

YEKSEM ÖZEL SAYI'21

Sayı/Number: Özel Sayı Cilt/Volume: 11
Yıl/Year: 2021

Yayın Sahibi

TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası Adına
Bülent PALA

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Can İNCEBİYİK

Yayın İdare Merkezi

Ihlamur Sokak No:10 Kat:3
Kızılay - Ankara
Tel: (312) 425 32 72
Faks: (312) 417 38 18
<http://bilimseldergi.emo.org.tr>
bilimseldergi@emo.org.tr
EMO Üyelerine parasız dağıtılır

Sayfa Düzeni

TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

Yayın Türü

Yerel Süreli Yayın
6 ayda bir yayınlanır

Basım Adedi

500

Basım Tarihi

Aralık 2021

EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer and
Biomedical Engineering

YAYIN KURULU

BAŞ EDITÖR

Prof. Dr. Timur Aydemir

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Arif Nacaroğlu

Prof. Dr. Erhan Akın

Prof. Dr. Güven Önbilgin

Prof. Dr. H. Altay Güvenir

Doç. Dr. Özlem Özgün



TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

UCTEA/Chamber of Electrical Engineers

EMO Bilimsel Dergi Danışma Kurulu

Prof. Dr. A. Hamit Serbest	Çukurova Üniversitesi
Prof. Dr. Altay Güvenir	Bilken Üniversitesi
Prof. Dr. Cengizhan Öztürk	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Erhan Akın	Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Güven Önbilgin	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Eyüboğlu	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Timur Aydemir	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ali Hikmet Doğru	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Arif Nacaroglu	Gaziantep Üniversitesi
Prof. Dr. Atilla Bir	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Aydın Köksal	Bilişim A.Ş.
Prof. Dr. Aydoğan Özdemir	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Ayşın Baytan Ertüzün	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Belgin Türkay	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Bülent Sankur	Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Cüneyt Güzeliş	Yaşar Üniversitesi
Prof. Dr. Erdal Panayırçı	Kadir Has Üniversitesi
Prof. Dr. Erkan Afacan	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ferit Acar Savacı	İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü
Prof. Dr. H. Bülent Ertan	Atılım Üniversitesi
Prof. Dr. Haldun Karaca	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim Eksin	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İnci Çilesiz	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İrfan Karagöz	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail Hakkı Altaş	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail Hakkı Çavdar	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Kemal Leblebicioğlu	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Lale Tükenmez Ergene	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Mithat İdemem	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Muhittin Gökmen	MEF Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Aşkar	İzmir Ekonomi Üniversitesi
Prof. Dr. Müjde Güzelkaya	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Osman Eroğul	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. Oya Kalıpsız	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Özlem Özgün	Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Sermin Onaygil	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Tayfun Akgül	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Ahmet Koltuksuz	Yaşar Üniversitesi
Doç. Dr. Osman Abul	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Bora Güngören	Portakal Teknoloji
Fikret Küçükdeveci	TEPA
Hasan Ali Pazar	Siemens

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

MS (Mustafa Sahin) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli ve Bazı Önemli Yetenekleri MS (Mustafa Sahin) Bladed Wind Turbine Simulation Model and Some Important Capabilities <i>Mustafa ŞAHİN</i> Makale Türü: YEKSEM 2019 Özel Sayı Makalesi	7
Deniz Suyu Kaynaklı Isı Pompası ile Sıhhi Sıcak Su Temini Uygulamasında Solar Fotovoltaik Desteğinin İncelenmesi Investigation of Solar Photovoltaic Support in Sanitary Hot Water Supply Application with Sea Water Source Heat Pump <i>Gülsüm ÇENGEL, Adile Şenel, Sezgi KOÇAK SOYLU, İbrahim ATMACA</i> Makale Türü: YEKSEM 2019 Özel Sayı Makalesi	21
Çatı Üstü Termal ve Elektrik Enerjisi Üretimine Ekonomik ve Çevresel Getirilerinin Araştırılarak Optimal PV-T Tasarımı Optimal PV-T Design Based On Investigation of Economic and Environmental Benefits of Rooftop Solar Thermal and Electrical Energy Generation <i>Serdar UYAR, Dr.Öğr.Ü. Atabak NAJAFI</i> Makale Türü: YEKSEM 2019 Özel Sayı Makalesi	29
REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri REZES Internet of Things Based Recycling Application Systems <i>Sezer UĞUZ, Gül TOKDEMİR</i> Makale Türü: YEKSEM 2019 Özel Sayı Makalesi	39
Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminde Yenilenebilir Kaynakların Artan Payı ve Puant Anlarına Katkıları; 2018 Yılı Analizi <i>Hacer ŞEKERCİ ÖZTURA, Sezai POLAT</i> Makale Türü: YEKSEM 2019 Özel Sayı Makalesi	49
Fotovoltaik Enerjinin Sulama Amaçlı Uygulama İçin Kurulacak Bir Sistemin Sayısal Tasarımı ve Model Çalışması Numerical Design & Modelling Study of Photovoltaic Energy System For Irrigation Applications <i>Volkan PEREN, Feriha Erfan KUYUMCU, Çiğdem GÜNDOĞAN TÜRKER</i> Makale Türü: YEKSEM 2019 Özel Sayı Makalesi	59
Fv Güç Santrallerinin Elektrik Şebekesine Harmonik Etkisinin Modellenmesi ve Analizi Modeling and Analysis of Harmonic Effect of Photovoltaic Power Plants on the Electricity Network <i>Halil İbrahim AYDINÖZ</i> Makale Türü: YEKSEM 2019 Özel Sayı Makalesi	67
Güneş Enerjisi Santrallerinde Elektromanyetik Alan Seviyeleri ve Mesleki Maruziyet Analizi Electromagnetic Field Levels and Occupational Exposure Analysis in Solar Power Plants <i>Merve BEDELOĞLU, Niyazi İL, Kayhan ATEŞ, Şükrü ÖZEN</i> Makale Türü: YEKSEM 2019 Özel Sayı Makalesi	77
Türkiye Elektrik Enerjisi Görünümü ve Yenilenebilir Enerjinin Global Ölçekte Mevcut Konumu Turkish Electric Energy Outlook and the Current Position of Renewable Energy on a Global Scale <i>Ergin KAYAR, Niyazi İL, Hamza Feza CARLAK</i> Makale Türü: YEKSEM 2019 Özel Sayı Makalesi	85

MS (Mustafa Sahin) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli ve Bazı Önemli Yetenekleri

MS (Mustafa Sahin) Bladed Wind Turbine Simulation Model and Some Important Capabilities

Mustafa Şahin 

Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi
(RÜZGEM)
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
musahin@metu.edu.tr

Öz

Bu çalışma, pal elemanı momentum (BEM) teorisi üzerine kurulan MS (Mustafa SAHİN) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modelinin tanıtılması, özellikleri ve bazı önemli yeteneklerinin uygulamalarla göstermek amacıyla hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli, Türbin Performans Tahmini, Türbin Kontrolü ve Simülasyonları

Abstract

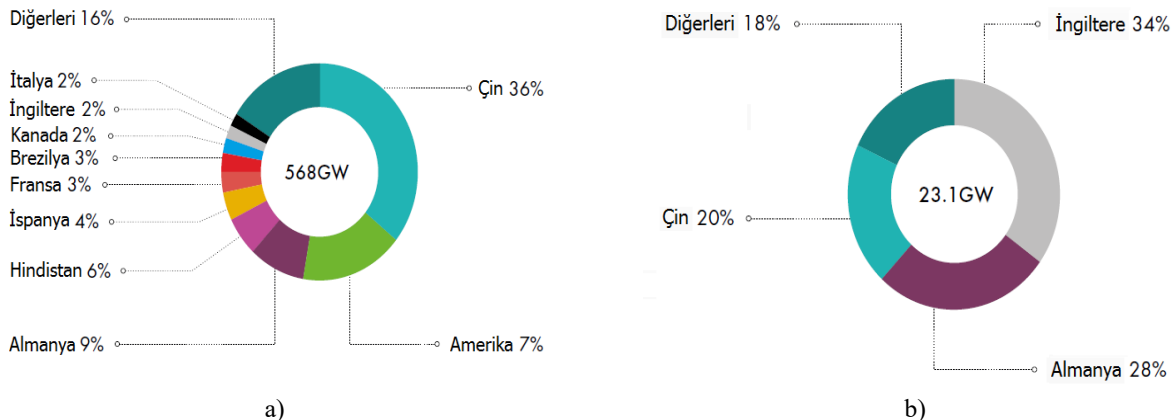
This study aims to introduce MS (Mustafa SAHİN) Bladed Wind Turbine Simulation Model which is based on Blade Element Momentum (BEM) Theory and its capabilities with some example applications.

Keywords: MS Bladed Wind Turbine Simulation Model, Turbine Performance Prediction, Turbine control and Simulations.

1. Giriş

Günümüzde, rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisinin üretimi oldukça popülerdir. Dünyada rüzgar türbinlerinin toplam kurulu gücü, her geçen yıl artmaktadır. GWEC'in en güncel verilerine göre, rüzgar türbinlerinin dünya çapında toplam kurulu güç kapasitesi, 600.000 MW'a yaklaşmıştır[1].

Rüzgar türbinlerinin kullanımını arttıran etkenlerin başında, rüzgar enerjisinin oldukça temiz, bol, tamamen masrafsız olması ve başka ülkelere enerji bağımlılığını ortadan kaldırması gelmektedir. Bu nedenle, günümüzde pek çok ülke, rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamaktadır. Bu elektrik enerjisi üretim yöntemi, karada olduğu gibi, denizde de hızla yaygınlaşmaktadır. Günümüz itibarıyla, 90'dan fazla ülke, elektrik enerjisi üretiminde rüzgar türbinlerini kullanmaktadır. Bu ülkelerin 30 tanesi 1000 MW'tan, 9 tanesi ise 10000 MW'tan daha fazla toplam kurulu güç kapasitesine sahiptir. Şekil 1'de verilen rüzgar türbinini toplam kurulu güç kapasitelerinin ülkelere dağılımı incelendiğinde, Çin, bu ülkelerin en başında yer aldığı, ardından sırasıyla Amerika, Almanya ve Hindistan geldiği anlaşılmaktadır. Türkiye, 7,370 MW'lık toplam kurulu güç kapasitesine sahip olup, Şekil 1'den de anlaşılacağı üzere, dünyada ilk on ülke içinde yer alamamaktadır[1]. Kara tipi rüzgar türbinlerinde önderliği Çin üstlenirken, deniz tipi rüzgar türbinlerinde ise, önderlik İngiltere'nindir. 2018 yılı içinde yeni kurulan türbin kurulu güç kapasitelerinde bile, yukarıda belirtilen ülkelerin sıralaması değişmemiştir. Çin 21,200 MW'lık kurulu güç kapasitesi ile önderliğini sürdürmektedir. Amerika ise, 7,588 MW'lık güçle ikinci, Almanya 2,402 MW'lık güçle üçüncü, Hindistan ise, 2,191 MW'lık güç ile dördüncü sıradadır. Bu durum, bu



Şekil 1: Dünyada toplam kurulu güç dağılımı, a) Kara tipi rüzgar türbinini b) Deniz tipi rüzgar türbinini[1]

ülkelerin rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisi üretimini bir hayli önemseydiği ve sürekli olarak mevcut kurulu güç kapasitelerini artırma eğiliminde olduğunu göstermektedir[1]. Aynı şekilde, Fransa, Brezilya, Kanada ve diğer pek çok ülke de, rüzgar türbinlerine olan yatırımlarına devam etmektedir.

Sonuçta, dünya ülkelerince bu kadar önemsenen rüzgar türbin teknolojilerinin, daha da üst seviyelere çıkarılması için bilimsel araştırmaların da, aralıksız devam etmesi gerekmektedir. Bu araştırma alanlarının önemli bir kolu, rüzgar türbinlerinin simülasyon modellerinin geliştirilmesidir. Bu çalışmanın amacı, günümüz rüzgar elektrik santrallerinde (RES) sıklıkla kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin (Şekil 2) simülasyonları için geliştirilen MS (Mustafa ŞAHİN) Bladed adındaki bir rüzgar türbin simülasyon modelini tanıtmak ve bu türbin modelinin bazı önemli yeteneklerini uygulamalarla göstermektir.

MS Bladed Modeli, pal eleman momentum (BEM) teorisine dayalı olup, Matlab ve Simulink programları kullanılarak geliştirilmiş yatay eksenli rüzgar türbin simülasyon modelidir. Bu model aracılığıyla, sahada çalışan yatay eksenli rüzgar türbinini, bir nevi bilgisayar ortamına taşınmıştır. MS Bladed Modeli, temelini aldığı BEM teorisinin yanında, çeşitli aerodinamik düzeltme formülleri ve özel koordinat sistemlerine ihtiva ederek, modern bir rüzgar türbin sistemini simüle edecek şekilde geliştirilmiştir. Türbin modelinin aerodinamik hesaplamaları, literatürde bulunan PROP(ID) kodu [2], Wt_Perf [3] ve AeroDyn [4] gibi pal elemanı momentum teorisini içeren programlar ile benzerlik göstermektedir. MS Bladed Modelindeki türbin sistemi, türbin rotoru, dişli kutusu ve değişken tork üretebilen bir elektrik jeneratöründen oluşmaktadır.

MS Bladed Modeli sayesinde, tasarımı tamamlanmış rüzgar türbinleri, üretilmeden önce farklı çalışma koşullarında sergileyecekleri performanslar, önceden tahmin edilebilir. Bu çalışma koşulları, farklı rüzgar hızları ve yoğunlukları, kanat yunuslama açıları, nasele eğim ve rotor koni açıları, rotor hızları/devirleri vb. olabilir. MS Bladed Modeli ile yapılacak olan simülasyonlardan sonra, türbin üzerinde herhangi bir değişiklik gerekiyorsa, üretilmeden önce türbin

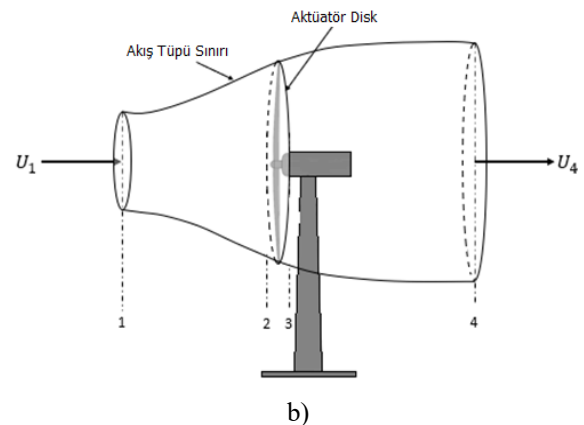
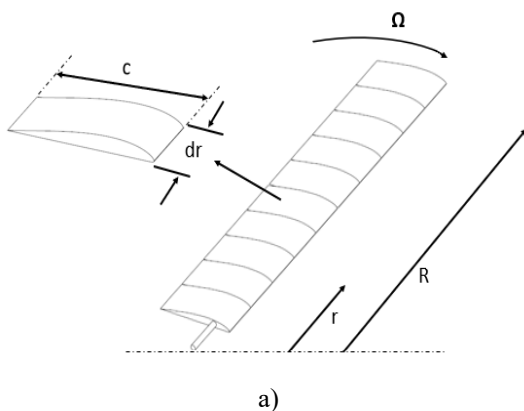
tasarımda düzeltilmeye gidilebilir. Ayrıca, MS Bladed Modeli ile, çeşitli rüzgar türbin kontrolcülerinin (jeneratör tork kontrol, kanat yunuslama açısı kontrol gibi vb.) tasarımları ve simülasyon testleri de gerçekleştirilebilir. Yeni kontrol algoritmaları geliştirilebilir ve MS Bladed Modeli aracılığıyla türbin ait önemli parametreler zaman bağılı olarak izlenebilir.



Şekil 2: Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinini[5]

Mevcut MS Bladed Modelinde, türbin kanatları, türbin şaftları gibi yapısal parçalar, esnemeyen yapı olarak varsayılmaktadır. İleriki sürümlerinde, özellikle de kanatların esnekliğinin etkisi de, MS Bladed Modeline yansıtılması planlanmıştır.

İlerleyen kısımlarda, MS Bladed Modelinin çalışma mantığına, özelliklerine ve modelin bazı önemli yetenekleri uygulamalarla açıklanacaktır. MS Bladed Modeli ile ilgili daha fazla bilgi, [5]–[7] numaralı kaynaklardan temin edilebilir.



Şekil 3: Pal elemanı momentum (BEM) teorisi,

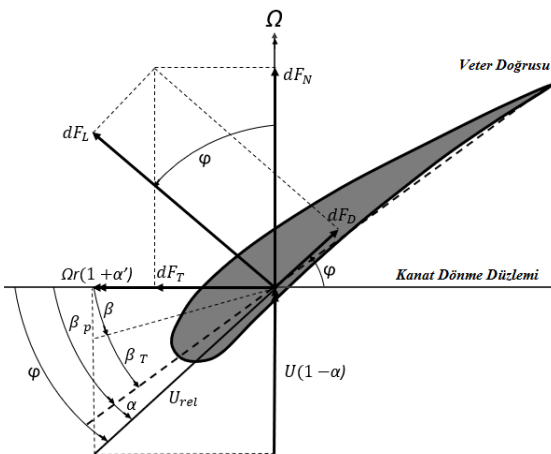
a) Türbin kanatların parçalara ayrılması, b) Rüzgar türbininin aktüatör disk olarak düşünülmesi

2. MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli

MS Bladed Modeli, pal elemanı momentum (BEM) teorisi üzerine kurulmuştur. Bu teori, türbinin çoğu çalışma bölgesinde, türbin performansını doğru tahmin edemez. Örneğin; BEM teorisinin geçerli olabilmesi için, hava akışının türbin rotor kanatlarının dönmesiyle oluşan rotor diskinde dik bir şekilde gelmesi gerekir. Ayrıca, türbin çalışması esnasında, türbin rotoru türbülanslı akım izi durumuna düşmemelidir. Ancak, rüzgar türbinleri sahada çalışırken, hava akışı türbin rotoruna belirli bir sapma açısıyla gelebilir veya türbin rotoru türbülanslı akım izi durumunda çalışabilir. Bu gibi durumlarda, türbin davranışını doğru tahmin edebilmek için, BEM teorisine bazı aerodinamik düzeltme formüllerinin de eklenmesi gereklidir. Aşağıda, MS Bladed Modelinin hesaplamalarında faydalandığı pal elemanı momentum (BEM) teorisi, aerodinamik düzeltme formülleri ve model geliştirmesinde kullanılan özel koordinat sistemleri kısaca açıklanmıştır.

