV dizisinin elektrik üretimi toplam enerji ihtiyacının %87'sine kadar çıkmaktadır. Ancak kış döneminde, FV dizisinin üretim kapasitesi düşmektedir. Dizel jeneratörün elektrik üretim payı Kasım ve Aralık aylarında sırasıyla %44 ve %53'tür. Senelik olarak enerji ihtiyacının %73'ü sürdürülebilir kaynaklardan üretilmiştir.



Şekil 4.21. İstanbul ili için önerilen şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin alt bileşenlerinin aylık yüzdesel enerji üretimleri

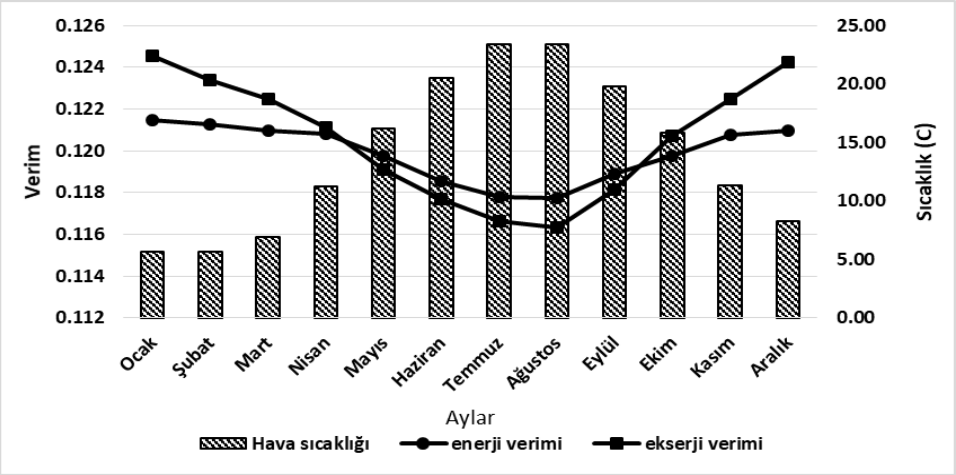


Şekil 4.22. Trabzon ili için önerilen şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin alt bileşenlerinin aylık yüzdesel enerji üretimleri

4.9 Sistemin Ekserji Analizi

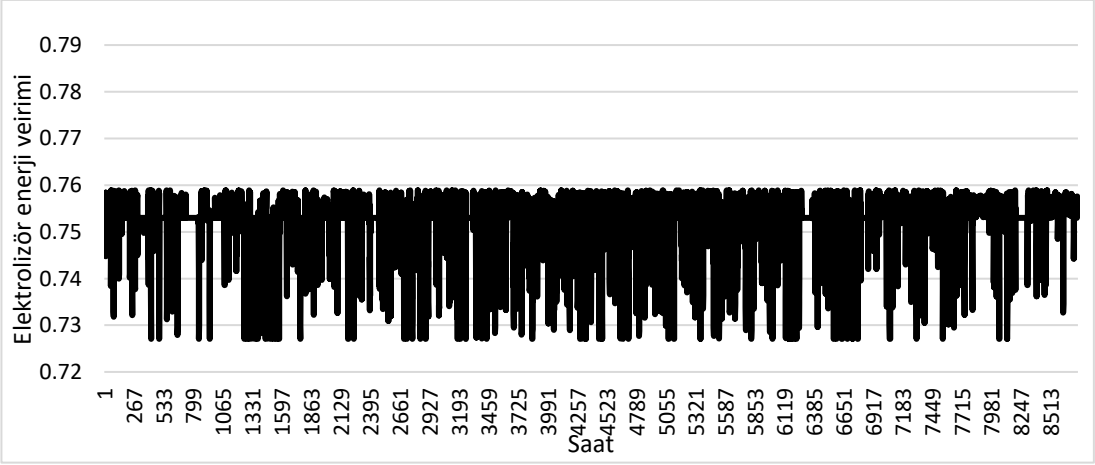
Çalışmanın bu kısmında sistem elemanlarının enerji ve ekserji verimleri ele alınmıştır. Şekil 4.23'de, İstanbul'da kurulu olan sistem için FV panellerin enerji ve ekserji verimleri sunulmuştur. Sonuçlardan görülebileceği gibi ortalama hava sıcaklığının düşük olduğu kış aylarında panellerin enerji ve ekserji verimleri daha yüksektir. Özden'in (2015) bulgularına benzer olarak, bu çalışmada da ekserji veriminin mevsimsel etkilere karşı daha hassas olduğu görülmüştür. Ağustos ayında minimum değerine ulaşan enerji ve ekserji verimi, Eylül ayından itibaren kış dönemi boyunca hızla yükselmektedir. Sonuç olarak FV paneller düşük hava sıcaklıklarında daha verimli çalışırlar. FV panellerin yıllık ortalama enerji verimi % 11,9 iken ekserji verimi %12,06'dır.

3.bölümde verilen eşitlikler kullanılarak sistemdeki alkali elektrolizörlerin enerji ve ekserji verimleri saatlik olarak hesaplanmıştır. Burada referans sıcaklık ve basınç (T_0 ve P_0) değeri olarak TRNSYS veri tabanından alınan çevre sıcaklık ve basınç değerleri kullanılmıştır. Elektrolizörün bir yıl boyunca saatlik enerji ve ekserji verimlerindeki değişim Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de sunulmuştur.

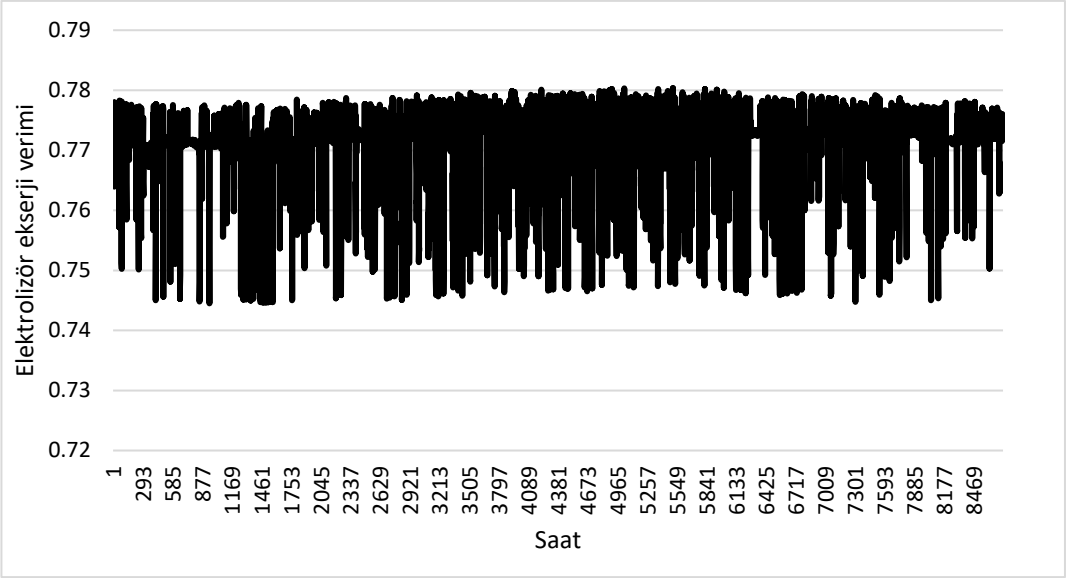


Şekil 4.23. FV panellerin aylık enerji ve ekserji verimleri

Sonuçlar hidrojenin temel ekserji kaynağının kimyasal ekserjisi olduğunu ve fiziksel ekserjisinin toplam ekserjiye katkısının daha az olduğunu göstermiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi, elektrolizörün tükettiği elektrik enerjisine bağlı olarak elektrolizörün enerji verimi 0,72 ile 0,76 arasında değişmektedir. Elektrolizörün ekserji verimi ise enerji verimine yakın olmakla beraber literatürdeki diğer çalışma sonuçlarına benzer şekilde (Calderón vd., 2011; Caliskan vd., 2013; Ozden, 2015) enerji veriminden daha büyüktür. Elektrolizörün ekserji verimi yıl boyunca ortam sıcaklığına ve elektrolizörün elektrik tüketimine bağlı olacak şekilde 0,74 ile 0,78 arasında değişmektedir. Elektrolizörün yıllık ortalama enerji ve ekserji verimleri sırasıyla 0,751 ile 0,771 olarak hesaplanmıştır.