2.1. Pal Elemanı Momentum (BEM) Teorisi

Pal elemanı momentum (BEM) teorisi, pal elemanı ve momentum teorilerinin beraberce kullanılmasından ibarettir. Pal elemanı teorisinde, türbin kanatları parçalara ayrılarak (Şekil 3-a), kanatlarının her bir parçasındaki aerodinamik yükler, o kısımda bulunan kanat parçası etrafındaki yerel hava akışına bağlı olarak hesaplanır (Şekil 4). Her bir kanat parçasından elde edilen aerodinamik yükler, daha sonra türbin rotoru tarafından üretilen itki ve tork miktarlarının hesaplanmasında kullanılır. Momentum teorisinde ise, rüzgar türbinini bir akış tüpü içinde dönen dairesel bir aktüatör disk gibi düşünülür (Şekil 3-b) ve türbinden üretilen itki kuvveti ve tork değerleri, sırasıyla doğrusal ve açısal momentum korunumu yasaları ile elde edilir [8].



Şekil 4: Bir kanat parçasındaki aerodinamik yükler ve özel açılar [5].

Bu iki teorisinin beraber kullanılması ile, eksenel ve teğetsel indüksiyon faktörleri iterasyon yöntemi ile hesaplanır. Bu sayede, eksenel ve teğetsel indüksiyon hızları da elde edilmiş olur. Daha sonra, bir türbin kanat kısmından alınan aerodinamik kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri tespit edilir (Şekil 4). Bu kuvvetlerin gerekli dönüşümleri yapıldıktan sonra, türbin kanatları boyunca toplanması ile türbin rotorundan alınan toplam tork ve itki kuvvetleri hesaplanır. Rotor hızının da, işleme katılmasıyla birlikte, türbinden elde edilen güç hesaplanır. Yukarıda bahsedilen iterasyon yöntemi ile ilgili detaylı bilgiler, [5]–[7] numaralı kaynaklarda mevcuttur.

Ancak, önceden de belirtildiği üzere, türbin modelinden doğru tahmin alınabilmesi için BEM teorisine bazı aerodinamik düzeltme formüllerinin de, eklenmesi gerekir. MS Bladed Modelinde, türbin rotorunun türbülanslı akım izi durumunda çalışmasını modelleyebilmek için Spera'nın düzeltme formülü (4) kullanılmıştır. Ayrıca, MS Bladed Modelinde, türbin rotor kanatlarının kök ve uç kısımlarında hava girdapları sonucu ortaya çıkan aerodinamik kayıplar da modellenmiştir. Örneğin; rotor kanatlarının ucunda oluşan kayıplar için Prandtl uç kayıp faktörü (7) kullanılmıştır. Ayrıca, türbin rotor diskinin rüzgara göre belirli bir açıda çalışması sonucu ortaya çıkan bükülmüş akım izinin rotor performansına etkisi de, MS Bladed Model'e Pitt ve Peters'in formülünün (8) yanı sıra, Burton'un formülü (9) kullanarak yansıtılmıştır. Bunların dışında, MS Bladed Modeline rotor koni açısı, nasel eğim açısı, kanat yunuslama ve nasel sapma açısı gibi sabit veya değişken yapısal açıların da kazandırılabilmesi için sapma hizalı, rotor göbeği hizalı, kanat hizalı, rüzgar hizalı koordinat sistemi gibi vb. çeşitli özel koordinat sistemleri de eklenmiştir. MS Bladed Modelinde, denklem (1) ve (2) kullanılarak, her bir kanat parçasının ürettiği kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmaktadır. Anlaşılacağı üzere, her bir kanat parçasının gördüğü etkin hava hızı, denklem (3) ile belirlenmiştir. Bu hava hızına, türbin sapma, rotor koni, azimut açısı gibi vb. sabit ve zamanla değişen açıların da, etkisi bulunmaktadır.

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho V_{ef}^2 C_l c dr \quad (1)$$

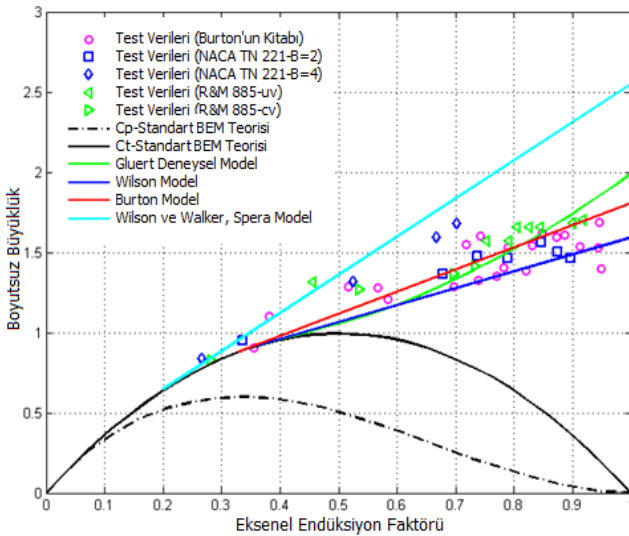
$$dF_D = \frac{1}{2} \rho V_{ef}^2 C_d c dr \quad (2)$$

$$V_{ef} = \sqrt{(V_{bx}(1-a))^2 + (V_{by}(1+a'))^2} \quad (3)$$

Aşağıda, MS Bladed Modelinde kullanılan aerodinamik düzeltme formülleri ve özel koordinat sistemleri kısaca açıklanmıştır.

2.2. Türbülanslı Akım İzi Durumunda Türbin Çalışmasının Modellenmesi

Doğrusal momentum teorisi, aksel indüksiyon faktörünün 0,5'in üzerine çıkması durumunda, geçersiz olur. Ancak, bu kritik değer, uygulama da modelden modele değişiklik gösterebilir (Şekil 5). Bu faktör değerinin kritik değeri aşarak, 1 değerine doğru yaklaşması durumunda, türbin rotorunun türbülanslı akım izi durumunda çalışmakta olduğu anlaşılır. Çünkü yüksek aksel indüksiyon faktörü, türbin rotorunun arka kısmında türbülanslı hava akımlarının oluştuğu anlamındadır. Bu durum, türbin rotorunun çok yüksek uç hız oranlarında çalıştığında meydana gelmektedir. Uç hız oranı arttıkça, türbin rotoru hava akışına, sanki bir disk duvar gibi davranmaya başlayarak, hava akışının türbin rotor kanatlarını geçmesini zorlaştırır. Bu durum sonucunda, türbin rotor diskinin orta kısmında bir durma noktası meydana gelir. Bu noktada, hava akışının statik basıncı oldukça yüksektir. Türbine gelen hava, türbin kanatlarını geçmede zorlanır ve türbin kanatlarından dışarı doğru radyal olarak akarak bir sınır tabakayı oluşturur. Bu sınır tabaka da, türbin rotor diskinin kenarlarından ayrılır. Bu olay, türbin rotorunun arkasında kalan bölgede, statik basınç değerinde bir azalmayı da beraberinde getirir. Bu azalma miktarı, uç hız oranı ve sonucunda aksel indüksiyon faktörünün artmasıyla artar. Sonuçta, türbin rotor diskinin ön kısmında statik basınç değerinin yüksek, arka kısmında da az olması, türbinin itki katsayısının, C_t , pal elemanı momentum teorisi ile tahmin edilen değerden çok daha yüksek bir değere ulaşması ile sonuçlanır.



Şekil 5: Türbülanslı akım izi durumunda uydurulmuş çeşitli modeller[5].

Literatürde, türbinin yüksek aksel indüksiyon faktörü ile çalışmasını modelleyebilmek için birden fazla deneysel düzeltme formülü, farklı bilim adamları tarafından önerilmiştir. Bu modellerin bazıları, Şekil 5'te

görülmektedir. Birden fazla modelin ortaya çıkmasının nedeni, bu bölgede farklı rotordan alınan deneysel verilerin birbirinden oldukça farklı değerlerde olması ve belirli bir trende sahip olmamasıdır. MS Bladed Modelinde, türbinin yüksek aksel indüksiyon faktörü ile çalışması durumunda, BEM teorisinin tahminini düzeltmek için denklem (4) ile verilen Spera'nın düzeltme formülü kullanılmıştır[9], [10].

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \quad (4)$$

Denklemden 4'deki K değerinin elde edilmesi ise, denklem (5) ile gerçekleştirilmiştir.

$$K = \frac{4F \sin^2 \varphi}{\sigma C_n} \quad (5)$$

2.3. Kanat Kök ve Uç Kayıplarının Modellenmesi

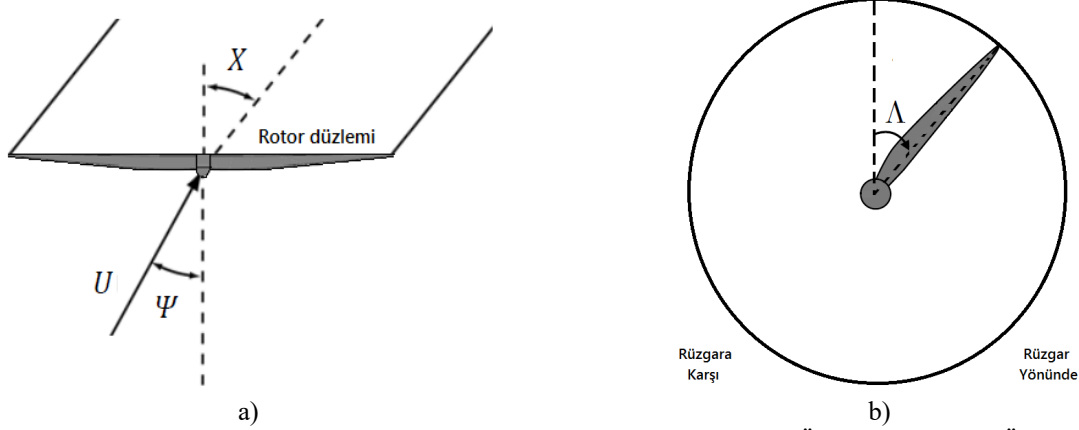
Pal elemanı momentum (BEM) teorisinde, türbin rotor kanatlarının kökünde ve uç kısımlarında meydana gelen, hava girdaplarının oluşturduğu aerodinamik kayıplar da, hesaba katılmaz. Gerçek rüzgar türbinlerinde, türbin kanatlarının uç kısımlarında, kanatlar son bulduğu için, kanatların yüksek basınç yüzeylerinden düşük basınç yüzeyine doğru bir hava akışı meydana gelerek, kanat ucu girdaplarını oluşturur. Benzer bir olay da, kanatların kökünde, rotor göbeği etrafında meydana gelir. Bu bölgedeki girdaplar da, kök girdapları olarak adlandırılır. MS Bladed Modelinde, kanatların ucunda girdaplardan dolayı oluşan kayıpları hesaba katmak için, Prandtl uç kayıp faktörü formülü (6) kullanılmıştır. Kanatların kök kısmındaki kayıplar için ise, bu formüle benzer bir formülden (7) faydalanılmıştır[4].

$$F_{uç} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin \varphi}} \right) \quad (6)$$

$$F_{kök} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{r - R_{göbek}}{r \sin \varphi}} \right) \quad (7)$$

2.4. Bükülmüş Akım İzinde Türbin Çalışmasının Modellenmesi

Pal elemanı momentum teorisinde, rüzgarlı havanın türbin rotor diskine dik olarak aktığı varsayılır. Ancak, büyük gövdeli gerçek rüzgar türbinlerinde, türbin rotoru kulenin üst kısmına belirli bir nasel/rotor shaftı eğim açısı ile montajlıdır. Bu durumda, türbinden ayrılan akım izi bükülmekte ve türbin rotorunun aerodinamik performansı etkilenmektedir. Benzer bir durum, türbin rotorunun karşıdan gelen rüzgara göre herhangi bir nasel sapma açısında çalışması ile de, oluşmaktadır. Modern



Şekil 6: Bükülmüş akım izinde türbin çalışmasında kullanılan koordinatlar, a) Üstten görünüş, b) Önden görünüş

büyük gövdeli rüzgar türbinleri, hem belirli bir nasel eğim açısına sahiptir, hem de türbin çalışması esnasında, türbine gelen rüzgar ile türbin rotor diskine dik olan eksenle arasında, bir sapma açısı oluşabilmektedir. Bu tür nedenlerden dolayı, rotor diski ile karşıdan gelen rüzgar arasındaki diklik şartı bozulur ve BEM teorisi geçersiz olur. Bu durumları ortadan kaldırmak için, MS Bladed Modelinde, Pitt ve Peters'in formülünün (8) yanı sıra, Burton'a ait akım izinin bükülme açısını tahmin eden matematiksel ilişki (9) kullanılarak modelin bükülmüş akım izi ile çalışması durumunda rotor performansının daha doğru tahmin edilmesi sağlanmıştır[4], [5]. Şekil 6'da bükülmüş akım izinde türbin çalışmasında kullanılan koordinatlar görülmektedir.

$$a_{bükülme} = a \left(1 + \frac{15\pi r}{32 R} \tan \frac{X}{2} \sin \Lambda \right) \quad (8)$$

$$X = (0.6a + 1)\Psi \quad (9)$$

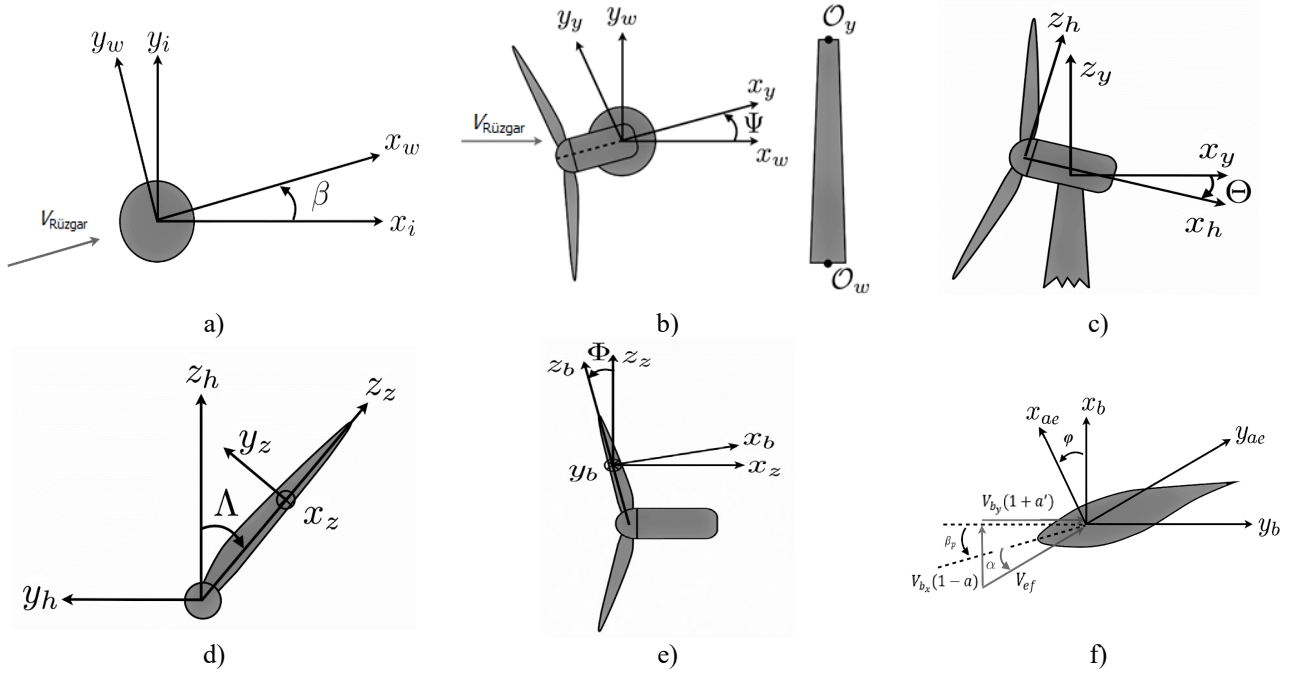
Geliştirilen MS Bladed Modeline, rüzgarın özellikleri (seviyesi ve yoğunluğu), türbin ve rotor kanatlarının özellikleri (koni açısı, eğim açısı, kanat veter uzunluğu ve burkulma açısı dağılımları), kanat tasarımında kullanılan kanat kesitlerinin aerodinamik katsayıları, girdi olarak verilirse, çıktı parametreleri olarak, türbin rotorunun ürettiği tork, itki, güç ve bunların katsayılarının yanında, türbin ile ilgili, uç hız oranı, her bir kanada ait pek çok parametre, modelden alınabilir. Ayrıca, her bir kanat parçasındaki aksenal ve teğetsel indüksiyon hızları, akış açısı, kanat kök ve uç kayıp faktörlerinin değerleri, toplam kayıp faktörü değeri, kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin miktarları ve katsayıları gibi vb. parametrelerin değerleri, MS Bladed Modeli ile elde etmek mümkündür.

2.5. MS Bladed Model'inde Kullanılan Koordinat Sistemleri

MS Bladed Modelinin geliştirilmesinde, aerodinamik düzeltme formüllerinin yanı sıra, özel koordinat sistemlerinden de faydalanılmıştır. Kullanılan bütün koordinat sistemleri sağ el koordinat sistemleri olup, şunlardır.

- Atalet koordinat sistemi
- Rüzgar hizalı koordinat sistemi
- Sapma hizalı koordinat sistemi
- Rotor göbeği hizalı koordinat sistemi
- Azimut hizalı koordinat sistemi
- Kanat hizalı koordinat sistemi
- Aerodinamik koordinat sistemi

Atalet hizalı koordinat sistemi ile rüzgar hizalı koordinat sistemi türbin kulesinin zemininde bulunmaktadır. Bu koordinat sistemlerinin merkezleri birbirine çakışmıştır. Ayrıca, bu koordinat sistemlerine ait z_i ve z_w eksenleri de çakışık olup, türbin kulesinin tepesini göstermektedir. Atalet koordinat sisteminin x_i eksenini herhangi bir yönü gösterebilir ancak, uygun olan yön rüzgarın geldiği yöndür. Rüzgar hizalı koordinat sisteminin x_w eksenini rüzgarın geldiği yönü göstermektedir. Sapma hizalı koordinat sistemi, kulanın üst orta kısmında yer almakta olup, nasel ile birlikte, sağa sola hareket etmektedir. Bu koordinat sisteminin z_y eksenini, bir önceki koordinat sistemleri ile aynı olup, yukarı doğrudur. Rüzgar ile sapma hizalı koordinat sistemlerinin x_w ve x_y eksenleri arasında kalan açı, türbinin nasel sapma açısına (Şekil 7-b) karşılık gelir. Rotor göbeği koordinat sisteminin merkezi, rotor göbeğinin merkezine sabit ve rotor ile dönmemektedir. Ancak, nasel sapma açısı kadar koordinat sisteminin merkezi sağa sola hareket etmektedir. Sapma hizalı koordinat sisteminin x_y eksenini



Şekil 7: MS Bladed Modelinin kullandığı koordinat sistemleri, a) Atalet ve rüzgar hizalı koordinat sistemleri, b) Rüzgar ve sapma hizalı koordinat sistemleri, c) Sapma ve rotor göbeği hizalı koordinat sistemleri, d) Rotor göbeği ve azimut hizalı koordinat sistemleri, e) Azimut ve kanat hizalı koordinat sistemleri f) Kanat ve aerodinamik koordinat sistemleri[5].

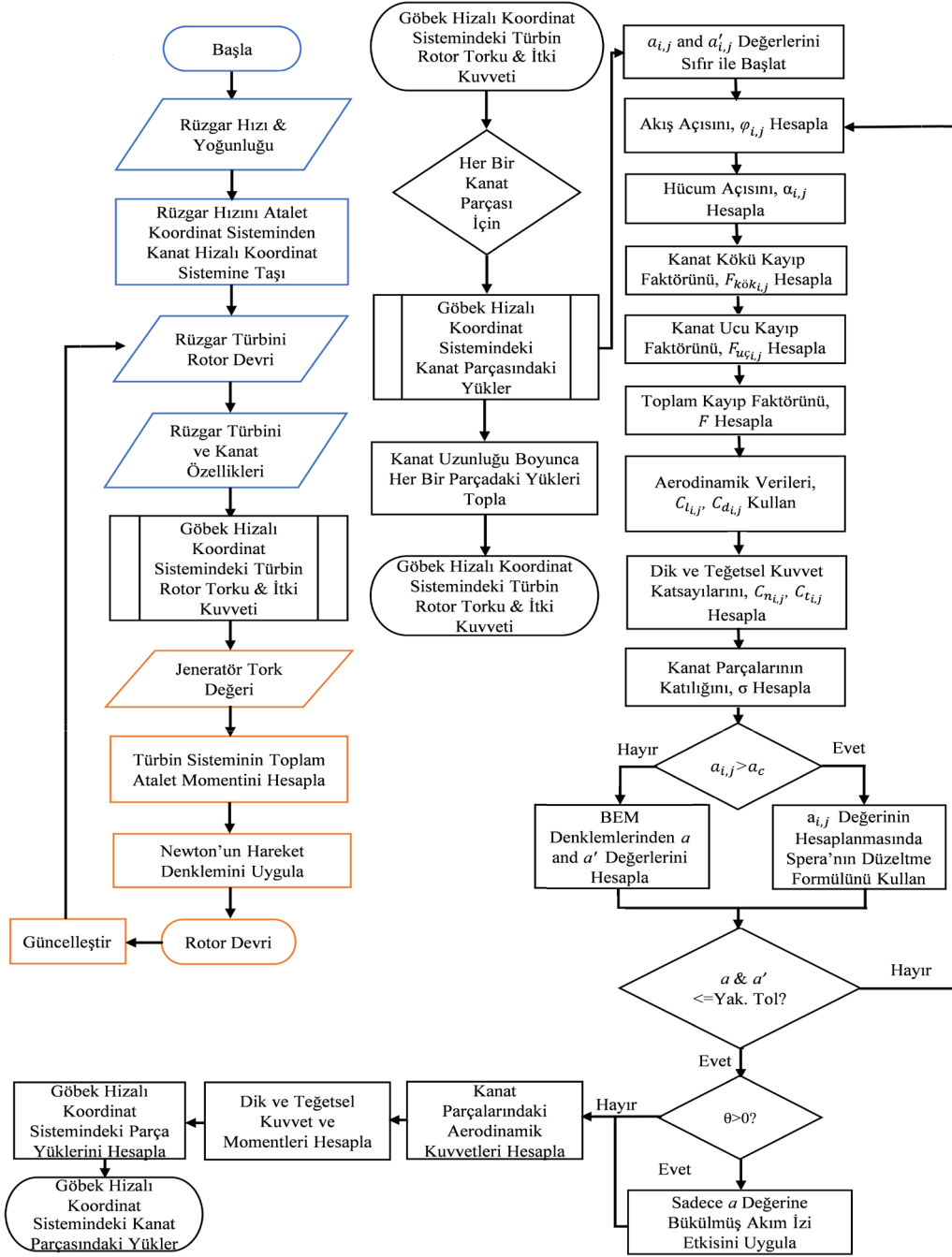
ile rotor göbeği hizalı koordinat sisteminin x_h ekseninde kalan açı nasel eğim açısıdır (Şekil 7-c). Türbinde, Şekil 7-c'deki gibi, naselin yukarıya doğru kaldırılarak bir eğim açısının verilmesi pozitif değerli bir eğim açısına karşılık gelir. Azimut hizalı koordinat sistemi, her bir kanat parçasının merkezine sabitlenmiş olup, ilgili kanat parçası ile beraber dönmektedir (Şekil 7-d). Azimuth açısı düz kanatlar için her bir kanat parçasında aynı iken, diğer farklı geometrik kanatlarda değişiklik gösterebilir. Kanat hizalı koordinat sistemi de, aynı şekilde her bir kanat parçasında bulunmakla birlikte, kanat kesitlerinin $c/4$ noktasında yer almakta ve kanatla beraber rotorun dönme yönünde dönmektedir. Azimuth ve kanat hizalı koordinat sistemi arasında kalan açı türbinin rotor koni açısıdır. İleri teknolojik tasarımlara sahip türbin kanatları kanat açıklığı boyunca değişen koni açılara sahip olabilir. Aerodinamik koordinat sistemi (Şekil 7-f) ise, aerodinamik kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerin tanımlandığı, kanat parçası ile birlikte dönen koordinat sistemidir. Bu koordinat sistemi, her bir kanat parçasının merkezinde yer almaktadır. Anlaşılacağı üzere, MS Bladed Modelinde, özel koordinat sistemlerinin kullanılmasıyla, modelde sapma açısı, rotor koni açısı gibi vb. açıların da tanımlanabilmektedir. Koordinat sistemleri ve dönüşüm matrisleri ile ilgili daha fazla bilgi [5], [11] numaralı kaynaklardan edinilebilir. Sonuç olarak, BEM teorisi, aerodinamik düzeltme formülleri ve özellikle koordinat sistemleri sayesinde türbin sistemi, bir nevi üç boyutlu olarak modellenmiştir. MS Bladed Model'de, türbin sistemi, türbin rotorunun aerodinamik torqu, dişli

kutusunun dönüştürme oranı, değişken tork üretebilen basit bir elektrik jeneratörünün elektromanyetik torqu düşünülerek, (10) ve (11)'de verilen denklemler üzerine kurularak, dinamik bir türbin sistemi oluşturulmuştur.

$$J_t \dot{\Omega} = \tau_{aero} - \tau_{jen} \quad (10)$$

$$J_t = J_{rotor} + N_{dişli}^2 J_{jen} \quad (11)$$

Şekil 8'de MS Bladed Modeline ait akış şeması verilmiştir. Akış şemasında, mavi renkle gösterilen kısım rüzgar, rüzgar türbini ve rotor özelliklerini içermektedir. Örneğin, rüzgarın hızı ve yoğunluğu, rotor koni açısı, kanat burkulma açısı dağılımı gibi vb. Siyah renkli olarak gösterilen kısım, türbinden alınan tork ve itki kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan kısımdır. Turuncu renkle verilen kısım ise, türbin sisteminin dinamikleştirilmesi için kullanılmıştır. Akış şemasından da, anlaşılacağı üzere a aksel indüksiyon faktörünü, a' , teğetsel indüksiyon faktörünü, φ akış açısını, α hücum açısını, $F_{kök}$ kök kayıp faktörünü, $F_{uç}$ uç kayıp faktörünü, F toplam kayıp faktörünü, C_l ve C_d kaldırma ve sürüklenme katsayılarını, C_n ve C_t dik ve teğetsel kuvvet katsayılarını, σ kanat parçasının katılığını, a_c ise kritik aksel indüksiyon faktörü anlamına gelmektedir. Yukarıdaki bu parametreler her bir kanat parçasına aittir. Her bir parametrenin altında bulunan i endeksi rüzgar türbininin kaçınıcı kanadı olduğu anlamına gelirken, j endeksi ise ilgili kanadın kaçınıcı parçası olduğu anlamındadır.



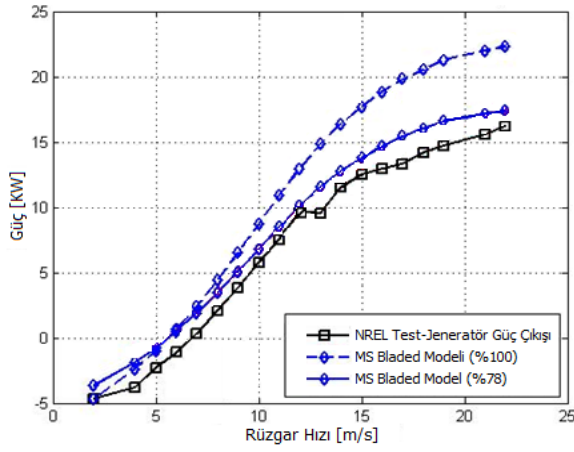
Şekil 8: MS Bladed modeli akış diyagramı

3. MS Bladed Modelinin Bazı Yetenekleri

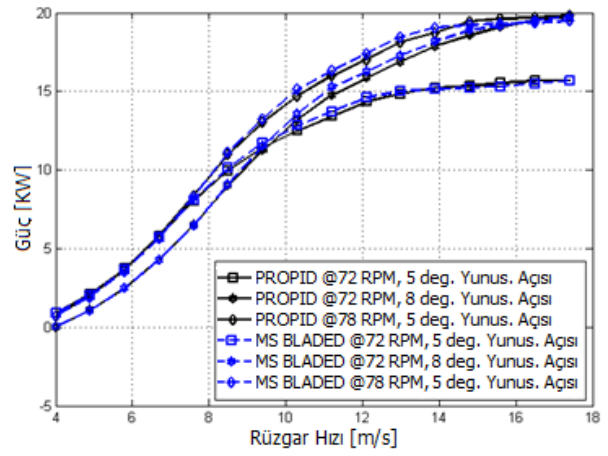
MS Bladed Modeli ile, rüzgar türbini ile ilgili olarak pek çok işlem ve uygulama gerçekleştirilebilir. Bu kısımda, MS Bladed Modeli kullanarak, yapılabilen bazı önemli uygulamalara örnek verilecektir. Bu uygulamalar şu şekilde açıklanabilir.

3.1. Türbin Güç, Tork ve İtki Eğrilerinin Tahmini

MS Bladed Modeli ile, tasarımı tamamlanmış bir rüzgar türbin kanadı kullanılarak, çeşitli sayıda kanatlara sahip rüzgar türbin rotoru oluşturularak, ilgili rotorun hangi rüzgar hızında ne kadar aerodinamik tork, güç ve itki kuvveti üreteceği kolaylıkla belirlenebilir. Bu parametrelerin rüzgara göre eğrileri oluşturulabilir.



a)



b)

Şekil 9: MS Bladed Model ile güç eğrisi tahmini,

a) NREL test verileri ve MS Bladed Modelinin tahmini, b) PROPID ile MS BLADED Modellerinin tahminleri

İstenirse, türbin rotoruna istenilen rotor koni açısı veya nasele (rotor) eğim açısı da tanımlanabilir. Şekil 9-a'da, NREL Faz II deneysel türbini için MS Bladed Modelinin güç eğrisi tahmini ile NREL tarafından bu türbin için saha testlerinde elde edilen güç verileri yer almaktadır. Faz II deneysel türbini, herhangi bir nasele eğim açısına sahip olmasa da, 3,25 derecelik bir rotor koni açısına sahiptir[12]. MS Bladed Modelinde, bu türbine ait güç tahminleri yapılırken (Şekil 9-a), rotor koni açısının değeri de, modelde tanımlanmıştır. Şekildeki siyah kare desenli çizgiler, NREL'in sahada elde ettiği deney sonuçlarıdır. Mavi kesik çizgili elmas desenli sonuçlar ile yine mavi düz çizgili elmas desenli sonuçlar, MS Bladed Modelinin tahmin ettiği sonuçlardır. Mavi düz çizgili elmas desenli sonuçlar ile NREL'in deney sonuçları olan siyah düz çizgili kare desenli sonuçlar birbirine bütün rüzgar hızları boyunca yakındır. MS Bladed Modeli tahminlerini yaparken, mekanik ve elektriksel kayıpları hesaplamalarına dahil etmeden, sistemi %100 verimle hesaplamaktadır. Ancak, NREL deneylerinde, türbin sisteminden alınan güç, jeneratörden alınan elektriksel güçtür. Mekanik ve elektriksel kayıplar da hesaba katıldığında, NREL'in türbin sistemi %78 verimle çalışmaktadır[12]. Bu nedenle, MS Bladed Modelinin %100 verimle tahmin ettiği mavi kesik çizgili elmas desenli sonuçlar, deneysel verilerden oldukça farklıdır. O zaman, MS Bladed Modelinden elde edilen sonuçlara, kayıplar da dahil edilirse, mavi düz çizgili elmas desenli sonuçlar elde edilir. Görüleceği üzere, türbin sisteminin verim etkisini içeren mavi düz çizgili elmas desenli sonuçlar ile, NREL'e ait deneysel veriler, birbirlerine yakın olmakla birlikte, eğrilerin trendleri de, birbirine çok benzemektedir.

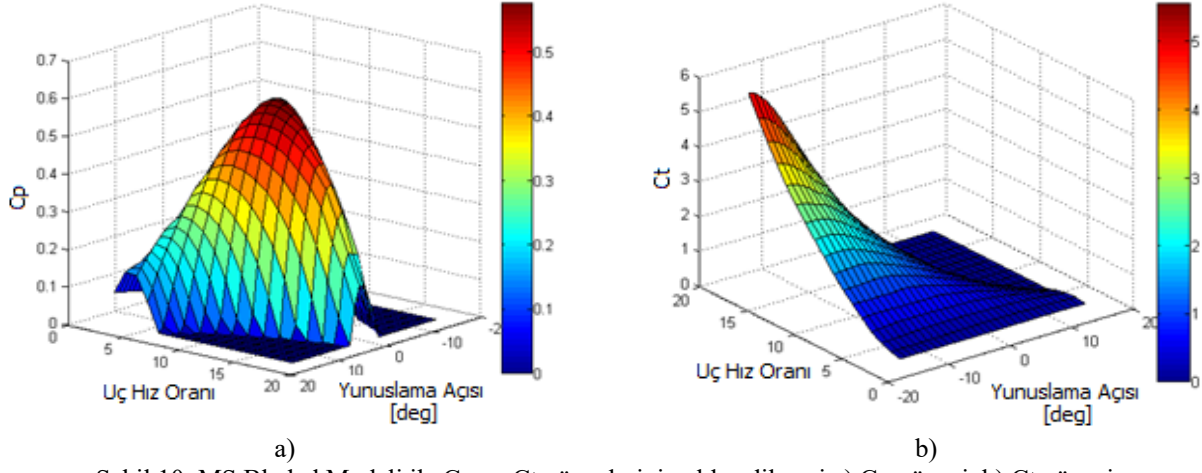
Bir diğer örnek ise, NREL Faz VI türbinin kanatlarının tasarımı esnasında kullanılan PROPID Kodu ile elde edilen güç eğrisi tahminlerinin[13], MS Bladed Modelinin tahminleri ile karşılaştırılmasıdır. Şekil 9-

b'de, NREL Faz VI türbininin uzatılmış kanatları ile oluşturulan, farklı kanat sayılarındaki türbin rotorunun, çeşitli rotor hızlarında ve kanat yunuslama açılarında çalıştırılması durumunda, PROPID Kodu ile MS Bladed Modelinin performans tahmin sonuçları bulunmaktadır. Görüleceği üzere, MS Bladed Modeli ile PROPID Kodu birbirine oldukça yakın tahminler vermektedir.

Sonuç olarak, MS Bladed Modeli, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin rotor performans tahminlerini oldukça iyi tahmin edebilmektedir. Ancak, performans sonuçlarının doğru tahmin edilmesi için rüzgar türbin rotor kanatlarında kullanılan aerodinamik profillere ait deneysel aerodinamik verilerin doğruluğu da oldukça önemlidir. Örneğin, Şekil 9-b'de verilen NREL Faz VI türbin rotorunun güç eğrilerinin tahmin edilmesinde, hem PROPID, hem de MS Bladed Modeli, türbin rotor kanatlarının aerodinamik verilerine perdövitez gecikme etkisini[14] de dahil etmişlerdir.