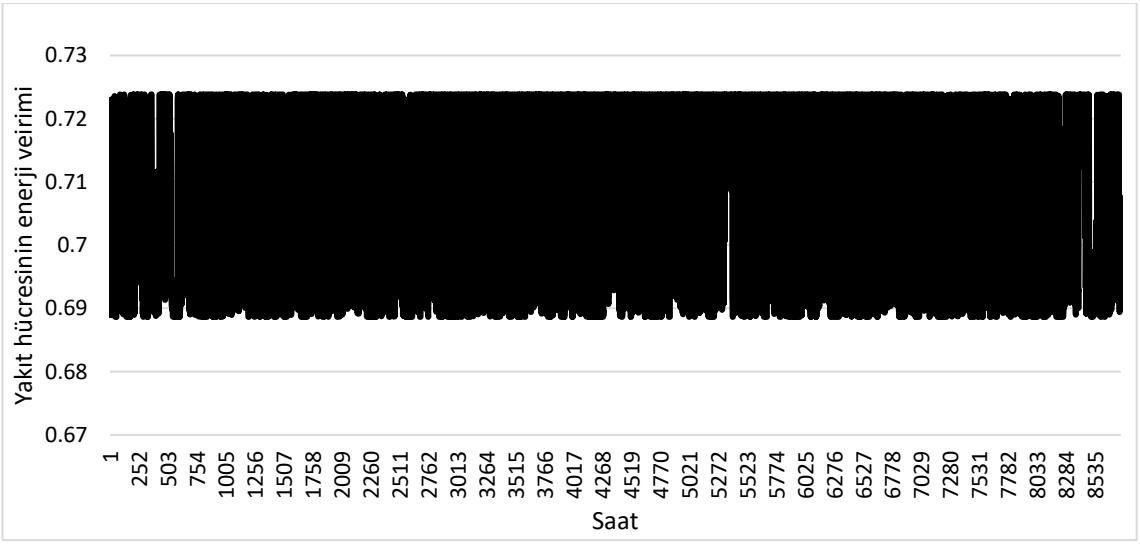


Şekil 4.24. Elektrolizörün yıl boyunca saatlik enerji veriminin değişimi

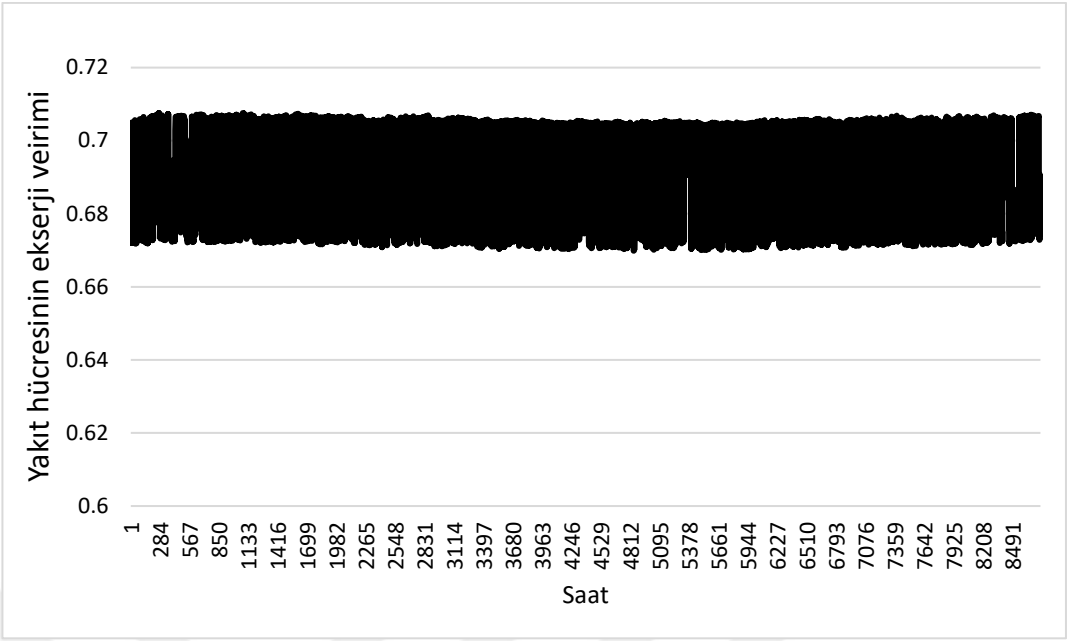


Şekil 4.25. Elektrolizörün yıl boyunca saatlik ekserji veriminin değişimi

Şekil 4.26 ve 4.27'de yakıt hücresinin enerji ve ekserji veriminin yıl boyunca saatlik değişimleri sunulmuştur. Yakıt hücresinin yıllık ortalama enerji verimi %70, ekserji verimi ise %66,5 olarak hesaplanmıştır. Yakıt hücresinin ekserji veriminin enerji veriminden biraz daha düşük olması literatürdeki diğer araştırmacıların bulgularıyla da uyumludur (Calderón vd., 2011; Ozden, 2015).