3.2. C_p , C_q ve C_t Yüzeylerinin Elde Edilmesi

MS Bladed Modeli, rüzgar türbinlerinin C_p , C_q ve C_t çalışma yüzeylerinin elde edilmesinde kullanılabilir. Bu yüzeylerin ortaya çıkarılması, oldukça önemlidir ve türbin simülasyon modelinin kullanımını gerektirmektedir. Çünkü, bu yüzeylerin bulunması için türbin rotoru farklı kanat yunuslama açılarında ve uç hız oranında çalıştırılmalıdır. Küçük gövdeli rüzgar türbinleri için, bu yüzeylerin elde edilmesi, deneysel olarak elde etmek belki kolay olsa da, büyük gövdeli rüzgar türbinleri (MW) için imkânsızdır. Bu durum, MS Bladed Modelinin önemini ortaya çıkarmaktadır. MS Bladed Modeli ile, herhangi bir boyuttaki yatay eksenli rüzgar türbininin C_p , C_q ve C_t yüzeyleri kolayca elde edilebilir. Örneğin, MS Bladed Modeli ile elde edilen türbin C_p yüzeyinden, türbin rotorundan maksimum verim alabilmek için hangi kanat yunuslama açısı ve uç hız oranında çalıştırılması gerektiğine karar verilir.

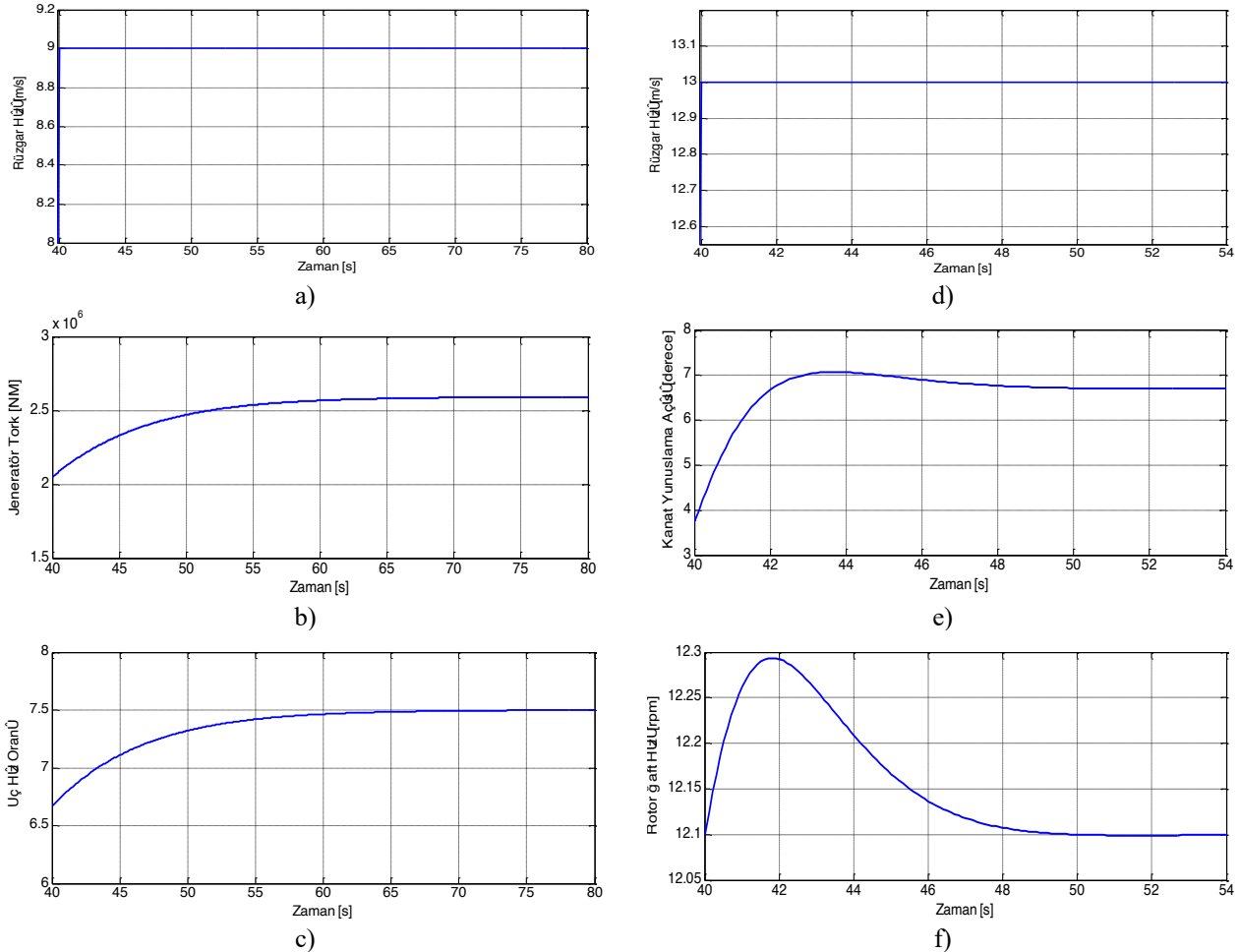


Şekil 10: MS Bladed Modeli ile Cp ve Ct yüzeylerinin elde edilmesi a) Cp yüzeyi, b) Ct yüzeyi

Bunlar, değişken devirli rüzgar türbinleri için oldukça önemli olan parametrelerdir. Örneğin, MS Bladed Modeli kullanarak, 63 metre uzunluğunda kanatlara sahip NREL 5 MW'lık rüzgar türbini farklı uç hız oranı ve kanat yunuslama açısında çalıştırılmış, rotorundan en iyi verim almak için gerekli en uygun uç hız oranı değeri, 7.5, yunuslama açısı değeri ise, -0.875 derece olarak belirlenmiştir[5]. Bu yüzeyin elde edilmesi esnasında, elde edilen diğer bir yüzey ise, aynı türbine ait Ct yüzeyidir. Her iki yüzey de, sırasıyla Şekil 10-a ve b'de yer almaktadır. İstenirse, modelden Cq yüzeyinin elde edilmesi de gerçekleştirilebilir.

3.3. Temel Türbin Kontrolcülerinin Tasarlanması ve Simülasyon Testleri

Bir önceki kısımda, MS Bladed Modeli ile türbinlere ait Cp ve Ct yüzeylerinin elde edilmesinden bahsedilmişti. Bu yüzeylere, çeşitli nedenlerden dolayı ihtiyaç olabilir. Örneğin, Cp yüzeyinden, ilgili türbine ait en uygun kanat yunuslama açısı ve uç hız oranı değerlerinin belirlenmesi gerçekleştirilebilir. Yüzey elde edildikten sonra, maksimum güç katsayısına karşılık gelen yunuslama açısı ve uç hız oranı, seçilen türbin için en uygun değerlerdir. Örneğin, en uygun uç hız oranı kullanılarak,



Şekil 11: Tasarlanan türbin kontrolcülerinin simülasyon testleri, a) Birim basamak artan rüzgar hızı, b) Jeneratör tork miktarı, c) Türbin uç hız oranı, d) Birim basamak artan rüzgar hızı, e) Kanat yunuslama açısı f) Rotor şaft hızı

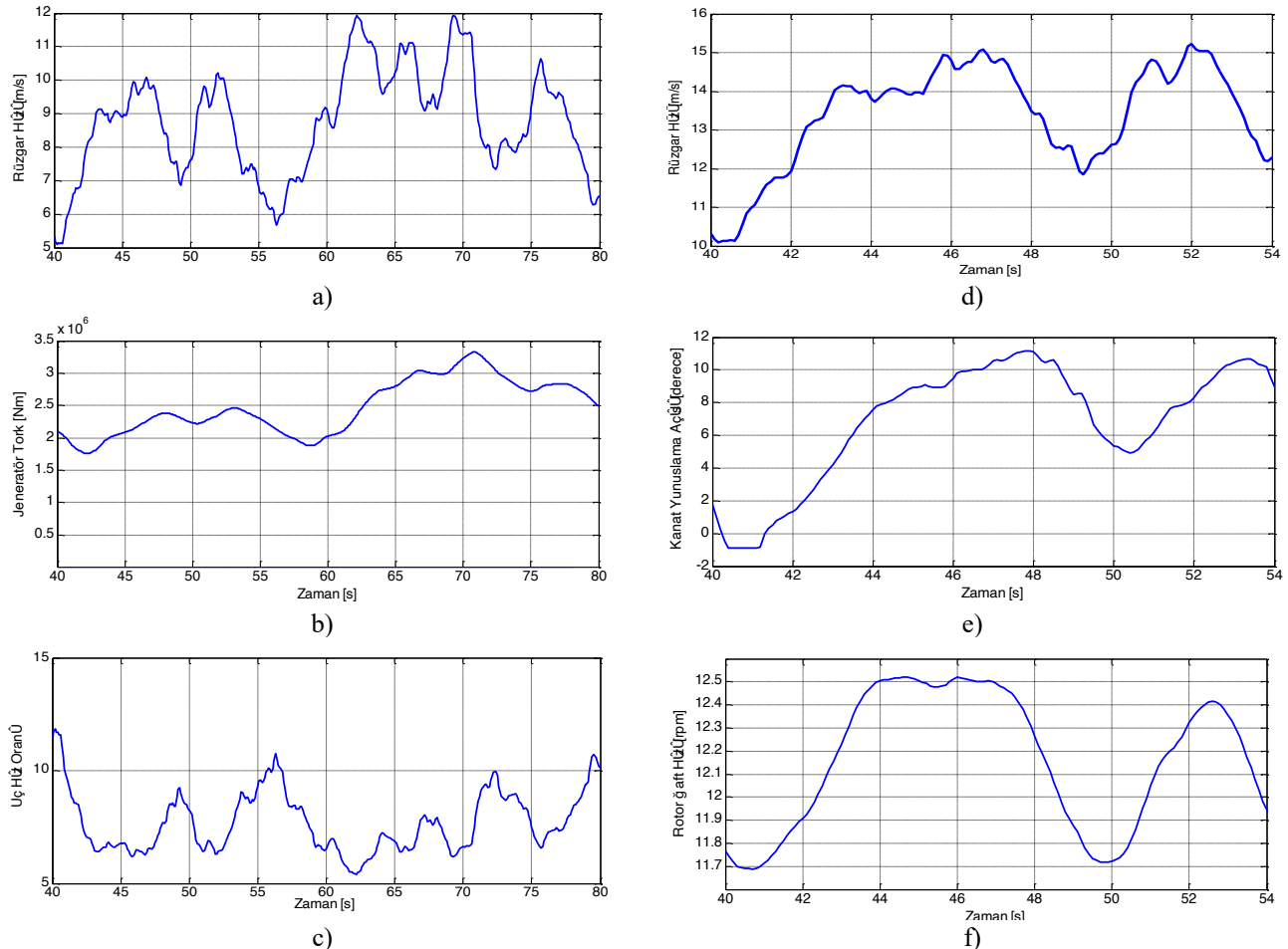
jeneratör tork kontrolcüsünün kontrolcü kazanç değeri hesaplanabilir. Jeneratör tork kontrolcüsü, türbinlerin açma ile anma rüzgar hızları arasındaki rüzgar hızlarında aktiftir.

Şekil 11'de NREL 5 MW'lık rüzgar türbini için tasarlanan jeneratör tork ve kanat yunuslama açısı kontrolcülerinin simülasyon testleri verilmiştir[5], [15]. NREL 5 MW'lık rüzgar türbinin anma rüzgar hızı, 11.4 m/s'dir. Şekil 11-b ve c'de ise, tasarlanan jeneratör tork kontrolcüsün 8 m/s rüzgar hızından birim basamak olarak 9 m/s artan rüzgar hızına karşı (Şekil 11-a), kontrol edilen 5 MW'lık türbini üzerinde nasıl bir cevap verdiği görülmektedir. Rüzgar hızındaki birim basamak artışa karşılık, jeneratör tork kontrolcüsü türbin jeneratörünün torkunu artırarak, türbinin en uygun uç hız oranı olan 7.5 değerinde çalıştırarak görevini yapmıştır. Şekil 11-e ve f'de ise, kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün simülasyon testleri verilmiştir. Rüzgar hızı, birim basamak olarak 12 m/s den 13 m/s'ye çıkarılmıştır(Şekil 11-d). Bu rüzgar girişine karşılık olarak, kanat yunuslama açısı kontrolcüsü, kanatların yunuslama açısını kontrol ederek(Şekil 11-e), türbini anma rotor devri olan 12.1 rpm'de nasıl çalıştırdığı görülmektedir (Şekil 11-f). Görüleceği üzere, bütün bu simülasyonların sonuçları, belirli bir geçiş bölgesini geçtikten sonra kalıcı durum değerine ulaşmaktadır.

Burada bahsedilen kontrolcülerin dışında, türbin kontrolünde, türbinin başlama aşaması ve yukarıda adı geçen iki kontrolcünün birbiri arasındaki geçişi sağlayan geçiş kontrolcülerini de, MS Bladed Modeli kullanılarak tasarlanabilir. Burada yapılan simülasyon testleri, kontrolcülerin amaçlarına uygun sonuçlar verip vermediğinin tespiti içindir. Bunu deneyebilmek için birim basamak olarak artan rüzgar giriş sinyaline karşılık, türbinin cevapları incelenmiştir. Gerçekte, rüzgar hızı birim basamak olarak artmamakla beraber, bir ortalama değer etrafında sürekli olarak değişmektedir. Bu değişim miktarı, rüzgarın normal veya aşırı türbülanslı olma durumuna göre farklılık gösterir. Bir sonraki kısımda, performansı incelenen bu kontrolcülerin normal türbülanslı rüzgarlar altında vermiş olduğu cevaplar incelenecektir.

3.4. Kontrol Edilen Rüzgar Türbininin Türbülanslı Rüzgarlar Altında Simülasyon Testleri

Bir önceki kısımda, birim basamak olarak artan rüzgar hızları ile simüle edilen kontrolcüler, bu kısımda normal türbülanslı rüzgarlar altında simüle edilmiştir. Şekil 12-b ve c'de, jeneratör tork kontrolcüsünün, 9 m/s ortalama hıza sahip normal türbülanslı rüzgar (Şekil 12-a) altında simüle edilmesi ile elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Jeneratör tork kontrolcüsü, rüzgardaki değişimlere (Şekil



Şekil 12: Normal türbülanslı rüzgarlar altında türbin kontrolcülerinin simülasyon testleri, a) 9 m/s ortalama rüzgar, b) Jeneratör tork miktarı, c) Türbin uç hız oranı, d) 14 m/s ortalama rüzgar, e) Kanat yunuslama açısı, f) Rotor şaft hızı

12-a) bağlı olarak, jeneratörün üretmiş olduğu torku (Şekil 12-b) ayarlamakta ve bu sayede türbinin uç hız oranını (Şekil 12-c) en uygun değerde tutmaya çalışmaktadır. Uç hız oranı, simülasyon süresi boyunca en uygun değer olan 7.5 etrafında değişmektedir. Tork kontrolcüsü, türbini bu uç hız oranı değerinde sabitlemeye çalışarak, değişen rüzgar altında görevini yerine getirmektedir. Şekil 12-a, b ve c'den anlaşılacağı üzere, rüzgar hızı arttıkça, jeneratör tork kontrolcüsü vasıtasıyla jeneratörün türbin rotoruna uyguladığı tork artmakta, rüzgar hızı azaldıkça azalmaktadır. Buna bağlı olarak, uç hız oranında da, değişiklikler meydana gelmektedir. Rüzgar hızının artması ile uç hız oranı değeri azalmakta, azalması ile de, artmaktadır. Şekil 12-e ve f' de ise, 14 m/s ortalama değere sahip normal türbülanslı rüzgarın (Şekil 12-d), MS Bladed Modeline uygulanması durumunda, kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün, türbin kanatlarının açısını nasıl değiştirdiğini, buna bağlı olarak, rotor hızında meydana gelen değişiklikler görülmektedir. Rüzgarda meydana gelen değişiklikler (Şekil 12-d) sonucu, rotor hızında ortaya çıkan değişiklikler (Şekil 12-f) yunuslama açısının (Şekil 12-e) değiştirilmesi ile regüle edilmeye çalışılmıştır. Sonuçta, rotor hızı değeri, türbinin anma rotor hızı etrafında değişmektedir. Şekil 12-d, e ve f'den anlaşılacağı üzere, rüzgar hızında meydana gelen artışlarda, kanat yunuslama açısı artmış, azaldığında azalmıştır. Buna bağlı olarak, rotor hızı da, benzer bir davranış sergilemiştir.

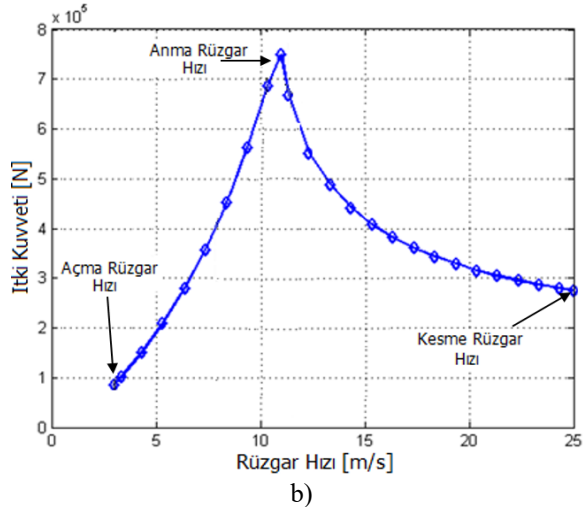
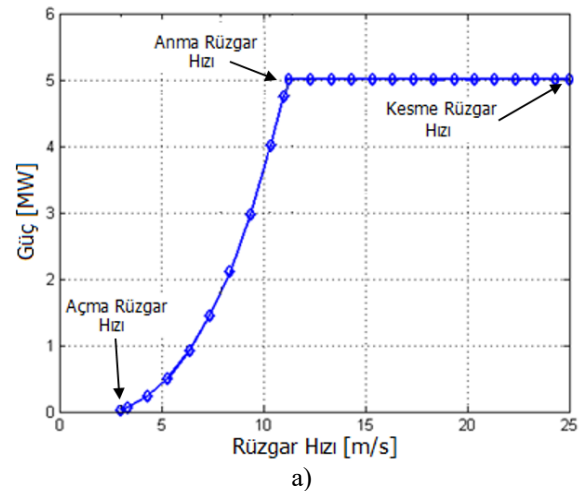
3.5. Kontrol Edilen Rüzgar Türbinini için Güç ve İtki Eğrilerinin Elde Edilmesi

MS Bladed Modeli, rüzgar hızına göre, kontrol edilen rüzgar türbinine ait güç, tork, itki, kanat yunuslama açısı, uç hız oranı gibi vb. eğrilerin de elde edilmesinde kullanılabilir. Burada, örnek olması açısından, MS Bladed Modeli kullanılarak, NREL 5 MW'lık rüzgar türbinini için elde edilen kontrol edilmiş güç ve itki eğrileri verilmiştir (Şekil 13). Şekil 13-a'dan anlaşılacağı üzere, türbin açma ile anma rüzgar hızları arasında, anma gücünde bir elektrik enerjisi sağlayamamaktadır. Kısmi yük bölgesi olarak ifade edilen bu bölgede, elde edilen güç, jeneratör tork kontrolcüsü sayesinde alınmakta ve türbin bu bölgede, anma gücünden az ve üretebileceği maksimum elektriksel gücünü üretmektedir. Anma ve kesme rüzgar hızları arasında ise, türbin tam yük bölgesi olarak adlandırılan bölgede çalışmakta, kanat yunuslama açısı kontrolü ile, türbinden anma gücünde elektrik enerjisi alınmaktadır.

3.6. Yeni Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi ve Simülasyon Testleri

Yukarıda, MS Bladed Modeli ile yapılabilen bazı önemli uygulamalara örnek verildi. Bu uygulamalar, türbinin rüzgar hızına bağlı olarak, türbine ait güç eğrisinin çıkarılması, C_p ve C_t yüzeylerinin elde edilmesi, tasarlanan türbin kontrolcülerinin birim basamak olarak

artan rüzgar hızları ile normal türbülanslı rüzgar hızları altında simülasyon testlerinin gerçekleştirilmesidir. Simülasyon sonuçlarında, jeneratör tork kontrolcüsü için, jeneratör tork kontrolcü çıkışı, türbinin uç hız oranı değerinin zamana bağlı olarak değişimi verildi. Kanat yunuslama açısı kontrolü için, değişen rüzgar hızı altında, kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün kanadın yunuslama açısını nasıl değiştirdiği ve sonucunda rotor hızındaki değişiklikler zaman bağlı olarak gösterildi. En son olarak da, MS Bladed Modeli kullanılarak, kontrol edilen 5 MW'lık türbine ait güç ve itki eğrileri açma ve kesme rüzgar hızları arasında elde edilmiştir. Yukarıdaki belirtilenlerin dışında, rüzgar türbin sisteminden daha iyi verim almak, türbin sistemini korumak, türbin üzerine düşen aerodinamik/mekanik yükleri azaltmak gibi vb. amaçlar için yeni kontrol algoritmaları, MS Bladed Modeli kullanılarak, yatay eksenli rüzgar türbinleri için geliştirilebilir, simülasyon testleri yapılabilir. Başka sistemler için kullanılan çeşitli kontrol algoritmaları, MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli sayesinde türbinler için denenerek, rüzgar türbin teknolojisinin, özellikle de kontrol teknolojisinin gelişmesine önemli ölçüde katkı sağlanabilir.



Şekil 13: Kontrol edilen türbinin eğrileri, a) Güç eğrisi, b) İtki kuvveti eğrisi

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, MS Bladed Modelinin tanıtılması, özellikleri ve modelin bazı önemli yetenekleri uygulamalarla verilmiştir. MS Bladed Modeli, BEM teorisine dayalı bir modeldir. Bu teorisinin geçersiz olduğu durumlarda, türbin performansını daha doğru tahmin edebilmek için MS Bladed Modeli çeşitli aerodinamik düzeltme formülleri kullanmaktadır. Özel koordinat sistemlerinin de modele eklenmesiyle, MS Bladed Modeli modern yatay eksenli rüzgar türbinlerin simülasyonlarını yapabilecek kapasiteye erişmiştir. MS Bladed Modeli yardımıyla, tasarlanan rotorların performansları çeşitli sabit ve değişken yapısal açılar (rotor koni, sapma açısı gibi vb.) altında incelenebilir, türbin kontrolcülerini tasarlanabilir ve yeni kontrol algoritmaları geliştirilerek, simülasyon testleri gerçekleştirilebilir. Yeni kontrol algoritmaları için yapılan simülasyon testlerinde, ümit verici sonuçların alınması, gerçek türbinde de benzer sonuçların alınabileceği anlamını taşır. Geliştirilen algoritmanın gerçek rüzgar türbinine uygulanmasının ardından, yapılan saha testlerinde de, iyi sonuçların alınması türbin teknolojisine ilerlemesine olumlu bir katkıdır. MS Bladed Modeli, temel olarak, türbin aerodinamik rotoru, dişli kutusu ve devir sayısına göre torku değişebilen bir elektrik jeneratöründen oluşmaktadır. MS Bladed Modeli, türbinin kanatlarını, şaft(lar)ını esnemeyen yapı olarak düşünmektedir. İleriki sürümlerinde, bu yapılarını esnek olarak simüle edecek şekilde gerekli düzenlemelerin yapılması planlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmada, doktora yıllarımda geliştirmiş olduğum MS (Mustafa Şahin) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli ve farklı özellikleri sunulmuş olup yeni simülasyon sonuçları yer almaktadır. Türbin modelleme konusuna yönlendiren ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Hocam Doç. Dr. İlkyay YAVRUCUK'a ve modelleme konusunda tecrübelerini esirgemeyen Amerika'nın Milli Yenilenebilir Enerji Laboratuvarından (NREL) Araştırmacı Dr. Jason Jonkman'a teşekkürlerimi belirtmek istiyorum.

5. Kaynaklar

- [1] Wind, G. ve Council, E., "Gwec Report 2018," *Wind Glob. Counc. Energy*, no. April, 2019.
- [2] Wilson, R. E. ve Lissaman, P. B. S., "Applied Aerodynamics of Wind Power Machines," 1974.
- [3] Platt, A. D. ve Buhl, M. L., "WT_Perf User Guide for Version 3.05.00," 2012.
- [4] Moriarty, P. J. ve Hansen, A. C., "AeroDyn Theory Manual, NREL/TP-500-36881, Golden,

Colorado: National Renewable Energy Laboratory," 2005.

- [5] Sahin, M., "Dynamic Modeling, Control and Adaptive Envelope Protection System for Horizontal Axis Wind Turbines, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, METU, Ankara," Middle East Technical University, 2018.
- [6] Sahin, M. ve Yavrucuk, I., "Dynamical modelling of a wind turbine system with precone and tilt angles," in *9th Ankara International Aerospace Conference*, 2017, no. 20-22 September, pp. 1-11.
- [7] Sahin, M. ve Yavrucuk, İ., "Rüzgar Türbininin Dinamik Modellemesinde Belirli Parametrelerin Güç Eğrisi Tahminine Olan Etkilerinin İncelenmesi," in *YEKSEM 2017*, 2017, p. 8.
- [8] Manwell, J. F., McGowan, J. G. ve Rogers, A. L., *Wind Energy Explained-Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [9] Hansen, M. O. L., *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2th Edit. Earthscan, 2008.
- [10] Branlard, E., "Wind turbine tip-loss corrections, Master's Thesis, DTU," 2011.
- [11] Ning, S. A., "CCBlade Documentation, Release 0.1.0," 2013.
- [12] Schepers, J. G., Brand, A. J., Bruining, A., ve diğerleri, "Final report of IEA Annex XVIII : 'Enhanced Field Rotor Aerodynamics Database', ECN-C-02-016," 2002.
- [13] Giguere, P. ve Selig, M. S., "Design of a Tapered and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor," 1999.
- [14] Corrigan, J. J. ve Schillings, J. J., "Emprical Model for Stall Delay Due to Rotation," *Am. Helicopter Soc. Aeromechanics Spec. Conf.*, pp. 8.4-1 to 8.4-15, 1994.
- [15] Sahin, M. ve Yavrucuk, I., "Performance Comparison of Two Turbine Blade Pitch Controller Design Methods Based On Equilibrium And Frozen Wake Assumptions," no. September, pp. 1-16, 2019.

Öğr. Gör. Dr. Mustafa Şahin



Öğr. Gör. Dr. Mustafa Şahin, Mersin Erdemli Teknik Lisesi Elektrik Bölümünden 2004 yılında Okul Birincisi olarak mezun olmuştur. Aynı yıl yapılan üniversite sınavı ile Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu (Şimdiki adıyla Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi) Uçak Elektrik-Elektronik Bölümünü kazanarak, bir yıl İngilizce hazırlık eğitiminin ardından, 2009 yılında Yüksekokul Birincisi olarak mezun olmuştur.

Aynı zamanda, 2000 yılında liseye başladığı yıldan itibaren, lise ve üniversite yıllarında, elektrik ile ilgili işyerlerinde teknik eleman, usta, ustabaşı gibi görevler yapmıştır. Yüksek lisans derecesini, 2011 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Anabilim Dalından "Sabit Kanatlı Mini İnsansız Hava Aracının Geliştirilmesi ve Ağaçlandırmada Kullanımı" adlı tezi ile almıştır. Bu çalışma ile İHA'lar, dünyada ilk kez ağaçlandırma çalışmalarında kullanılmıştır.

Doktora derecesini, ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde 1 yıl Bilimsel Hazırlık Eğitiminin ardından, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Havacılık ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalından 2018 tarihinde almıştır. Tez çalışması, Rüzgar Elektrik Santrallerinde sıklıkla kullanılan Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi, Kontrolü ve Koruma Sistemlerinin geliştirilmesi üzerinedir. Doktora tezinde, MS (Mustafa Sahin) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modelini geliştirmiş olup tez başlığı "Dynamic Modeling, Control and Adaptive Envelope Protection System for Horizontal Axis Wind Turbines"dır.

Ayrıca, lisans mezuniyetinden sonra, 2009 yılının ikinci yarısında, İSG Uluslararası Havalimanında, My Teknik Uçak Bakım Servisinde Uçak Aviyonik Bakım Personeli, 2009-2012 yılları arasında, Erzincan Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu'nda Havacılık Yönetimi Bölümü'nde Öğretim Görevlisi, 2012-2013 yıllarında, THK Üniversitesi İzmir Havacılık Yüksekokulunda Uçak Teknolojisi Programında Öğretim Görevlisi, Uçak Teknolojisi ve Sivil Havacılık Kabin Hizmetleri Programlarının Kurucu Bölüm Başkanlığı, 2013-2018 yılları arasında ise, ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır. ODTÜ'ye geçmeden önce, yukarıda üniversitelerinde çeşitli program ve bölümlerin (Havacılık Elektrik-Elektronik Bölümü, Uçak Gövde Motor Bölümü vb.) açmıştır. Erzincan ve İzmir ilinde bulunan Teknik liselerde de Uçak Bakım Teknik Alanlarının açılmasına öncülük/rehberlik etmiştir.

2018 yılından bu yana da, ODTÜ Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (RÜZGEM) Öğr. Gör. Dr. unvanı ile çalışmaktadır.

Deniz Suyu Kaynaklı Isı Pompası ile Sıhhi Sıcak Su Temini Uygulamasında Solar Fotovoltaik Desteğinin İncelenmesi

Investigation of Solar Photovoltaic Support in Sanitary Hot Water Supply Application with Sea Water Source Heat Pump

Gülsüm Çengel¹, Adile Şenel¹, Sezgi Koçak Soylu², İbrahim Atmaca¹



¹Makine Mühendisliği Bölümü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye
²Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya Bilim Üniversitesi, Antalya, Türkiye

guulsumcengel@gmail.com, seneladile@gmail.com, sezgi.kocak@antalya.edu.tr,
atmaca@akdeniz.edu.tr

Öz

Bu çalışmada ilk olarak Antalya ili Belek ilçesine inşa edilmesi düşünülen otelin, sıcak kullanım suyu ihtiyacının karşılanması için bir ısı pompası tasarlanmıştır. İkinci olarak ise tasarlanan ısı pompasının elektrik tüketimi için solar fotovoltaik desteği incelenmiştir. Otelin sıcak su ihtiyacı 27.930 L/gün, boiler kapasitesi ise 9 m³ olarak belirlenmiştir.

Solar fotovoltaik desteği incelenirken, güneş panellerinin 36° eğimli ve yatay olarak yerleştirildiği iki farklı durum için fotovoltaik sistem tasarımı yapılmıştır. Güneş ışınımı, pik saat ve sistem kayıpları hesaplanmıştır. Otel çatısına 36° eğim ile yerleştirilen tasarımda, 950 adet fotovoltaik panel yerleşimi yapılarak yıllık elektrik üretiminin yaklaşık 394.865,9 kWh/yıl olabileceği ve otelin ısı pompası elektrik tüketiminin %92,8'ini karşılayabileceği tespit edilmiştir. Diğer tasarımda ise 1805 adet fotovoltaik panel yerleşimi yapılarak yıllık elektrik üretiminin yaklaşık 696.912,7 kWh/yıl olabileceği ve bu sefer elektrik tüketiminin tamamını karşılayabileceği tespit edilmiştir. Her iki sistem için de amortisman süresi yaklaşık 8 yıl olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Isı pompası, boiler, pompa, güneş enerjisi, fotovoltaik.

Abstract

In this study, a heat pump was designed to meet the hot water needs of the hotel, which was originally intended to be built in Belek district of Antalya province. Secondly, solar photovoltaic support for electricity consumption of the designed heat pump was examined. Hot water requirement of the hotel is calculated as 27.930 L/day and the capacity of the boiler is determined as 9 m³.

While examining solar photovoltaic support, photovoltaic system design was made for two different situations in which solar panels were placed horizontally and inclined to 36°. Solar radiation, peak time and system losses were calculated. With the design placed on the roof of the hotel with a slope of 36°, it was determined that annual electricity generation could be approximately 394,865.9 kWh/year by installing 950 photovoltaic panels and this production could cover 92.8% of the hotel's heat pump electricity consumption. In the other design, it was determined that the annual electricity production could be approximately 696.912.7 kWh/year and this time it could meet the full electricity consumption by 1805 photovoltaic panels. The depreciation period for both systems is calculated as approximately 8 years.

Key Words: Heat pump, boiler, pump, solar energy, photovoltaic.

1. Giriş

Isı pompası sistemleri hem çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalar hem de konutlarda farklı kaynaklardan ısı geri kazanımı için ekonomik alternatifler sunar. Enerji maliyeti yükselmeye devam ettikçe, enerji tasarrufu sağlamak ve genel enerji verimliliğini artırmak zorunlu hale gelmektedir. Bu doğrultuda, ısı pompası, enerji tasarrufu için büyük potansiyeli olan bir enerji geri kazanım sisteminde kilit bir bileşendir [1]. Isı pompaları elektrikli ısıtmaya nazaran, ısı alınan kaynak tipine bağlı olarak 2 ile 6 kat daha avantajlı olmaları, çevre kirliliğine neden olmamaları, ihtiyaca bağlı olarak istenildiğinde hem ısıtma hem de soğutma amaçlı kullanılabilmesi sayesinde ilgi çekmektedir. Isı pompaları ilk yatırım maliyetleri açısından diğer ısıtma sistemlerinden daha pahalı olsa da uzun vadeli kullanımlarda daha avantajlıdır [2]. Isı pompaları bir mahalın ısıtılması ve soğutulmasında, sıcak su ihtiyacının karşılanmasında, yerden ısıtma sistemlerinde, havuz ısıtılmasında kullanılabilir. Endüstriyel uygulamalarda ise çeşitli kurutma, buharlaştırma, damıtma işlemlerinde ve gıda endüstrisinde tercih edilebilmektedir. Isı pompası sistemlerinde evaporatörün ısı çektiği ortam kaynak olarak adlandırılır. Isı pompaları hava, su, toprak ve güneş enerjisi olmak üzere faydalandıkları kaynağa göre 4 gruba ayrılabilirler [3]. Bu çalışmada söz konusu otelin sıcak su ihtiyacının karşılanması için su kaynaklı ısı pompası kullanılmıştır.

Diğer yandan enerji kaynaklarının tükenmesi, fosil yakıtlarının çevreyi kirlenmesi ve elektrik fiyatlarındaki artış nedeniyle, ilgili araştırmalar çevreye zararı olmayan yeni enerji kaynaklarının kullanılması üzerine yoğunlaşmıştır. Güneş, diğer alternatif enerji kaynakları arasında bir adım öne çıkmaktadır. Bunun nedeni, güneşin yapısı itibarıyla sınırsız ve kullanımı ile çevreye zarar vermeyen bir enerji kaynağı olmasıdır [4]. Ülkemizin coğrafi konumu sayesinde sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli, Türkiye'nin birçok ülkeye göre çok daha avantajlı olmasını sağlar. Ancak, Türkiye'nin güneş kuşağı içinde yer almasına rağmen, güneş enerjisi eldesi ve kullanımı öngörülenden çok daha azdır. Bu nedenle, yakın gelecekte enerji gereksinimlerinin karşılanmasında, yenilenebilir enerjiler bünyesinde yer alan güneş enerjisinin de önemli bir çözüm alternatifi olarak etkili ve sürdürülebilir bir şekilde hayata geçirilmesi gerekmektedir [5].