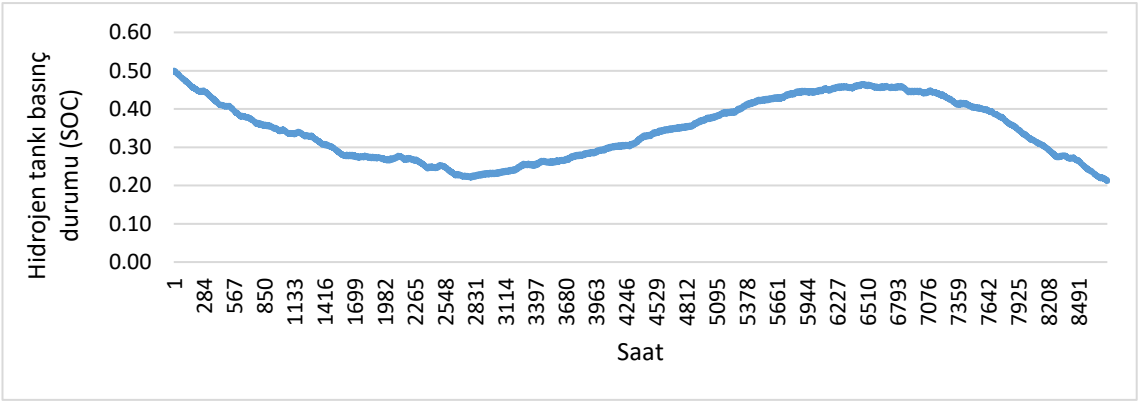


Şekil 4.26. Yakıt hücresinin yıl boyunca saatlik enerji veriminin değişimi



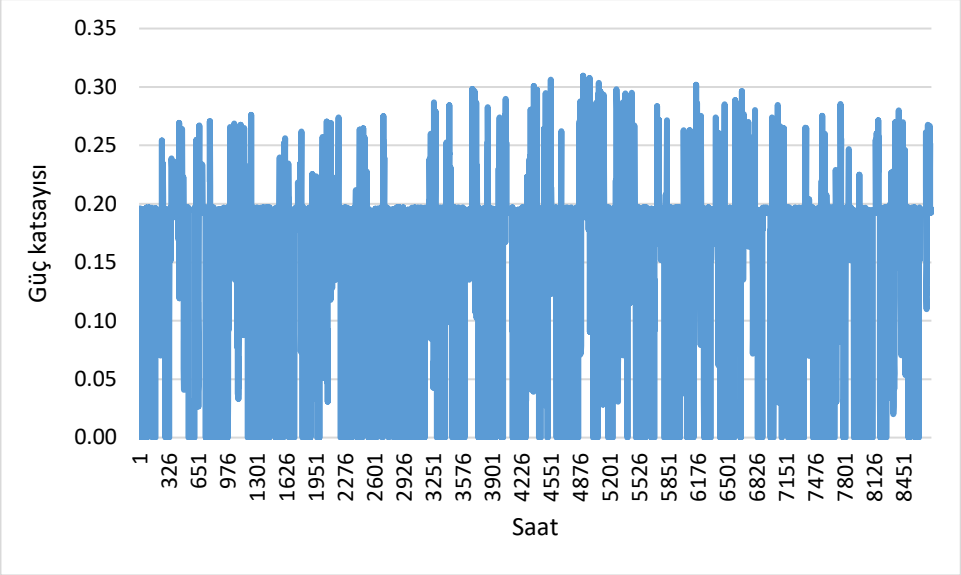
Şekil 4.27. Yakıt hücresinin yıl boyunca saatlik ekserji veriminin değişimi

Şekil 4.28'de İstanbul için önerilen optimum sistemin hidrojen tankı basınç durumunun yıl boyunca saatlik değişimi sunulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi, simülasyon başlangıcında tankın %50'sinin dolu olduğu varsayılmıştır. Kış dönemi boyunca depodaki hidrojen seviyesi azalmaktadır ve Mayıs ayına dek, sürdürülebilir kaynaklardan enerji üretimi yetersiz olduğu için bu eğilim devam etmektedir. Mayıs ayından itibaren (2880. Saat) ise elektrolize yeterli enerji sağlanabildiği için hidrojen seviyesi artmaya başlamaktadır ve bu artış Ekim ayı başına dek (6552.saat) sürmektedir.



Şekil 4.28. Hidrojen tankı basınç durumunun yıl boyunca saatlik değişimi

Güç katsayısı, rüzgar türbinlerinin performanslarını incelemek için yaygın olarak kullanılan bir parametredir. Güç katsayısı hem rüzgar türbininin karakteristiklerine hem de bölgenin rüzgar potansiyeline bağlı olarak değişim gösterir. Şekil 4.29'da güç katsayısının yıl boyunca saatlik değişimi verilmiştir.

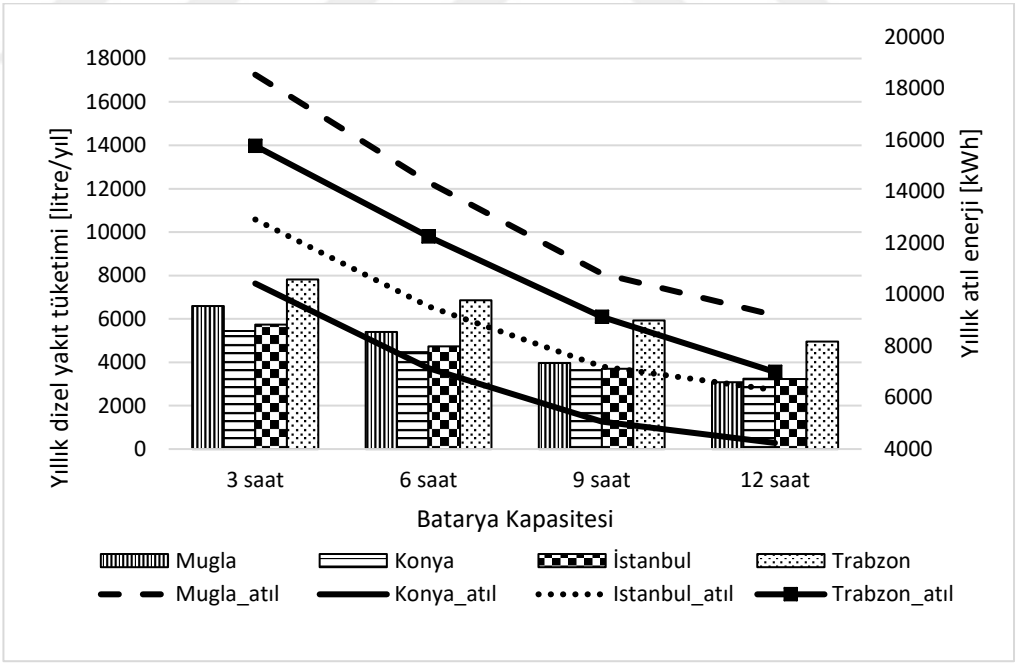


Şekil 4.29. Rüzgar türbini güç katsayısının, yıl boyunca saatlik değişimi

4.10 Batarya Depolamalı Hibrit Enerji Sistemleri

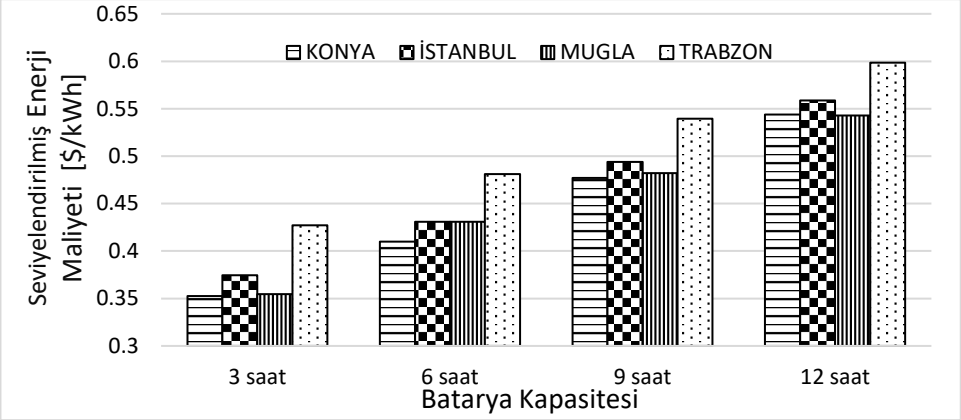
Hidrojen depolama ve batarya depolama, şebekeden bağımsız enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılan iki enerji depolama alternatifidir. Genellikle bataryalı sistemlerde enerji kısa dönem için depolanırken, hidrojen depolamalı sistemlerde daha uzun dönem için depolanır. Bu kısımda, hidrojen depolamalı sistemler, bataryalı sistemlerle karşılaştırılmıştır. Bu sebeple, her il için önerilen optimum hibrit sistem konfigürasyonu, hidrojen depolama ünitesi yerine, kurşun asit batarya ünitesi ile modellenmiştir. Seviyelendirilmiş enerji üretim maliyeti ve yıllık dizel yakıt tüketimi gibi parametreler incelenerek, batarya depolama ve hidrojen depolama alternatifleri teknik ve ekonomik açıdan kıyaslanmıştır. Şekil 4.30'da batarya enerji otonomisine karşılık, yıllık atıl enerji ve yıllık yakıt ihtiyacı tüm iller için sunulmuştur. Batarya kapasitesi, yük enerji ihtiyacı dikkate alınarak, 3-6-9-12 saatlik enerji otonomilerine göre değiştirilmiştir. Sonuçlardan