Türkiye'de güneş enerjisinin en yaygın kullanımı güneş kolektörü vasıtasıyla sıcak su eldesi olsa da elektrik üretimi, mahal ısıtma ve hatta sebze, meyvelerin kurutulmasında dahi güneş enerjisi kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden temel olarak ısı ve elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. İlk olarak güneş enerjisi güneş kolektörleri vasıtasıyla ısı enerjisine dönüştürülür ve bu enerji ile binalarda, endüstriyel işletmelerde, seralarda ısıtma ve sıcak su eldesi uygulamaları gerçekleştirilir. Fotovoltaik sistemlerde ise güneş enerjisi fotovoltaik paneller vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür ve bir yandan elektrik ihtiyacı karşılanırken bir yandan da küresel olarak iklim değişikliğine sebep olunmaz, doğaya zarar verilmesi önlenir.

2. Isı Pompası Sistem Tasarımı

Çalışmanın bu kısmında Antalya Belek'e inşa edileceği düşünülen bir otelin sıcak su ihtiyacını karşılamaya yönelik su kaynaklı ısı pompası sistem tasarımı yapılmıştır. İnşa edilecek otel için sistemde istenen su sıcaklığı 45°C'dir. Otelin sıcak su ihtiyacının bulunması için armatür sayıları bulunmuş, her bir armatür çeşidine karşılık harcanan su miktarları ve toplam su ihtiyacı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Otelin günlük su ihtiyacı

Armatürler	Armatür Sayısı	Harcanan Su (L/gün)	Toplam (L/gün)
Duş	400	50	20000
Ortak Duş	15	50	750
Lavabo	400	5	2000
Ortak Lavabo	50	15	750
Büyük Bulaşık M.	3	850	2550
Bulaşık Makinesi	3	60	180
Tek Gözlü Eviye	6	50	300
Çift Gözlü Eviye	10	100	1000
Çamaşır Makinesi	5	80	400

Otelin günlük su ihtiyacı toplam 27930 L/gün olarak tespit edilmiştir. Fakat ihtiyaç duyulan suyun hepsi bir anda kullanılmayacağından kullanım faktörü 0,75 ile çarpılırsa;

$$27930 \times 0,75 = 20947 \text{ L/gün} = 20,947 \text{ m}^3/\text{gün}$$

olarak su ihtiyacı belirlenmiştir. Isı pompası sistem tasarımı hesabında kullanılan eşitlikler ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Isı pompası sistem tasarımı hesabında kullanılan eşitlikler [6]

Açıklama	Eşitlik
Gerekli Olan Su Debisi	$m = m_1 + m_2$
Depolanan Su Debisi	$m_2 = \frac{V_{depo}}{d}$
Isı Pompası Kapasitesi	$Q_{IP} = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t$
Kompresör Gücü	$Q_{KOMP} = \frac{Q_{IP}}{COP}$
Pompa Debisi	$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t$
Dalgıç Pompa Debisi	$\frac{Q_{IP}}{COP} + Q_{IP} = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t$

1.1 Isı Pompası ve Boyler Hesabı

Otelin mekanik odasındaki yer göz önünde bulundurmuş ve ihtiyaç duyulan suyun yaklaşık yarısının depolanması uygun görüldüğünden her biri 5 kW güçte ısıtıcı 3 m³'lük 3 adet boyler öngörülmüştür. Depo hacmi $V_{depo} = 9 \text{ m}^3$ olarak belirlenmiştir.

Günlük ihtiyaç duyulan su miktarının 3 saatte ısıtılması beklenmektedir. Dolayısıyla gerekli olan su debisi yaklaşık $m = 7 \text{ m}^3/\text{h}$ ve depolanan su miktarı $m_2 = 3 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak hesaplanmıştır. Buna göre;

$$m = m_1 + m_2 \quad 7 = m_1 + 3$$

Saatte ısıtılması gereken su debisi $m_1 = 4 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak hesaplanmıştır. Isı pompası kapasitesi hesabında sıcaklık farkı alınırken sistemde istenilen sıcaklık ve en düşük şebeke suyu sıcaklığı göz önünde bulundurulmuştur.

$$Q_{IP} = 4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (45 - 15)$$

$Q_{IP} \cong 140 \text{ kW}$ olarak bulunmuş ve her biri 36 kW kapasitede COP'si 5 olan 4 adet ısı pompası uygun görülmüştür. Isı pompasının kompresör gücü;

$$Q_{komp} = \frac{Q_{IP}}{COP} = \frac{36 \times 4}{5}$$

$$Q_{komp} = 28,8 \text{ kW} \cong 29 \text{ kW} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

2.2. Diğer Pompa Hesapları

Diğer pompa debi ve güçleri Tablo 2'de verilen eşitlikler ile hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Pompaların debi, basma yüksekliği ve güçleri

Diğer Pompalar	Debi (m ³ /h)	Basma Yüksekliği (mSS)	Güç (kW)
Dalgıç Pompa	30	34	6
Pompa (eşanjörden ısı pompasına basan)	25	15	2
Pompa (ısı pompasından boylere basan)	25	12	2

3. Fotovoltaik Sistem Tasarımı

Fotovoltaik sistem Antalya Belek'e inşa edileceği düşünülen otel çatısına kurulacaktır. Kuzey yarım kürede güneş panelleri belirli bir eğim açısı ile tam güneye bakacak şekilde yerleştirilmektedir.

Seçilen eğim açısı güneş panellerinin performansını oldukça etkilemektedir. Kış aylarında kolektörün optimum eğim açısı yaklaşık olarak enlem +15° iken, yaz aylarında ise güneş ışınlarının daha dik gelişinden dolayı enlem -15° olarak alınabilir. Eğer sistem tüm yıl boyunca kullanılacaksa eğim açısı o yerin enlemi olarak alınmalıdır. Bu çalışmada otel çatısının en verimli şekilde kullanılması ve ısı pompası elektrik tüketiminin en iyi şekilde karşılanabilmesi için iki farklı fotovoltaik sistem tasarımı yapılmıştır. Tüm yıl elektrik tüketimi istendiği için eğim açısı 36° olarak alınmalıdır. Ancak 36° eğim açısında yatay yerleşime göre gölgelemeden kaynaklı olarak iki panel arasında oldukça fazla boşluk bırakılması gerekmektedir. Bu nedenle ilk sistemde optimum açı olarak belirtilen 36°, ikinci sistemde ise gölgeleme etkilerini en aza indirmek adına 0° ile güneş paneli yerleşimi yapılarak sonuçlar incelenmiştir [7].

3.1 Fotovoltaik Sistem için Güneş Işınımı Hesabı

Belek için rakım ve enlem değerleri sırasıyla 9 m ve 36,51° dir. Otel üzerine iki farklı fotovoltaik sistem tasarlandığı için ışınım değerleri atmosfer dışından başlanarak yatay yüzeye gelen (0°) ve 36° eğimli yüzeye gelen aylık ortalama günlük toplam olarak hesaplanmıştır. Işınım hesabında kullanılan eşitlikler ve açıklamaları Tablo 4'te verilmiştir. Fotovoltaik sistem için hesaplanan ışınım değerleri tüm yıl için Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Güneş ışınımı hesabında kullanılan temel eşitlikler [8]

Açıklama	Eşitlik
Atmosfer Dışında Yatay Düzleme Gelen Günlük Güneş Işınımı (H ₀)	$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] x \left[\cos\theta \cos\delta \sin\omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin\theta \sin\delta \right]$
Yatay Düzleme Düşen Güneş Işınımı Hesabı	$\frac{H}{H_0} = \left(a + b \frac{n}{N} \right)$ $a = 0.103 + 0.000017Z + 0.198 \cos(\theta - \delta)$ $b = 0.533 - 0.165 \cos(\theta - \delta)$
Eğik Düzleme Düşen Aylık Ortalama Günlük Toplam Işınım (H _T)	$H_T = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) \frac{R_b}{R_b} + H_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + H\rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$

Tablo 5. Antalya Belek için aylık ortalama günlük toplam güneş ışınımı

Ay	H (Wh/m ²)	H _T (36°) (Wh/m ²)	$\bar{R} = H_T / H$
Ocak	2111	3105	1,47
Şubat	2880	3761	1,30
Mart	3885	4447	1,14
Nisan	5098	5110	1,00
Mayıs	6292	5694	0,90
Haziran	6959	5977	0,85
Temmuz	6973	6118	0,87
Ağustos	6415	6192	0,96
Eylül	5171	5773	1,11
Ekim	3722	4857	1,30
Kasım	2694	4056	1,50
Aralık	1994	3068	1,53

$\bar{R} = H_T / H$; Eğik düzleme (36°) düşen aylık ortalama günlük toplam ışınımın, yatay düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışınımına oranını göstermektedir. Seçilen 36° lik eğim açısında ocak, şubat, mart, eylül, ekim, kasım, aralık aylarında güneş panelleri yatay düzleme gelen ışınımdan daha çok ışınım almaktadır.

3.2 Aylara Göre Elektrik Tüketimi Hesabı

Otel ısı pompası ekipmanları; bir adet 29 kW kompresör, üç adet 5 kW elektrik ısıtıcı boyler, bir adet 6 kW dalgıç pompa, bir adet 2 kW pompa (eşanjörden ısı pompasına basan), bir adet 2 kW pompa (ısı pompasından boylere basan) olarak sıralanabilir. Isı pompası ekipmanlarının günlük çalışma saati, gücü ve aydaki çalıştığı gün sayısından yararlanılarak elektrik tüketimi hesaplanmış, mayıs ayı için Tablo 6 ve tüm yıl için Tablo 7'de verilmiştir.

3.3 Güneş Paneli Seçimi

Günümüzde panel verimi ve fiyatı açısından en yaygın olarak kullanılan panel gücü aralığı 300-315 W dır. Panel gücü artıkça verimdeki artışa karşılık panelin fiyatı da artmaktadır. Bu nedenle panel gücü ve fiyatlar karşılaştırılarak 310 W güce , %18,94 verime ve 1,6368 m² alana sahip monokristal güneş panelleri tercih edilmiştir.

Bu çalışmada iki farklı fotovoltaik sistem tasarımı yapılmıştır. İki tasarımda da aynı özelliklere sahip güneş panelleri ve inverterler kullanılmıştır.

1. *Tasarım*; Güneş panelleri 36° eğimli yerleştirilmiştir.
2. *Tasarım*; Güneş panelleri yatay olarak yerleştirilmiştir.

Tablo 6. Mayıs ayı için elektrik tüketimi

Cihazlar	Güç (kW)	Günlük çalışma saati (h)	Aydaki çalıştığı gün sayısı (gün)	Tüketim (kWh/ay)
Kompresör	29	22	31	19778
Elektrik ısıtıcı boyler	15	22	31	10230
Dalgıç pompa	6	22	31	4092
Pompa (Eşanjörden ısı pompasına basan)	2	22	31	1364
Pompa (Isı pompasından boylere basan)	2	22	31	1364
Toplam tüketim (kWh/ay)				36828

Tablo 7. Aylara göre toplam elektrik tüketimi

Aylar	Tüketim (kWh/ay)
Ocak	36828
Şubat	33264
Mart	36828
Nisan	35640
Mayıs	36828
Haziran	35640
Temmuz	36828
Ağustos	36828
Eylül	35640
Ekim	36828
Kasım	35640
Aralık	36828

3.3.1. Güneş Panellerinin 36° Eğimli Yerleştirildiği Sistemle Üretilen Elektrik Enerjisi

Otel çatı alanı 5000 m² dir. Bu sistemde güneş panelleri 36° eğimle güneşe bakacak şekilde yerleştirilmiştir. 36° eğim açısında iki sıra arasında 3,62 m mesafe bırakılması gerektiği 1 ve 2 numaralı eşitliklerle hesaplanmıştır. b panel boyu seçilen panel için 1,65 m dir. Her iki panel arasında montaj için 2 cm ve her iki sıra arasında 3,62 m gölgeleme için boşluk bırakıldığında otel üzerine 950 adet panel yerleştirilebileceği bulunmuştur. Bu paneller çatı üzerinde toplam 1258 m² yer kaplamaktadır.

$$F = D/b \quad (1)$$

$$D = a + b x \cos \alpha \quad (2)$$

Pik Saat

Panel üzerine düşen aylık ortalama günlük toplam güneş ışınımına göre pik saat aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır;

$$Pik\ Saat = \frac{Radyasyon \left(\frac{kWh}{m^2\ g\ un} \right)}{1\ kW/m^2} \quad (3)$$

36° eğimli yüzey için aylık pik saat değerleri hesaplanarak Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Aylara göre pik saat değerleri

Ay	Pik saat (h)
Ocak	3,105
Şubat	3,761
Mart	4,447
Nisan	5,110
Mayıs	5,694
Haziran	5,977
Temmuz	6,118
Ağustos	6,192
Eylül	5,773
Ekim	4,857
Kasım	4,056
Aralık	3,068

Bir panelin alanı = 1,650 × 0,992 = 1,6368 m² dir. Otel üzerine yerleştirilen 950 adet güneş panelinin toplam alanı yaklaşık 1555 m² dir. Bu fotovoltaik sistem için doğru akım çıkış gücü 295 kW olarak 4 numaralı eşitlikten hesaplanmıştır.

$$P_{dc} = \text{Güneş radyasyonu} \times \text{Toplam PV Alanı} \times \text{PV Verim} \quad (4)$$

$$P_{dc} = 295\ kW$$

Fotovoltaik sistem için %99 verime, 10 kW güce sahip toplam 32 adet inverter seçimi yapılmıştır. Fotovoltaik sistemin ürettiği enerji birçok faktöre bağlıdır. Bunlar; sistemin coğrafi konumu, fotovoltaik sistem etrafındaki yapılar, uyumsuzluk, spektrum, inverter, kablo kayıpları olarak sıralanabilir. Ancak her sistemde bu kayıplar aynı olmayacaktır. Bu sistem için toplam kayıp %23,8, inverter verimi %99 ve P_{dc} yardımıyla P_{ac} = 223 kW olarak bulunmuştur. [9]

$$P_{ac} = P_{dc} \times \text{İnverter verimi} \times (1 - \text{kayıplar}) \quad (5)$$

Aylık Elektrik Enerjisi Üretimi

Tasarlanan fotovoltaik sistem yardımıyla aylık üretilen elektrik enerjisi tüm yıl için hesaplanarak Tablo 9'da verilmiştir.

Yıllık toplam 394865,9 kWh/yıl elektrik enerjisi üretimi yapılabileceği bulunmuştur.

Tablo 9. Aylara göre aylık toplam elektrik enerjisi üretimi kWh/ay

Aylar	Elektrik üretimi (kWh/ay)
Ocak	21464,87
Şubat	23483,68
Mart	30742,11
Nisan	34185,9
Mayıs	39362,62
Haziran	39986,13
Temmuz	42293,73
Ağustos	42805,3
Eylül	38621,37
Ekim	33576,44
Kasım	27134,64
Aralık	21209,08
Yıllık toplam elektrik üretimi	394865,9 (kWh/yıl)

Fotovoltaik Sistem Amortisman Süresi Hesabı

Amortisman süresi aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanabilir;

$$Amortisman\ Süresi = \frac{Toplam\ maliyet}{Gelir - Gider} \quad (6)$$

Otel yıllık 394865,9 kWh elektriği şebekeden almayı kendi üreteceği için yıllık 394865,9 x 0,715 = 282329 TL gelir elde edilmesi beklenmektedir.

Fotovoltaik sistem ekipmanları ve fiyatları Tablo 10'da verilmiştir. Böyle bir sistemin toplam maliyeti 1.982.670 TL dir.

Tablo 10. Fotovoltaik sistem maliyeti

Ekipmanlar	Adet	Birim Fiyat (TL)	Toplam Fiyat (TL)
Fotovoltaik panel	950	1.131	1.074.450
İnverter	32	17.210	550.720
Diğer (kablo, inşaat, kurulum, işçilik)			357.500
TOPLAM			1.982.670

$$Amortisman\ süresi = (1.982.670\ TL)/(282.329 - 20.000)$$

Amortisman süresi = 7,56 yıl ≈ 8 yıl olarak hesaplanmıştır.

Bu sistem için öngörülemeyen giderler 20.000 TL olarak alınarak fotovoltaik sistem amortisman süresi yaklaşık 8 yıl olarak bulunmuştur. Otel ısı pompası elektrik tüketimi yıllık 433.620 kWh, fotovoltaik sistem tarafından üretilmesi beklenen elektrik ise yıllık 394.865,9 kWh olduğu için fotovoltaik sistemin ısı pompası elektrik tüketiminin %91.06'sını karşılayabileceği bulunmuştur.

3.3.2. Güneş Panellerinin Yatay Olarak Yerleştirildiği Sistemle Üretilen Elektrik Enerjisi

Bu sistemde de birinci sistemle aynı güneş panelleri tercih edilmiştir. Birinci sistemden farklı güneş panellerinin yatay olarak konumlandırılmış olmasıdır. İlk olarak güneş panellerinin yerleşimi yapılarak panel sayısı ve toplam panel alanı hesaplanmıştır. Yatay şekilde yerleşimi yapılan güneş panellerinin aralarına montaj için 2 cm boşluk bırakılmıştır. Her sıradan sonra panellere kolay ulaşabilmek için 80 cm boşluk bırakılmıştır. Bir panelin alanı = $1,650 \times 0,992 = 1,6368 \text{ m}^2$ dir. Otel üzerine 1805 adet panel yerleştirilmiştir.

Yatay yüzey için aylık pik saat hesabı 3 numaralı eşitlik ile hesaplanıp Tablo 11'de verilmiştir.

Bir güneş panelinin alanının $1,6368 \text{ m}^2$ olduğu bilinmektedir. Otel üzerine yerleştirilen 1805 adet güneş panelinin toplam alanı 2954 m^2 dir. Toplam panel alanı, panel verimi ve güneş radyasyonu ile fotovoltaik sistem için $P_{dc} = 560 \text{ kW}$ olarak 4 numaralı eşitlikten hesaplanmıştır.

Fotovoltaik sistem için %99 verime, 10 kW güce sahip toplam 58 adet inverter seçimi yapılmıştır. Fotovoltaik sistem için toplam kayıp %23,8, inverter verimi %99 ve P_{dc} yardımıyla 5 numaralı eşitlikten $P_{ac} = 422 \text{ kW}$ olarak bulunmuştur.

Tablo 11. Aylara göre pik saat

Ay	Pik saat (h)
Ocak	2,111
Şubat	2,880
Mart	3,885
Nisan	5,098
Mayıs	6,292
Haziran	6,959
Temmuz	6,973
Ağustos	6,415
Eylül	5,171
Ekim	3,722
Kasım	2,694
Aralık	1,994

Aylık Elektrik Enerjisi Üretimi

Tasarlanan fotovoltaik sistem yardımıyla aylık üretilen elektrik enerjisi tüm yıl için hesaplanarak Tablo 12'de verilmiştir. Yıllık toplam $696912,7 \text{ kWh/yıl}$ elektrik enerjisi üretimi yapılabileceği bulunmuştur.

Tablo 12. Aylara göre aylık toplam elektrik üretimi kWh/ay

Aylar	Elektrik üretimi (kWh/ay)
Ocak	27616,1
Şubat	34030,08
Mart	50823,57
Nisan	64540,68
Mayıs	82311,94
Haziran	88100,94
Temmuz	91220,79
Ağustos	83921,03
Eylül	65464,86
Ekim	48691,2
Kasım	34106,04
Aralık	26085,51
Yıllık toplam elektrik üretimi	696912,7 (kWh/yıl)

Fotovoltaik Sistem Amortisman Süresi Hesabı

Tasarlanan fotovoltaik sistemle yapılması beklenen elektrik üretimi tüm yıl için hesaplanmıştır. Otel yıllık $696912,7 \text{ kWh}$ elektriği şebekeden almayı kendi üreteceği için yıllık $696912,7 \times 0,715 = 498292,6 \text{ TL}$ gelir elde edilmesi beklenmektedir.

Fotovoltaik sistem ekipmanları ve fiyatları Tablo 13'de verilmiştir. Fotovoltaik sistemin toplam maliyeti $3.709.635 \text{ TL}$ dir.

Tablo 13. Fotovoltaik sistem maliyeti

Ekipmanlar	Adet	Birim Fiyat (TL)	Toplam Fiyat (TL)
Fotovoltaik panel	1805	1.131	2.041.455
İnverter	58	17.210	998.180
Diğer (kablo, kontstrüksiyon, kurulum, işçilik)			670.000
TOPLAM			3.709.635

$$\text{Amortisman süresi} = (3.709.635 \text{ TL}) / (498.292,6 - 30000)$$

$$\text{Amortisman süresi} = 7,92 \text{ yıl} \approx 8 \text{ yıl olarak hesaplanmıştır.}$$

Fotovoltaik sistem amortisman süresi yaklaşık 8 yıl olarak bulunmuştur. Otel ısı pompası elektrik tüketimi yıllık 433.620 kWh, fotovoltaik sistem tarafından üretilmesi beklenen elektrik ise yıllık 696912,7 kWh/yıl dir. Fotovoltaikler yatay olarak yerleştirildiğinde otel ısı pompası elektrik tüketiminin tamamı fotovoltaik sistem tarafından karşılanabileceği bulunmuştur. Üretilen fazla elektrik otelin diğer elektrik tüketim kalemlerinde kullanılabilir.

4. Sonuç

Bu çalışmada Antalya ili Belek ilçesine inşa edilmesi düşünülen otelin sıcak kullanım suyu ısı pompası ile karşılanması için bir ısı pompası tasarımı yapılmıştır ve tasarlanan ısı pompası elektrik tüketimini karşılayacak şekilde güneş panellerinin 36° eğimli ve yatay olarak yerleştirildiği iki farklı fotovoltaik sistem tasarımı yapılmıştır.

Çalışmanın ilk kısmında ısı pompası tasarımında otel sıcak su ihtiyacı hesaplanmıştır. Ayrıca ihtiyaç olan suyun depolanması gereken boyler kapasitesi, dalgıç pompa ve gerekli diğer pompaların basma yüksekliği debisi hesaplanıp seçilmiştir. Ve tüm ısı pompası ekipmanlarının güçleri belirtilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise Antalya Belek için güneş ışınımı, pik saat ve sistem kayıpları hesaplanmıştır. Her iki fotovoltaik sistem için de kullanılan paneller 310 W gücündedir. Otel çatısına 36° eğim ile yerleştirilen fotovoltaik sistem tasarımında yıllık elektrik üretiminin yaklaşık 394.865,9 kWh/yıl olabileceği ve otelin ısı pompası elektrik tüketiminin %92,8'ini karşılayabileceği tespit edilmiştir. Otel çatısına yatay yerleştirilen fotovoltaik sistem tasarımında yıllık elektrik üretiminin yaklaşık 696.912,7 kWh/yıl olabileceği ve otelin ısı pompası elektrik tüketiminin tamamını karşılayabileceği tespit edilmiştir. Her iki sistem için de amortisman süresi yaklaşık 8 yıl olarak hesaplanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Chua, K.J., Chou, S.K. and Yang, W.M., "Advances in heat pump systems: A review", Applied Energy, 87: 3611-3624, 2010.
- [2] Bakırcı, K. ve Yüksel, B., "Güneş kaynaklı ısı pompaları" Tesisat Mühendisliği Dergisi, 75, 2003.
- [3] Koçak S., "Hacim Isıtma Amaçlı Güneş Enerjisi Destekli Su Kaynaklı Isı Pompası Çevriminin Teorik Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 2012.
- [4] Yaşar A. T., Orhan B., Güngör A., "Aile Tipi Bir Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompalı Su Isıtıcısı Sisteminin Tasarımı", 9. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 06-09 Mayıs 2009.

[5] Kılıç, F. Ç., "Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri", Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 671, s. 28-40, 2015.

[6] Doğan, V., "Isıtma", Kahraman Neşriyat Ofset San, 2010.

[7] İbrahim, D., "Güneş Enerjisi Uygulamaları", Bilişim Yayıncılık, 2006.

[8] Yiğit, A. ve Atmaca, İ., "Güneş Enerjisi Mühendislik Uygulamaları", Dora, 2018.

[9] Deniz, E. "Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar", 3. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, 1-3, 2013.

Semboller

m	Gerekli su debisi [m ³ /h]
m ₁	Isıtılması gereken su debisi [m ³ /h]
m ₂	Depolanması gereken su debisi [m ³ /h]
V _{depo}	Depo hacmi [m ³]
d	Gerekli sıcak suyun hazırlanması için gereken zaman [h]
Q _{IP}	Isı pompası kapasitesi [kW]
Q _{KOMP.}	Kompresör gücü [kW]
V	Pompa debisi [m ³ /h]
ρ	Yoğunluk [kg/m ³]
c _p	Sabit basınçta özgül ısı [kJ/kg.K]
Δt	Sıcaklık farkı
H	Yatay düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışınım [W/m ²]
H _d	Yatay düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam difüz ışınım [W/m ²]
H _o	Atmosfer dışında yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışınımı [W/m ²]
H _T	Eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam güneş ışınımı [W/m ²]
G _{sc}	Güneş sabiti [=1367 W/m ²]
n	Ocak' dan itibaren gün sayısı
n/N	İzafi güneşlenme süresi [h]
Z	Rakım [m]
ρ	Yerin yansıtma oranı
φ	Enlem açısı
ω _s	Güneş batış saat açısı
δ	Deklınasyon açısı
β	Eğim açısı
\bar{R}	Eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışınımın, yatay düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışınım oranı
F, D	Güneş paneli yerleşiminde geometrik büyüklükler
P _{ac}	Alternatif akım çıkış gücü

Sezgi KOÇAK SOYLU



1985 yılında Ankara'da doğmuştur. 2009 yılında Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Lisans, aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan ise 2012 ve 2018 yıllarında sırasıyla yüksek lisans ve doktora derecelerini almıştır. 2019 yılından beri Antalya Bilim Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. Nanoakışkanların ısı transfer uygulamaları, ısı pompaları, güneş enerjisi, ısı konfor ve enerji verimliliği konularında çalışmalar yapmaktadır.

İbrahim ATMACA



1999 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Lisans, 2002 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalından yüksek lisans ve 2006 yılında aynı Enstitüden Doktora derecelerini aldı. 2007 yılında Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalına Yardımcı Doçent olarak atandı, 2014 yılında Doçent, 2020 yılında Profesör oldu. Güneş enerjisi destekli absorpsiyonlu soğutma sistemleri, güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri, iklimlendirilen ortamlarda ısı konfor ve iç hava kalitesi, nanoakışkanların çeşitli ısı uygulama alanları, binalarda ısı yalıtımı ve enerji verimliliği, termoelektrik soğutuculu damıtma sistemleri, evaporatif soğutma ile iklimlendirme sistem verimlerinin iyileştirilmesi konularında çalışmalar yapmaktadır. Halen Akdeniz Üniversitesinde Termodinamik Anabilim Dalı Başkanı olarak görevini sürdürmekte ve Makine Mühendisleri Odası Antalya Şube Yönetim Kurulu Başkanlığını yürütmektedir.

Gülsüm ÇENGEL



2018 yılında Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Termodinamik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisidir.

Adile ŞENEL



1995 yılında Burdur'da doğdu. 2017 yılında Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Termodinamik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisidir. İlgi alanları soğutma tekniği ve güneş enerjisiyle elektrik üretimidir.

Çatı Üstü Termal ve Elektrik Enerjisi Üretimini Ekonomik ve Çevresel Getirilerinin Araştırılarak Optimal PV-T Tasarımı

Optimal PV-T Design Based On Investigation of Economic and Environmental Benefits of Rooftop Solar Thermal and Electrical Energy Generation

Serdar UYAR¹, Dr. Öğr. Ü. Atabak NAJAFI²

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye
serdaruyar55@hotmail.com

²Elektrik Elektronik Mühendisliği, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye
ataberk.najafi@ogu.edu.tr

Öz

Her geçen gün artan enerji ihtiyacı, çevreye zararlı enerji kaynaklarının tüketimini hızla artırmakta ve bu tüketim; küresel ısınma, doğal dengenin bozulması gibi canlı yaşamını etkileyen durumlara sebep olmaktadır. Öte yandan, güneş enerjisinden termal enerji ve elektrik enerjisi üretimi de yenilenebilir enerji kaynağı olarak gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu yaygınlaşma, binalarda kullanılan enerjiyi çatı üstü termal enerji ve elektrik enerjisi üreten PV-T sistemler üzerinden karşılamaya yönelik çalışmaları beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmada çatı üstü termal enerji ve elektrik enerjisi üretimi hakkında genel bilgiler verilmiş ve bu enerji üretim sistemlerinde kullanılan temel donanımlar hakkında detaylı anlatım bilgileri verilmiştir. Bunun yanında, literatürde yer alan ve üzerinde akademik çalışmalar yapılan PV-T sistemlere değinilmiştir. Çatı üstü enerji üretiminde kullanılan PV-T kolektörlerinin uygulanma şekli ve başarımlarını anlatılmıştır. Farklı tip PV-T kolektörlerin çatılara entegrasyonu gösterilmiştir. Ayrıca, çatıya entegre termal ve PV sistemlerin karakteristik farklarına da değinilmiştir. Sonuç olarak; çatı üstü termal enerji ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılan PV-T sistemlerinde değerlendirilmesi faydalı olacak hususlar belirtilmiştir.

Anahtar kelimeler: güneş enerjisi, pv-t sistem, panel

Abstract

Ever-increasing need for energy rapidly increases the consumption of energy and this consumption leads to cases such as global warming and disruption of ecological balance that consequently affects life. Concurrently, solar thermal and electrical energy technologies are expanding day-by-day as renewable energy source. This expanding brings about studies to meet the need for energy used in buildings through the

PV-T systems that generate rooftop thermal and electrical energy.

This article included general information about rooftop solar thermal and electrical energy systems and detailed information about the main equipment used in these systems. Moreover, PV-T systems in the literature were mentioned. Form of application and performance improvement of PV-T collectors used in rooftop energy generation were explained as well. Integration of different types of PV-T collectors into roofs was indicated. In addition, characteristic differences of roof-integrated thermal and PV systems were addressed. Finally, the significant aspects to be considered regarding the PV-T systems used in rooftop solar thermal and electrical energy generation were stated.

Keywords: solar energy, pv-t system, collector

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, güneşteki hidrojen atomlarının helyum atomlarına dönüşmesi sonucu açığa çıkan ışınım enerjisidir. Güneş enerji sistemleri güneşten gelen sıcaklığa göre değil güneş ışınlarına göre enerji üretmektedir. Yani ışığın olduğu her zaman, kış aylarında bile enerji üretilebilmektedir. Bu enerji dünya yüzeyine metrekaare başına yaklaşık 1400 W olarak düşer [1].

Enerji üretiminde kullanılan kömür, petrol, doğalgaz ve bor gibi enerji türleri dünyada sınırlı olduğundan dolayı tükenme tehlikesiyle karşı karşıyadır. Fakat güneş enerjisinin yaşam var olduğu sürece tükenmesi söz konusu değildir. Güneş enerjisi, tükenmemesinin yanında ortak olarak kullanılması, çevreyi kirletmemesi ve enerjiye dönüşüm maliyetinin düşük olması nedeniyle çok kullanılan bir enerji üretim

sistemidir. Bu yüzden yeni teknolojilerde güneş enerjisi kullanılmaya çalışılmaktadır.

Dünyada kullanılan enerjinin önemli bir kısmının binalarda harcandığı bilinmektedir. Ayrıca insanların yaşam kalitesi ve refah düzeyi arttıkça enerjiye olan talep de artmaktadır. Bununla beraber endüstriyel gelişim, nüfus artışı, elektriksel aletlerin kullanımının yaygınlaşması enerjiye olan talebi hızlı bir şekilde artırmaktadır. Birçok ülke ihtiyaç duyduğu enerjiyi üretimle karşılayamamaktadır. Ayrıca gelişmekte olan ülkeler sanayileşmiş ülkelerdeki ekonomik gelişmeyi yakalamak için yoğun çaba sarf etmektedir. Dolayısıyla bu ülkelerin enerjiye olan taleplerini karşılayabilmeleri hayati önem arz etmektedir. Artan bu enerji talebinin geleneksel üretim yöntemleri ile karşılanması atmosfere yayılacak olan sera gazı miktarını kat ve kat arttıracak iklim değişimini daha da hızlandıracaktır. Yapılacak olan yeni enerji üretim sahalarında geleneksel enerji kaynaklarının yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi insanlığa daha yaşanılabilir, temiz, kirlenmemiş bir çevre sunacaktır.

Geleneksel bir fotovoltaik panelin elektriksel enerji dönüşüm oranı %5-20 arasındadır [2]. Kalan enerji ısı enerjisi olarak ortaya çıkarak panelin yüzey sıcaklığını yükseltmektedir. Unutulmalıdır ki panel yüzey sıcaklığındaki her 1°C'lik sıcaklık artışı fotovoltaik panelinin elektriksel verimini %0,47 oranında düşürmektedir [3]. PV-T sistemlerinde ise atmosfere yayılan ve panel yüzey sıcaklığını arttıran bu enerji güneş panelinin arkasına yerleştirilen ısı değiştiriciler ve akışkanlar yardımıyla tutulmakta ve faydalı enerji olarak kullanımı sağlanmaktadır. Böylelikle yaz aylarında 80°C'leri bulan panel yüzey sıcaklığı PV-T kolektörlerinin tasarımlarına göre daha düşük seviyelerde tutulabilmektedir. Bu sayede akışkanlar yardımıyla soğutulan bu güneş pilleri düşük ve kararlı bir sıcaklıkta güç çıkışını artırır. Fotovoltaik panel üzerindeki soğutma uygulamaları hem panelin elektriksel verimini arttırmakta hem de sıcaklığın oluşturacağı bozulmanın azalmasından dolayı panelin kullanım ömrünü arttırmaktadır [4]. PV-T sistemlerin verimliliğini ortam sıcaklığı, güneş enerjisi geliş açısı, rüzgârın hızı ve soğutma şekli etkiler.

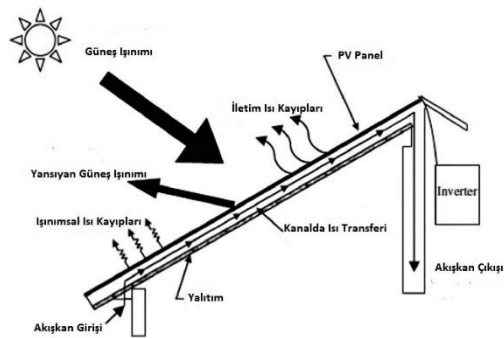
Fotovoltaik-termal enerji üretim sistemleri üzerine son yıllarda birçok araştırmacı bilimsel çalışmalar yapmıştır. Örneğin; Tyagi ve arkadaşları fotovoltaik-termal kolektörleri, fotovoltaik panelleri ve konsantrasyon kolektörlerini kapsayan teknolojiler üzerine çalışmışlardır [5]. Chow ve arkadaşları son yıllardaki kolektör tasarımları, kullanılan malzemelerdeki gelişmeler ve coğrafi

etkilerin üzerinde araştırma yapmışlardır [6]. Moradi ve arkadaşları fotovoltaik-termal sistem verimini etkileyen çeşitli parametreler ve bu parametrelerin değer aralıkları üzerine çalışma yapmışlardır [7]. Riffat ve arkadaşları birçok analiz modeli kullanarak değişik tipteki PV-T sistemlerin fotovoltaik panel başarımlarını nasıl etkilediği ve elektriksel ve termal kazanımları niteliksel olarak araştırarak çıkarımlarda bulunmuşlardır [8].