görüleceği gibi özellikle Muğla ve Trabzon'da batarya kapasitesinin arttırılmasıyla, sistemden kullanılmadan atılan atıl enerji miktarı ciddi oranda azalmaktadır. Bu iki ilde önerilen hibrit enerji sisteminin birincil enerji sağlayıcısı FV dizisidir, dizel jeneratör ise yardımcı kaynak olarak çalışmaktadır. Bu sebepten dolayı, enerji sistemi yalnızca güneş ışınımının yeterli olduğu saatlerde elektrik üretir ve üretilen enerji depolanamazsa kullanılamadan atılır. Bundan dolayı, rüzgar ve güneş birlikte üretim yapan sistemlere göre daha büyük batarya kapasitelerine ihtiyaç duyulur. Muğla ve Trabzon'da daha büyük batarya kapasitelerinde dizel yakıt ihtiyacı daha büyük oranda düşmektedir. Konya ve İstanbul'daki enerji sistemlerinde rüzgar türbinleri de bulunduğu için, enerji üretimi güneş radyasyonunun düşük olduğu kış aylarında ve akşam, gece saatlerinde de sağlanabilmektedir. Bu sebeple, benzer eğilimler göstermelerine rağmen, batarya kapasite artışına karşılık, yıllık atıl enerji ve yıllık yakıt ihtiyacındaki değişim Muğla ve Trabzon illerindeki kadar dramatik değildir. Sonuçlar bir kez daha, enerji sisteminin hibridizasyonunun enerji güvenilirliğini artırdığını ve böylelikle düşük enerji depolama kapasitelerinde bile minimum atıl enerjiyle, yükü güvenle karşılayabildiğini göstermiştir.



Şekil 4.30. Batarya kapasitesinin yıllık atıl enerjiye ve yıllık yakıt tüketimine olan etkisi

Şekil 4.31'de batarya kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji maliyeti üzerindeki etkisi sunulmuştur. Üç saatlik enerji otonomisi için, sistemin seviyelendirilmiş enerji maliyeti Konya, İstanbul, Muğla ve Trabzon'da sırasıyla 0,352 $/kWh, 0,375 $/kWh, 0,354 $/kWh ve 0,427 $/kWh olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, daha uzun enerji otonomi süreleri için, sistemin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyeti önemli ölçüde artar.



Şekil 4.31. Batarya kapasitesinin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetine olan etkisi

Çizelge 4.11'de mevcut çalışma ve literatürdeki diğer çalışmaların seviyelendirilmiş enerji maliyetlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Hidrojen depolama uzun süreli enerji depolamayı karşılamak için uygun bir yöntemdir. Batarya ile enerji depolamanın seviyelendirilmiş enerji üretim maliyeti daha düşüktür, ancak daha kısa vadede enerji depolanabilir. Çizelge 4.12'de çeşitli enerji depolama kapasiteleri için yıllık enerji üretim fazlası ve seviyelendirilmiş enerji üretim maliyeti sunulmuştur. Düşük batarya depolama kapasitelerinde, batarya depolamalı hibrit enerji sistemlerinin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyeti, hidrojen depolamalı sistemlere göre daha uygundur. Öte yandan, sürdürülebilir kaynaklardan üretilen fazladan enerji yeterince depolanamayacağı için yıllık atıl enerji ve yıllık dizel yakıt tüketimi daha fazla olmaktadır. Daha büyük batarya kapasiteleri için yıllık atıl enerji ve yıllık yakıt gereksinimi önemli ölçüde azalır, ancak buna karşılık sistemin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyeti önemli ölçüde artar. Elektrolizörün yakın gelecekte yatırım maliyetini düşürme beklentileri göz önüne alındığında, hidrojen depolamalı hibrit sistemler, batarya depolamalı sistemlere göre çok daha rekabetçi olacaktır. Hidrojen sistemleri, uzun vadeli enerji depolama açısından da daha avantajlıdır. Ayrıca elektrolizör tarafından üretilen hidrojen elektrik üretimi dışında,

mahal ısıtma, yemek pişirme ve ulaşım gibi pekçok farklı alanda da kullanılabilmektedir. Bataryaların enerji yoğunlukları düşük olduğu için, uzun süreli enerji depolama için uygun değildir. FV sistemler gibi sürdürülebilir enerji uygulamaları yaz döneminde olduğu gibi güneş ışınımının yeterli olduğu zamanlarda elektrik üretebilir; bulutlu günlerde, güneş ışınımının yeterli olmadığı saatlerde ise yeterli elektrik üretemez. Bu nedenle elektriğin daha uzun süreli depolanması, sistemin yenilenebilir enerji penetrasyonunu arttırmak ve yıllık yakıt ihtiyacını azaltmak için çok önemlidir.

Çizelge 4.11. Mevcut çalışma ve literatürdeki diğer çalışmaların seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetlerinin karşılaştırılması

Konfigürasyon	LCOE	Lokasyon	Referans
FV/Rüzgar Türbini/Dizel/Batarya	0,37-0,45 $/kWh	Tunus	(El Alimi vd., 2014)
	0,27-0,39 $/kWh	Malezya	(Hossain vd., 2017)
	0,18-0,25 $/kWh	Suudi Arabistan	(Baseer vd., 2019)
	0,20-0,30 $/kWh	Birleşik Arap Emirlikleri	(Rohani ve Nour, 2014)
	0,47 $/kWh	Kolombiya	(Haghighat vd., 2016)
	0,19-0,27 $/kWh	Türkiye	(A. C. Duman ve Güler, 2018)
	0,35-0,56 $/kWh	**Türkiye**	**Mevcut Çalışma**
FV/Dizel/Batarya	0,38 $/kWh	Cezayir	(Fodhil vd., 2019)
	0,48 $/kWh	Çin	(Li vd., 2019)
	0,44 $/kWh	Kolombiya	(Haghighat vd., 2016)
	0,35-0,38 $/kWh	Nijerya	(Adaramola vd., 2014)
	0,19-0,22 $/kWh	Suudi Arabistan	(Rehman ve Al-Hadhrami, 2010)
	0,35-0,60 $/kWh	**Türkiye**	**Mevcut çalışma**
FV/Rüzgar Türbini/YH/Dizel	0,28-0,41 $/kWh	Türkiye	(A. C. Duman ve Güler, 2018)
	0,38-0,56 $/kWh	**Türkiye**	**Mevcut çalışma**
FV/Rüzgar Türbini/YH	0,45-0,51 $/kWh	Mısır	(Samy vd., 2019)
	1,46 $/kWh	Suudi Arabistan	(Al-Sharafi vd., 2017)
	0,68-0,90 $/kWh	Türkiye	(Kalinci vd., 2015)
FV/YH	0,58-0,59$/kWh	Mısır	(Samy vd., 2019)
	0,145 $/kWh	Birleşik Arap Emirlikleri	(Ghenai vd., 2018)
	0,626 $/kWh	Türkiye	(Ozden ve Tari, 2016)
	1,60 $/kWh	Suudi Arabistan	(Al-Sharafi vd., 2017)
FV/Dizel/YH	**0,40-0,58 $/kWh**	**Türkiye**	**Mevcut çalışma**

Çizelge 4.12. Farklı enerji depolama yöntemleri ve kapasitelerinin enerji maliyeti ve yıllık atıl enerji açısından kıyaslanması

Batarya (3 saat enerji otonomisi)		
Lokasyon	**Atıl enerji (kWh)**	**LCOE ($/kWh)**
Muğla	18531,5	0,354
Konya	10427,3	0,352
Istanbul	12911,6	0,374
Trabzon	15767,3	0,427
Batarya (6 saat enerji otonomisi)		
Lokasyon	**Atıl enerji (kWh)**	**LCOE ($/kWh)**
Mugla	14355	0,430
Konya	7145,7	0,410
Istanbul	9534,3	0,431
Trabzon	12250,5	0,481
Batarya (9 saat enerji otonomisi)		
Lokasyon	**Atıl enerji (kWh)**	**LCOE ($/kWh)**
Mugla	10804	0,482
Konya	5065,0	0,477
Istanbul	7204,9	0,493
Trabzon	9132,6	0,539
Batarya (12 saat enerji otonomisi)		
Lokasyon	**Atıl enerji (kWh)**	**LCOE ($/kWh)**
Mugla	9191,5	0,542
Konya	4237,7	0,543
Istanbul	6288,1	0,558
Trabzon	6993,0	0,598
Hidrojen depolama (20 kW elektrolizör ile)		
Lokasyon	**Atıl enerji (kWh)**	**LCOE ($/kWh)**
Mugla	2878,8	0,510
Konya	67,3	0,493
Istanbul	432,7	0,513
Trabzon	3183,9	0,571
Hidrojen depolama (18 kW elektrolizör ile)		
Lokasyon	**Atıl enerji (kWh)**	**LCOE ($/kWh)**
Mugla	4886,5	0,491
Konya	310,09	0,476
Istanbul	1256,6	0,497
Trabzon	4813,69	0,550

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklı hibrit enerji sistemleri incelenmiş ve bu sistemlerin performansları değerlendirilmiş, performans iyileştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Sistem modelleri mümkün olduğunca gerçekçi oluşturulmuştur. Her bir sistem ayrı ayrı ele alınmıştır. Aşağıda her bir sistem analizi için elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

Çalışmada, farklı enerji kaynaklarını kullanan ve şebekeden bağımsız olarak çalışan hibrit enerji sistem uygulamalarının teknik ve ekonomik performansları incelenmiştir. Farklı enerji depolama alternatifleri için hibrit enerji sistemleri, tükettikleri yıllık yakıt miktarı, ürettikleri enerji fazlası, seviyelendirilmiş enerji maliyetleri gibi farklı parametreler açısından kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır. Türkiye'nin farklı bölgelerinden dört büyük kentin iklim verileri kullanılarak bir vaka analizi yapılmıştır. Çalışmanın ana sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Seçilen bölgelerin rüzgar potansiyelleri, Weibull fonksiyonu kullanılarak ayrı ayrı araştırılmıştır.
- Konya ve İstanbul için Rüzgar türbini-FV panel dizisi-yakıt hücresi-elektrolizör ve dizel jeneratör, Trabzon ve Muğla için ise yalnızca FV panel dizisi-yakıt hücresi-elektrolizör ve dizel jeneratörden oluşan hibrit enerji sistemi önerilmiştir.
- Her il için ayrı ayrı önerilen sistem konfigürasyonlarının yıllık yenilenebilir enerji penetrasyonu Muğla, Konya, Trabzon ve İstanbul'da sırasıyla % 81,5, %84, %73 ve %82 olarak bulunmuştur.
- Önerilen sistemlerin dinamik davranışı incelendiğinde, enerji kaynağını çeşitlendirmenin, enerji ihtiyacının daha verimli bir şekilde sağlanmasına yardımcı olduğu ve birincil enerji kaynağının rüzgar ve güneş birlikte olduğu illerde, birincil enerji kaynağı yalnızca güneş olan illere göre enerji üretim fazlasının daha az olduğu gözlenmiştir.
- Rüzgar ve güneş enerjisi anlık olarak değişim gösterebilir ve bu sebeple üretilen enerjinin depolanması gerekir. Enerji depolama alternatiflerini karşılaştırmak

için, önerilen her bir sistem batarya depolamalı olarak da modellenmiştir. Kısa enerji otonomi süreleri için, batarya depolamalı sistemlerin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetleri hidrojen depolamalı sistemlere göre daha düşüktür; bununla birlikte, daha büyük batarya kapasiteleri için batarya depolamalı sistemlerin seviyelendirilmiş enerji üretim maliyetleri, hidrojen depolamalı sistemleri aşmaktadır.

- Hidrojen depolamaya kıyasla daha düşük ilk yatırım maliyetine sahip olmasına rağmen, bataryalar uzun süreli depolama için uygun değildir. Oysaki sürdürülebilir enerji üretim fazlasının uzun süreli depolanması, sistemin yıllık yenilenebilir enerji penetrasyonunu artırmak için çok önemlidir. Hidrojen depolamalı sistemler, daha uzun süreli enerji depolayabildikleri için atıl enerji miktarları daha azdır.
- Gelişen teknoloji ile birlikte elektrolizörlerin ilk yatırım maliyetinin düşeceği tahmin edilmektedir. Hidrojen depolamalı sistemlerinin şimdiki ve gelecekteki ekonomik fizibilitesini incelemek için üç farklı elektrolizör maliyet senaryosu oluşturulmuştur. Sonuçlar, hidrojen depolamalı hibrit enerji sistemlerinin yakın gelecekte bataryalı sistemlere göre çok daha rekabetçi olacağını ortaya koymuştur.
- Optimum sistem konfigürasyonlarının yıllık hidrojen üretimi, seçilen lokasyonlarda 15 000 ila 18 000 Nm^3/yıl arasında değişmektedir.

Hidrojen depolamalı hibrit enerji sistemleri, sürdürülebilir bir şekilde elektrik üretmek ve depolamak için gereklidir. Bu nedenle, daha düşük karbonlu bir gelecek için hidrojen depolamalı hibrit enerji uygulamalarını artırmak ülkemiz için büyük önem taşımaktadır. Bu sistemlerin maliyet-etkin bir şekilde boyutlandırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması için önerilen hususlar aşağıda sunulmuştur:

- Bu sistemlerin etkin bir şekilde boyutlandırılıp kullanılması için söz konusu yerleşim bölgesinin iklimsel verilerinin ilgili meteoroloji istasyonundan temin edilmesi gerekmektedir. Rüzgar ve güneş enerjisi potansiyeli aynı ilçedeki iki farklı lokasyonda bile değişiklik gösterebildiğinden, uzun dönem ölçülen iklimsel verilerinin kullanılması önerilmektedir.

- Ekonomik analiz yapılırken, literatürde birim kapasite başına maliyetler sabit olarak verilmiştir. Ancak, 1 kW'lık bir FV panel ile 1 MW'lık bir FV panel dizisinin birim fiyatı aynı değildir. Bundan dolayı boyutlandırma yapılırken mümkünse piyasadan tedarik edilen, gerçek sistem fiyatlarının dikkate alınması önerilmektedir.
- Son olarak, hibrit enerji sistemleri, geleneksel güç üretim sistemlerine göre ekonomik açıdan dezavantajlı durumdadır. Hibrit enerji sistemlerinin kurulum maliyetleri oldukça yüksektir. Bu sistemleri yaygınlaştırmak için devlet teşviklerinin arttırılması ve bu sistemlerin daha cazip hale getirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Adaramola, M. S., Paul, S. S., Oyewola, O. M. 2014. Assessment of decentralized hybrid PV solar-diesel power system for applications in Northern part of Nigeria. *Energy for Sustainable Development*, *19*(1): 72–82.

Ahmadi, P. 2013. Modeling, Analysis and Optimization of Integrated Energy Systems for Multigeneration Purposes. *Ph.D. Thesis*, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, Canada.

Aiche-Hamane, L., Belhamel, M., Benyoucef, B., Hamane, M. 2009. Feasibility study of hydrogen production from wind power in the region of Ghardaia. *International Journal of Hydrogen Energy*, *34*(11): 4947–4952.

Ajder, A. 2011. *F*otovoltaik güneş enerjisi sistemleri için optimum eğim açısının hesaplanması. *Yüksek lisans tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik mühendisliği Elektrik tesisleri anabilim dalı, İstanbul.

Al-Sharafi, A., Sahin, A. Z., Ayar, T., Yilbas, B. S. 2017. Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *69*(September 2015): 33–49.

Alavi, O., Mostafaeipour, A., Qolipour, M. 2016. Analysis of hydrogen production from wind energy in the southeast of Iran. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(34): 15158–15171.

Alkababjie, M. F., Hamdon, W. H. 2012. Feasibility and environmental effects study of adding micro hydro power plant, converter and batteries to diesel generators using in electrification a remote Iraqi village. *2012 First National Conference for Engineering Sciences (FNCES 2012)* (ss. 1–6).

Alkaya, L., Behçet, R., İlkılınç, C. 2008. Yakıt pilleri ve uygulama alanları. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 67–71.

Alnaser, N. W. 2020. Building integrated renewable energy to achieve zero emission in Bahrain. *Energy & Buildings*, *93*(2015): 32–39.

Altun, A. F., Kilic, M. 2020a. Economic feasibility analysis with the parametric dynamic simulation of a single effect solar absorption cooling system for various climatic regions in Turkey. *Renewable Energy*, *152*:75–93.

Altun, A. F., Kilic, M. 2020b. Design and performance evaluation based on economics and environmental impact of a PV-wind-diesel and battery standalone power system for various climates in Turkey. *Renewable Energy*, *157*: 424–443.

Amutha, W. M., Rajini, V. 2016. Cost benefit and technical analysis of rural electrification alternatives in southern India using HOMER. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, *62*: 236–246.

Arshad, A., Ali, H. M., Habib, A., Bashir, M. A., Jabbal, M., Yan, Y. 2019. Energy and exergy analysis of fuel cells: A review. T*hermal Science and Engineering Progress*, *9*:308–321.

Ayodele, T. R., Munda, J. L. 2019. Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(33): 17669–17687.

Bakić, V., Pezo, M., Stevanović, Ž., Živković, M., Grubor, B. 2012. Dynamical simulation of PV/Wind hybrid energy conversion system. *Energy*, *45*(1): 324–328.

Bakić, V. V., Pezo, M. L., Stojković, S. M. 2016. Technical and economic analysis of grid-connected PV/wind energy stations in the republic of serbia under varying climatic condition. *FME Transactions*, *44*(1):71–82.

Baseer, M. A., Alqahtani, A., Rehman, S. 2019. Techno-economic design and evaluation of hybrid energy systems for residential communities : Case study of Jubail industrial city. *Journal of Cleaner Production*, *237*: 117806.

Berger, J. 2016. The modelling of photovoltaic, solar thermal, and photovoltaic/thermal domestic hot water systems. *Master Thesis,* Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University, Canada.

Bilgili, M., Bilirgen, H., Ozbek, A., Ekinci, F., Demirdelen, T. 2018. The role of hydropower installations for sustainable energy development in Turkey and the world. *Renewable Energy*, *126*: 755–764.

Bitirgen, K. 2018. *S*olar radiation estimation for modeling of PV arrays and calculation of solar energy potential based on *ArcGIS*. *Master Thesis,* Anadolu University, Graduate School of Sciences Electrical and Electronics Engineering Program, Eskişehir.

Boztepe, M. 2015. Fotovoltaik güç sistemlerinde verimliliği. https://www.emo.org.tr/ekler/65eb10e64749410_ek.pdf (Erişim Tarihi: 01.02.2021).

Buonomano, A., Calise, F., Vicidomini, M. 2016. Design, Simulation and Experimental Investigation of a Solar System Based on PV Panels and PVT Collectors. *Energies*, *9*(7)497.

Buonomano, A., Calise, F., Dentice d'Accadia, M., Vicidomini, M. 2018. A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: Dynamic simulation and economic assessment. *Energy*, 155:174-189.

Buttler, A., Spliethoff, H. 2018. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*(September 2017): 2440–2454.

Calderón, M., Calderón, A. J., Ramiro, A., González, J. F., González, I. 2011. Evaluation of a hybrid photovoltaic-wind system with hydrogen storage performance using exergy analysis. *International Journal of Hydrogen Energy, 36*(10): 5751–5762.

Caliskan, H., Dincer, I., Hepbasli, A. 2013. Exergoeconomic and environmental impact analyses of a renewable energy based hydrogen production system. *International Journal of Hydrogen Energy, 38*(14): 6104–6111.

Çamcı, Ş. 2007. Konutlar için, yakıt hücresi ve güneş pilleri kullanan, şebekeden bağımsız bir güç sisteminin tasarımı ve modellemesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Cao, F., Zhao, L., Zhang, F., Guo, L. 2014. Redesign of a Water Heating System Using Evacuated Tube Solar Collectors: TRNSYS Simulation and Techno-Economic Evaluation. *Heat Transfer Engineering, 35*(6–8): 556–566.

Çetin, E. Elektrik Enerjisi Üretimi -Rüzgar Santralleri. https://pbs.bozok.edu.tr/user_dosyalar/558-86267.pdf (Erişim tarihi: 10.03.2021)

Dabakoğlu, A. 2017. Rüzgar türbinlerinin şebekeye entegrasyonu ve performanslarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi,* İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Anabilim dalı, İstanbul.

Das, H. S., Yatim, A. H. M., Tan, C. W., Lau, K. Y. 2016. Proposition of a PV/tidal powered micro-hydro and diesel hybrid system: A southern Bangladesh focus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53*:1137–1148.

Deng, Z., Jiang, Y. 2020. Optimal sizing of wind-hydrogen system considering hydrogen demand and trading modes. *International Journal of Hydrogen Energy, 45*(20): 11527–11537.

Dincer, I. 2012. Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *37*(2): 1954–1971.

Duman, A. C., Güler, Ö. 2018. Techno-economic analysis of off-grid PV/wind/fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households. *Sustainable Cities and Society*, *42*(June): 107–126.

Duman, S., Yörükeren, N., Altaş, İ. H. 2014. Fotovoltaik Enerji Sistemlerinin Modellenmesi, Benzetimi, Uygulaması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, *3*(1): 9–23.

Dursun, B. 2012. Determination of the optimum hybrid renewable power generating systems for Kavakli campus of Kirklareli University , Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(8): 6183–6190.

El Alimi, S., Maatallah, T., Ben Nasrallah, S. 2014. Break-even analysis and optimization of a stand-alone hybrid system with battery storage for residential load consumption - A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37*:408–423.

Elnaggar, M., Edwan, E., Ritter, M. 2017. Wind energy potential of Gaza using small wind turbines: A feasibility study. *Energies, 10*(8).

Erdinç, O., Uzunoğlu, M., Vural, B. 2011. "Hibrit alternatif enerji sistemlerinde kullanılan enerj i depolama üniteleri". *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu* (ss. 116–121).

Eroglu, M., Dursun, E., Sevencan, S., Song, J., Yazici, S., Kilic, O. 2011. A mobile renewable house using PV/wind/fuel cell hybrid power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(13): 7985–7992.

Ete, A. 2009. Hydrogen Systems Modelling, Analysis and Optimisation. *Master Thesis,* University of Strathclyde., UK.

Fang, R. 2019. Life cycle cost assessment of wind power–hydrogen coupled integrated energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(56): 29399–29408.

Fathy, A. 2016. A reliable methodology based on mine blast optimization algorithm for optimal sizing of hybrid PV-wind-FC system for remote area in Egypt. *Renewable Energy, 95*: 367–380.

Ferrero, D., Gamba, M., Lanzini, A., Santarelli, M. 2016. Power-to-Gas Hydrogen: Techno-economic Assessment of Processes towards a Multi-purpose Energy Carrier. *Energy Procedia, 101*(September): 50–57.

Fodhil, F., Hamidat, A., Nadjemi, O. 2019. Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria. *Energy, 169*: 613–624.

Fong, K. F., Lee, C. K., Zhao, T. F. 2017. Effective design and operation strategy of renewable cooling and heating system for building application in hot-humid climate. *Solar Energy, 143*: 1–9.

Genc, G., Celik, M., Genc, M. S. 2012. Cost analysis of wind-electrolyzer-fuel cell system for energy demand in Pınarbas. *International Journal of Hydrogen Energy,* 3*7*: 12158–12166.

Ghenai, C., Salameh, T., Merabet, A. 2018. Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region. *International Journal of Hydrogen Energy*: 1–11.

Güğül, G. 2016. Investigation and techno-economic evaluation of the ways to minimize the final energy consumption of a detached house in Ankara. *Doktora Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Hacatoglu, K. 2014. A systems approach to assessing the sustainability of hybrid community energy systems. *Ph.D. Thesis,* Faculty of Engineering and Applied Science,

University of Ontario Institute of Technology, Canada.

Haghighat, A., Alberto, S., Escandon, A., Naja, B., Shirazi, A., Rinaldi, F. 2016. Techno-economic feasibility of photovoltaic , wind , diesel and hybrid electrifi cation systems for off-grid rural electrification in Colombia. *Renewable Energy*, *97*:293-305.

Hossain, M., Mekhilef, S., Olatomiwa, L. 2017. Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea. *Sustainable Cities and Society*, *28*:358–366.

Hosseinalizadeh, R., G, H. S., Sadegh, M. 2016. Economic sizing of a hybrid (PV – WT – FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model : Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *54*:139–150.

Huang, Q., Shi, Y., Wang, Y., Lu, L., Cui, Y. 2015. Multi-turbine wind-solar hybrid system. *Renewable Energy*, *76*:401–407.

Iqbal, W., Yumei, H., Abbas, Q., Hafeez, M., Mohsin, M., Fatima, A., … Sohail, N. 2019. Assessment of wind energy potential for the production of renewable hydrogen in Sindh Province of Pakistan. *Processes*, *7*(4).

Kaabeche, A., Ibtiouen, R. 2014. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system. *Solar Energy*, *103*:171–182.

Kahraman, H., Kolip, A., Köroğlu, Ç. İ. 2019. Beş hücreli pem tipi yakıt pili tasarımı, üretimi ve deneysel analizi. *7th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science* (C. 2019, ss. 884–893).

Kalinci, Y., Hepbasli, A., Dincer, I. 2015. Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid renewable energy system with hydrogen production and storage options. *International Journal of Hydrogen Energy*, *40*(24):7652–7664.

Kalinci, Y., Hepbasli, A., Tavman, I. 2008. Determination of optimum pipe diameter along with energetic and exergetic evaluation of geothermal district heating systems: Modeling and application. *Energy and Buildings*, *40*(5):742–755.

Kalogirou, S. A. 2001. Use of TRYNSYS for modeling and simulation of a hybrid PV–thermal solarsys tem for Cyprus. Renewable Energy, *23*:247–60.

Kapusuz, M. 2019. Otonom ve şebeke bağlantılı fotovoltaik ve yakıt hücresi kaynaklı hibrid bir mikrokojenerasyon sisteminin optimizasyonu ve kontrolü. *Doktora Tezi*, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi, İzmir.

Kaya, M. N., Aksoy, M. H., Kose, F. 2017. Renewable Energy in Turkey : Potential , Current Status and Future Aspects. *International Journal of Engineering*, (February):65–69.

Keçebaş, A., Coskun, C., Oktay, Z., Hepbasli, A. 2014. Comparing advanced exergetic assessments of two geothermal district heating systems for residential buildings. *Energy and Buildings, 81*:141–151.

Keçebaş, P., Gökgedik, H., Alkan, M. A., Keçebaş, A. 2014. An economic comparison and evaluation of two geothermal district heating systems for advanced exergoeconomic analysis. *Energy Conversion and Management, 84*:471–480.

Khalid, F. 2014. Development and analysis of a new integrated solar-wind-geothermal energy system. *Master Thesis,* Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, Canada.

Khalilnejad, A., Riahy, G. H. 2014. A hybrid wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer. *Energy Conversion and Management, 80*:398–406.

Khan, M.B., Jidin, R., Pasupuleti, J., Shaaya, S. A. 2015. Optimal combination of solar, wind, micro-hydro and diesel systems based on actual seasonal load profiles for a resort island in the South China Sea. *Energy, 82*:80–97.

Khosravi, A., Koury, R. N. N., Machado, L., Pabon, J. J. G. 2018. Energy, exergy and economic analysis of a hybrid renewable energy with hydrogen storage system. *Energy, 148*:1087–1102.

Kılıç, M., Anjrini, M. 2020. Comparative performance analysis of a combined cooling system with mechanical and adsorption cycles. *Energy Conversion and Management, 221:*113208.

Kiliç, G. A., Al, K., Dağtekin, E., and Unver U. 2020. Technical, Economic And Environmental Investigation Of Grid-Independent Hybrid Energy Systems Applicability: A Case Study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-16.

Kirçiçek, Y., Aktaş, A., Özdemir, Ş. 2017. Yenilenebilir Enerji Desteği için Kullanılan Farklı Tip Bataryaların Modellenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi Modelling and Comparative Analysis of Different Type of Batteries Used for Renewable Energy Support, *Journal of Polytechnic*, *20*(1):83–90.

Kiymaz, Ö., Yavuz, T. 2016. Wind power electrical systems integration and technical and economic analysis of hybrid wind power plants. *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* (ss. 158–163).

Knutel, B., Pierzyńska, A., Dębowski, M., Bukowski, P., Dyjakon, A. 2020. Assessment of energy storage from photovoltaic installations in Poland using batteries or hydrogen. *Energies, 13*(15).

Kok, B., Benli, H. 2017. Energy diversity and nuclear energy for sustainable

development in Turkey. *Renewable Energy*, *111*:870–877.

Kurban, M., Kantar, Y. M., Onur, F., Lu, H. Ğ. 2007. Weibull Dagılımı Kullanılarak Rüzgar Hız ve Güç Yogunluklarının İstatistiksel Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *7*(2):205–218.

Lal, D. K., Dash, B. B., Akella, A. K. 2011. Optimization of PV/Wind/Micro-Hydro/diesel hybrid power system in homer for the study area. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, *3*(3):307–325.

Lau, K. Y., Yousof, M. F. M., Arshad, S. N. M., Anwari, M., Yatim, A. H. M. 2010. "Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions". Energy, *35*(8):3245–3255.

Li, C., Zhou, D., Wang, H., Cheng, H., Li, D. 2019. Feasibility assessment of a hybrid PV / diesel / battery power system for a housing estate in the severe cold zone: A case study of Harbin. *Energy*, *185*:671–681.

Livatyalı, H., Yıldırım, T. 2011. Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Teknolojisindeki Gelişmeler. *Mühendis ve Makina, 53*(633):17–19.

Marchenko, O. V., Solomin, S. V. 2017. Modeling of hydrogen and electrical energy storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(15):9361–9370.

Mccormick, B. A. 2018. Modelling and transient simulation of solar-powered hydrogen energy storage systems. *Master Thesis*, Department of Mechanical & Materials Engineering, Queen's University Kingston, Ontario, Canada.

Mohsin, M., Rasheed, A. K., Saidur, R. 2018. Economic viability and production capacity of wind generated renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43*(5):2621–2630.

Mostafaeipour, A., Qulipour, M., Goudarzi, H. 2019. Feasibility of using wind turbines for renewable hydrogen production in Firuzkuh , Iran. *Front. Energy*, *13*(3): 494–505.

Mostafaeipour, Ali, Khayyami, M., Sedaghat, A., Mohammadi, K., Shamshirband, S., Sehati, M. A., Gorakifard, E. 2016. Evaluating the wind energy potential for hydrogen production: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(15): 6200–6210.

Mubaarak, S., Zhang, D., Chen, Y., Liu, J., Wang, L. 2020. Techno-Economic Analysis of Grid-Connected PV and Fuel Cell Hybrid System Using Different PV Tracking Techniques. *Applied Sciences*, 10:1–26.

Nelson, D. B., Nehrir, M. H., Wang, C. 2006. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems. *Renewable Energy*, *31*(10):

1641–1656.

Onat, N., Ersöz, S. 2009. Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Karşılaştırılması. *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 50–56, Diyarbakır.

Oral, F., Behçet, R., Aykut, K. 2017. Hidroelektrik Santral Rezervuar Verilerinin Enerji Üretimi Amaçlı Değerlendirilmesi The Assessment of Hydroelectric Power Plant Reservoir Data with the Purpose of Energy Production. *BEU Journal of Science, 6*(2):29–38.

Ozden, E. 2015. Pem fuel cell degradation: numerical investigation and effects on the performance of solar-hydrogen based renewable energy systems. *Ph.D. Thesis*, Department of Mechanical Engineering, METU, Ankara.

Ozden, E., Tari, I. 2016. Energy-exergy and economic analyses of a hybrid solar-hydrogen renewable energy system in Ankara, Turkey. *Applied Thermal Engineering, 99*:169–178.

Panayiotou, G., Kalogirou, S., Tassou, S. 2012. Design and simulation of a PV and a PV - Wind standalone energy system to power a household application. *Renewable Energy, 37*:355-363.

Proost, J. 2019. State-of-the art CAPEX data for water electrolysers, and their impact on renewable hydrogen price settings. International Journal of Hydrogen Energy, *44*(9):4406–4413.

Quesada, B., Sánchez, C., Cañada, J., Royo, R., Payá, J. 2011. Experimental results and simulation with TRNSYS of a 7.2kWp grid-connected photovoltaic system. *Applied Energy, 88*(5):1772–1783.

Ramli, M. A. M., Hiendro, A., Al-Turki, Y. A. 2016. Techno-economic energy analysis of wind/solar hybrid system: Case study for western coastal area of Saudi Arabia. *Renewable Energy, 91*:374–385.

Redha, A. M., Dincer, I., Gadalla, M. 2011. Thermodynamic performance assessment of wind energy systems: An application. *Energy, 36*(7):4002–4010.

Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M. 2010. Study of a solar PV-diesel-battery hybrid power system for a remotely located population near Rafha, Saudi Arabia. *Energy, 35*(12): 4986–4995.

Rehman, S., Mahbub Alam, M., Meyer, J. P., Al-Hadhrami, L. M. 2012. Feasibility study of a wind-pv-diesel hybrid power system for a village. *Renewable Energy, 38*(1): 258–268.

Rezaei-Shouroki, M., Mostafaeipour, A., Qolipour, M. 2017. Prioritizing of wind farm locations for hydrogen production: A case study. *International Journal of Hydrogen*

Energy, *42*(15):9500–9510.

Rezaei, M., Naghdi-Khozani, N., Jafari, N. 2020. Wind energy utilization for hydrogen production in an underdeveloped country: An economic investigation. *Renewable Energy*, *147*:1044–1057.

Rezk, H., Dousoky, G. M. 2016. Technical and economic analysis of different con fi gurations of stand-alone hybrid renewable power systems – A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62*:941–953.

Rhaman, M. M. 2013. Hybrid renewable energy system for sustainable future of Bangladesh. *International Journal of Renewable Energy Research, 3*(4):777–780.

Rohani, G., Nour, M. 2014. Techno-economical analysis of stand-alone hybrid renewable power system for Ras Musherib in United Arab Emirates. *Energy, 64*:828–841.

Samy, M. M., Barakat, S., Ramadan, H. S. 2019. Techno-economic analysis for rustic electrification in Egypt using multi-source renewable energy based on PV / wind / FC. *International Journal of Hydrogen Energy, 45*(20):11471–11483.

Shakya, B. D., Aye, L., Musgrave, P. 2005. Technical feasibility and financial analysis of hybrid wind-photovoltaic system with hydrogen storage for Cooma. *International Journal of Hydrogen Energy*, *30*(1):9–20.

Shepherd, C. M. 1965. Design of Primary and Secondary Ceils. *Journal of Electrochemical Society*, *112*(657).

Şimşek, S. 2018. Fotovoltaik Sistemlerde Verimliliği Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi,* Hacettepe Üniversitesi, Temiz-Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı, Ankara.

Singh, S., Chauhan, P., Aftab, M. A., Ali, I., Hussain, S. M. S., Ustun, T. S. 2020. Cost Optimization of a Stand-Alone Hybrid Energy System with Fuel Cell and PV, *Energies*, 13:1–23.

Smaoui, M., Abdelkafi, A., Krichen, L. 2015. Optimal sizing of stand-alone photovoltaic / wind / hydrogen hybrid system supplying a desalination unit. *Solar Energy, 120*:263–276.

Suleman, F., Dincer, I., Agelin-Chaab, M. 2014. Development of an integrated renewable energy system for multigeneration. *Energy, 78*:196–204.

Telli, A. Y. 2010. Şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız hibrit güç sistemleriyle enerji üretiminin ekonomik analizi. *Yüksek Lisans Tezi,* Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Toklu, E. 2013. Overview of potential and utilization of renewable energy sources in

Turkey. *Renewable Energy, 50*:456–463.

Tourkov, K. N. 2016. Analysis of total solar efficiency of biomass, solar thermal, and photovoltaic technologies and evaluation of potential improvements via combination of the technologies. *Ph.D. Thesis*, Department of Mechanical Engineering, University of Pittsburgh, USA.

Ulleberg, O. 1998. Stand-alone power systems for the future: Optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems. *Ph.D. Thesis*, Department of Thermal Energy and Hydropower, Norwegian University of Science and Technology, Norway.

Ulleberg, Ø. 2003. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, *28*(1):21–33.

Ulleberg, Ø., Glöckner, R. 2001. HYDROGEMS: Hydrogen Energy Models. https://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnlib/hydrogems/hydrogems.pdf (Erişim tarihi: 10.01.2021)

Valencia, G., Benavides, A., Cárdenas, Y. 2019. Economic and environmental multiobjective optimization of a wind-solar-fuel cell hybrid energy system in the Colombian Caribbean region. *Energies, 12*(11).

Yamankaradeniz, N. 2016. Thermodynamic performance assessments of a district heating system with geothermal by using advanced exergy analysis. *Renewable Energy*, *85*:965–972.

Yeşilata, B., Bulut, H., Çetiner, C., Ersavaş, A. 2011. Termal güneş enerjisi teknolojileri ve GAP bölgesine yönelik fırsatlar. *Mühendis ve Makine,* 52(622):47-56.

Yiğit, A., Atmaca, A. 2010. Güneş Enerjisi, Alfa Aktüel Yayınları, ISBN:978-975-253 16-3.

Yilanci, A., Dincer, I., Ozturk, H. K. 2009. A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, *35*(3):231–244.

Yilanci, Ahmet. 2008. Güneş Hidrojenli Bir Sisteminin Kurulmasi Ve Performansini Analizi. *Doktora Tezi,* Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

Yilmaz, S., Ozcalik, H. R., Aksu, M., Karapınar, C. 2015a. Dynamic Simulation of a PV-Diesel-Battery Hybrid Plant for Off Grid Electricity Supply. *Energy Procedia*, *75*:381–387.

Yilmaz, S., Karatutlu, A., Kekec, C. 2015b. Designing a PLC-Based Real-Time Sun Tracking System. *International Journal of Scientific and Technological Research.* 5(1):24-31.

Yüksel, B., Aslan, A., Akyol, T. 2012. Investigation of seasonal variations in the energy and exergy performance of the Gonen geothermal district heating system. *Applied Thermal Engineering, 36*:39–50.