Bu bildiride kapsam olarak çatı üstü termal ve elektrik enerjisi üretiminin ekonomik ve çevresel getirileri ve farklı tür PV-T tasarımları araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda; farklı tip PV-T sistemleri ile ilgili literatür taraması yapılarak akademik çalışmalar incelenip farklı PV-T tasarımlarının kullanımı ve verimleri irdelenmiştir. Yapılan araştırmalardan çıkarılan sonuçlar karşılaştırılarak çatı üstü PV-T sisteminin geliştirilmesi ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

2. PV-T SİSTEMLER

Fotovoltaik-termal sistemlerde fotovoltaik panelin sıcaklığı, doğal ya da zorlanmış akışkan ile soğutma yapılarak düşürülebilir. Böylelikle aynı anda elektrik ve ısı enerjisi üretebilen PV-T sistemler oluşturulmuş olur. Şekil 1'de de görüldüğü gibi PV-T sistemler, fotovoltaik panel ve panelin arkasına yerleştirilmiş olan emici plakadan oluşmaktadır. Emici plakanın iki görevi vardır. İlki fotovoltaik paneli soğutarak elektrik üretim verimini arttırmaktır. İkincisi ise fotovoltaik sistem tarafından kullanılmayan atık ısıyı yararlı işe çevirmektir. Fotovoltaik panel ve termal toplayıcı kullanımı binaların çatısında daha az yer kaplayarak gerek alan tasarrufu sağlamanın yanı sıra hem elektrik enerjisini hem de sıcak su ihtiyacını da karşılayabilir.



Şekil 1: Çatıya entegre edilmiş PV-T tasarımı

PV-T kolektörleri güneş enerjisini elektrik ve termal enerjiye dönüştürdüğü için birim alandaki toplam enerji çevrimi oldukça yüksektir. Bununla beraber PV-T kolektörlerinden üretilen termal

enerji ancak düşük ve orta seviyedeki sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir [9]. Çünkü PV-T sistemlerin asıl amacı fotovoltaik panelin sıcaklığını optimum seviyede tutup olabildiğince çok elektrik üretmektir. Fotovoltaik panelin sıcaklığını optimum derecede tutmak için kullanılan akışkan da ancak belli bir sıcaklığa kadar ısınabilmektedir.

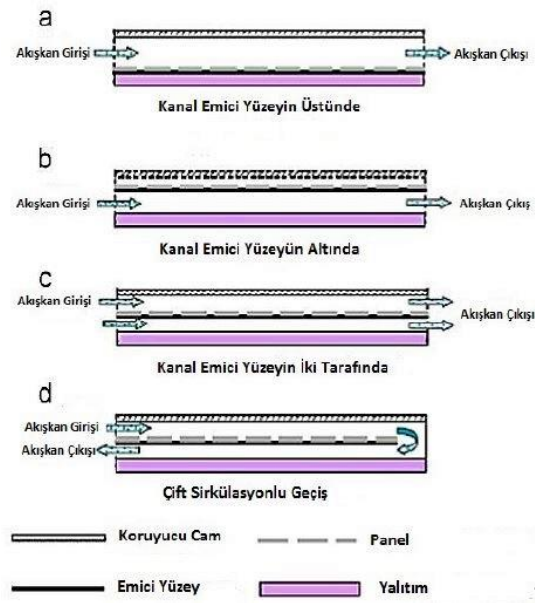
Çatı üstü enerji üretim sistemleri için değişik tipte PV-T tasarımları üzerinde çalışılmaktadır. Bu sistemlerle üretilen enerjinin verimi sistemde kullanılan kanal yapısı, akışkanın tipi gibi değişkenlere bağlıdır. Bundan sonraki kısımda çatı üstüne entegre edilen farklı tip PV-T sistemler üzerinde durulacaktır.

2.1. PV-T Hava Kolektörü

PV-T hava kolektörleri, termal hava kolektörleri ile benzer yapıdadır. Fakat bu kolektörlerde termal hava kolektörlerinin arka yüzeyine yerleştirilen koyu termal emici tabakanın yerine fotovoltaik panel yerleştirilmiştir. Bu sistemlerde verim ısı transferini sağlayan havanın akış tasarımına, debisine ve kanal yüzeyinin ısı transferine uygunluğuna göre değişir. Hava ile soğutulan PV-T kolektörleri diğer türlere göre oldukça ucuz, basit yapı ve yaygın kullanılan bir sistemdir. Bu sistemde fotovoltaik panel üzerindeki ısı enerjisi etkili bir şekilde uzaklaştırılabilir.

Sıvı kolektörler ile karşılaştırıldığında düşük yoğunluk, düşük ısı sığası ve düşük termal iletkenliği nedeniyle düşük ısı transfer katsayısına sahiptir. Dolayısıyla termal verimleri %10-20 arasında değişmektedir. Ayrıca sıvı kolektör sistemlerine göre daha hantal yapılıdır. PV-T hava kolektörlerinde sızma ya da donma sorunu bulunmamaktadır. Fan kullanıldığı takdirde gürültü sorunu ortaya çıkabilmektedir [10].

Hegazy, 4 farklı hava kolektörü tasarımı üzerine çalışma yapmıştır. Bu 4 adet hava kolektörü Şekil 2'de görüldüğü gibi hava, emici yüzeyin üstünden (a), altından (b), hem üstünden hem de altından (c) ya da çift sirkülasyonlu geçiş (d) şekline göre tasarım olarak birbirinden ayrılmaktadır. Sayısal simülasyonlar anlaşıldığı gibi b ve d tasarımı elektriksel ve termal kazanç olarak benzer sonuçlar vermektedir. Şekil 2'de a tasarımını en az verim ile çalışmaktadır. En az fan gücü isteyen tasarım ise sırasıyla c ve d tasarımıdır [11].



Şekil 2: Farklı yapıdaki hava kolektörleri

Kamtahani ve arkadaşları ortam ısıtması amacıyla kullanılan hibrit yarı görünür çift geçişli PV-T sistemlerini incelemişler yıllık üretilen termal ve elektrik enerjisini sırasıyla 481kwh ve 470kwh olarak ölçmüşlerdir [12].

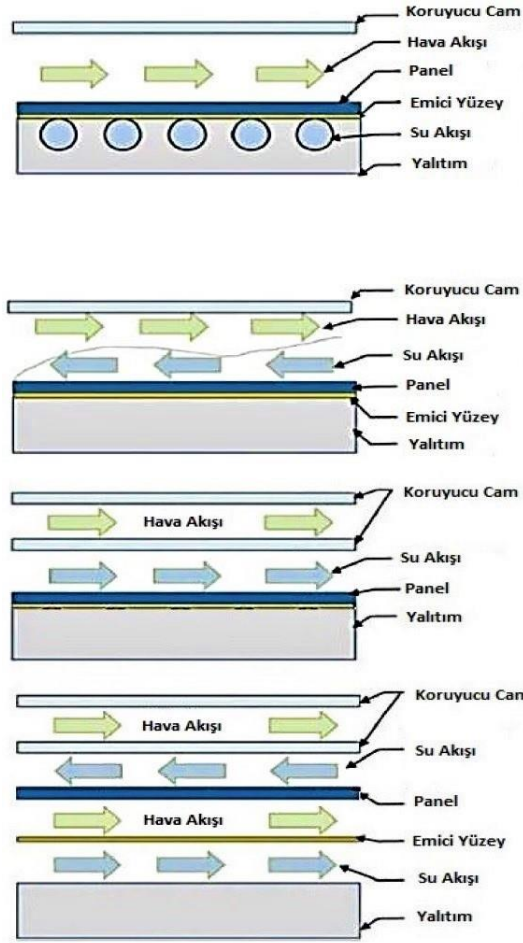
Yang ve arkadaşları çatıya entegre PV-T (BİPVT/a) hava sistemi üzerine deneysel çalışma yapmışlar bu sisteme ait kolektöre iki hava girişi uygulandığı takdirde termal verimin %5 arttığını ve fotovoltaik panelin sıcaklığının 1,5°C daha düştüğünü tespit etmişlerdir. Bununla beraber sisteme eklenen dikey cam kaplı hava kolektörünün termal verimi %8 oranında arttırdığını ve fotovoltaik panelin sıcaklığını çatı uzunluğu 5-6 metre olan sistemlerde 5-10°C düşürdüğünü eklemişlerdir [13].

Agrawai ve arkadaşları soğuk iklim koşullarda elektrik enerjisi üretimi ve ortam ısıtması için termal enerji üretimi üzerine çatı tipi BİPVT/a sistemini araştırmışlardır. Toplamda 65m² kolektör alanına sahip 7,2kW kurulu elektriksel gücü olan bu sistemin kanallardan 1,2kg/sn kütleli debide hava sirkülasyonu sağlayan 0,12kW kapasitede fanlar mevcuttur. Test sonuçlarına göre yıllık 16.209 kWh elektrik enerji ve 1.531kwh termal enerji üretimi sağlanmış olup termal verim %53,7 oranında gerçekleşmiştir [14].

Hava kolektörlü PV-T'ler hem düşük derecede termal, hem de yüksek derecede elektriksel enerjilerin aynı ünitelerden elde edilmesi gibi bir avantajı beraberinde getirir. Sonuç olarak, bu sistemler iki ayrı ünitenin maliyetinden çok daha ucuz maliyete sahiptir.

2.2. PV-T Su Kolektörü

PV-T su kolektörleri, hava kolektörlerinden farklı olarak su sızdırmamalı, elektrik yalıtımlı olmalı, su sirkülasyonu ve ısı transferi için gerekli borulara sahip olmalıdır. Bu nedenle oldukça pahalı bir sistemdir. Yüksek akış debisi nedeniyle fotovoltaik panelin sıcaklığının azaltılması hususunda oldukça etkili bir kolektördür. Kullanılabilir bir termal enerji elde edilebilmesi için akış debisinin düşük olması ve düşük boru çapları kullanılması gerekmektedir. PV-T sisteminin etkili kullanımı, ekonomik ömrünün iyileştirilmesi, optimum bir elektrik ve termal başarımları için ideal bir akış debisi belirlenebilir.



Şekil 3. Farklı yapıdaki su kolektörleri

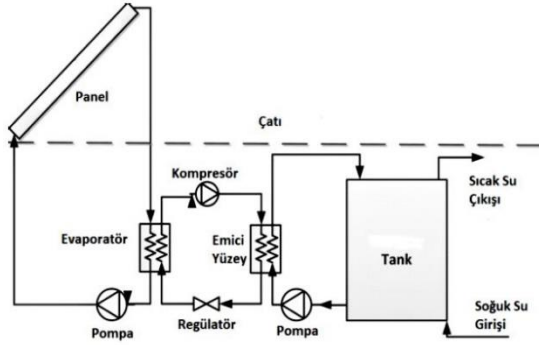
Fudholi (2014), Fotovoltaik modülden üretilen bir PV-T panelin verim analizini yapmıştır. Ulaşılmış olduğu veriler sonucunda 800W/m^2 bir ışınım ve $0,041\text{kg/s}$ su debisinde, %13 fotovoltaik verim ve %52 termal verim elde etmiştir. Farklı debi ve akış hızının fotovoltaik paneldeki soğutmayı etkilediği gözlenmiştir. Ayrıca sıcak su üretiminin de etkilediğini tespit edilmiştir [15].

Anderson ve arkadaşları çatıya entegre PV-T su sisteminin teorik olarak analizini yapmışlardır. Sonuçlar göstermiştir ki kanatçık verimleri, kullanılan katmanlı yapı tekniği, termal iletkenlik gibi temel tasarım parametreleri elektriksel ve termal verimleri belirgin bir şekilde etkilemektedir. Bununla beraber kolektör içerisinde yer alan PV panelin altındaki bakır ve alüminyumdan üretilmiş emilim plakasının daha düşük fiyatlı yüzey işlemi görmüş çelik plakayla değiştirilmesinin verimi çok etkilemediği görülmüştür. Aynı zamanda bu çalışmada PV-T kolektörlerini çatının üstüne koymak yerine çatıya gömülü şekilde montajlamak yalıtım açısından daha etkili bir yalıtım tekniğini ortaya çıkaracağı belirtilmiştir [16].

Mishra ve arkadaşları iki farklı PV-T su kolektörü tasarımını incelemişlerdir. İlk tasarımda PV panelleri PV-T kolektör yüzeyinin bir kısmını, ikinci tasarımdaysa PV-T kolektör yüzeyinin tamamını kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan yıllık ölçümlerde ilk tasarımdan ikinci tasarıma geçildiğinde termal verimin %9,48 oranında düştüğü toplam net ekserjinin %39,16 oranında arttığı görülmüştür [17].

2.3. Soğutucu Temelli PV-T Kolektörü

Güneş panellerinin elektriksel verimlerinin panel yüzey sıcaklığı arttıkça azaldığı bilinmektedir. PV-T su veya PV-T hava kolektörlerinde her ne kadar fotovoltaik panel soğutulsa da ideal bir verim sağlanabilmesi için hedeflenen en uygun sıcaklık 25°C civarında olmalıdır. Bundan dolayı PV-T kolektöründen daha fazla elektriksel verimin sağlanabilmesi için kolektörün içerisinde su ya da hava yerine soğutucu akışkan geçirilmesi fikri soğutucu temelli PV-T kolektör sistemini ortaya çıkarmıştır. PV panellerinin yer aldığı kolektör yüzeyi daha düşük sıcaklıklarda tutulabilmektedir. Bununla beraber bu sistemde kolektör üzerinde soğutucu akışkana aktarılan kaynağı güneş ışınımı olan termal enerji yoğunlaştırıcı kısmında ısıtma suyuna aktarlabilmektedir. Yoğunlaştırıcı içerisinde ısı transferi soğutucu akışkanın termodinamik özelliklerinden dolayı daha yüksek sıcaklıkta meydana geldiği için soğutucu temelli PV-T sisteminin termal verimi de oldukça yüksektir.



Şekil 4. Soğutucu temelli PV-T kollektör örneği

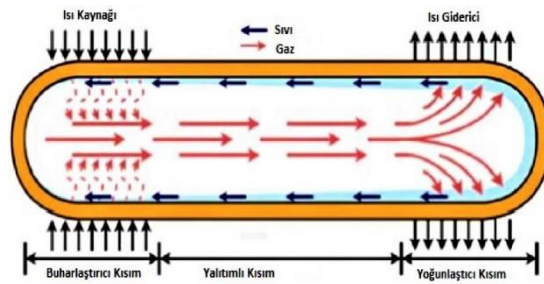
Fu ve arkadaşları Hong Kong iklim koşullarında R134 soğutucu akışkanını kullanarak yeni bir fotovoltaik güneş enerji destekli ısı pompasını deneysel olarak çalıştırmışlardır. Bu sistemin güneş destekli ısı pompası, hava kaynaklı ısı pompası ve ısı kanalı şeklinde üç farklı çalışma şekli bulunmaktadır. Deneysel sonuçlara göre güneş destekli ısı pompası modunda sistemin günlük toplam enerji verimi %61 ile %82,1 arasında değişmektedir. Bununla beraber güçlü güneş radyasyonu altında ısı pompasının ortalama başanım katsayısı (COP) 4,01'e ulaşmaktadır [18]. Chen ve arkadaşları R134a soğutucu akışkan kullanılan PV-T sisteminde PV panel yüzeyinin soğutulmasıyla elektriksel verimin %2,7'den %4,6'ya çıktığını gözlemlemişlerdir [19].

Jie ve arkadaşları soğutucu akışkan olarak R22 gazını kullanan güneş enerji destekli ısı pompasının verimlerini ölçmüşlerdir. 4 farklı (20, 30, 40 ve 50°C) yoğunlaştırıcı giriş sıcaklığına göre fotovoltaik panelin elektriksel verimini artırarak sırasıyla %10,4, %16,1, %5,4, %8,3 oranında gerçekleştirmişlerdir [20].

Gang ve arkadaşları yeni bir çift ısı kaynaklı (Güneş radyasyonu ve havanın termal enerjisi) ısı pompalı sıcak su sisteminin deneysel ve teorik incelemesini yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre ortalama elektriksel ve termal verim sırasıyla %14,5 ve %36,02 oranında gerçekleşmiştir. Toplam verim %50'nin üzerindedir. ısı pompasının ve sistemin başarımlık katsayısı ise sırasıyla (COP ve COP_{sys}) ortalama 4,08 ve 3,07 oranında gerçekleşmiştir [21]. Minglu Qu ve arkadaşları da yeni bir çift ısı kaynaklı ısı pompalı sıcak su sisteminin deneysel incelemesini yapmışlardır. Deney esnasında PV panelin operasyonel sıcaklığı 45°C'ye kadar düşürülmüş buna bağlı olarak elektriksel verimi %10,3 oranında arttırılmıştır [22].

2.4. Isı Borulu PV-T Kollektörü

Isı boruları, termal iletkenliği ve fazlar arası geçiş mekanizmasını bütünleştirdiği için ısı transferi açısından oldukça verimlidir. Şekil 5'te görüldüğü gibi konvansiyonel ısı borusu buharlaştırıcı, yalıtımlı ve yoğunlaştırıcı kısım olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 5. Isı borulu PV-T kollektörünün soğutması

Isı borulu PV-T kollektörlerinde fotovoltaik panelinin hemen altında düz tabakalı ısı boruları bulunmaktadır. İçinde çok sayıda mikro kanal dizisine sahip ısı borularının fotovoltaik panel ile temas eden kısmı buharlaştırıcı kısmı oluşturmaktadır. Burada sıvı fazından gaz fazına geçen soğutucu madde fotovoltaik panelin termal enerjisini azaltır. Diğer uçtaki kısım ise yoğunlaştırıcı kısmını oluşturmaktadır. Burada soğutucu akışkan, üzerindeki termal enerjiyi ısı değiştiriciler üzerinden soğutma suyuna atarak gaz fazından sıvı fazına geçmektedir. Böylece fotovoltaik panel ile ısı değiştiriciler arasında çok etkili bir ısı transfer mekanizması ve düşük bir termal direnç oluşumu sağlanmaktadır. Sonuç olarak ısı borulu PV-T sisteminde fotovoltaik panellerin elektriksel verimi %15-30 oranında iyileştirilebilmektedir.

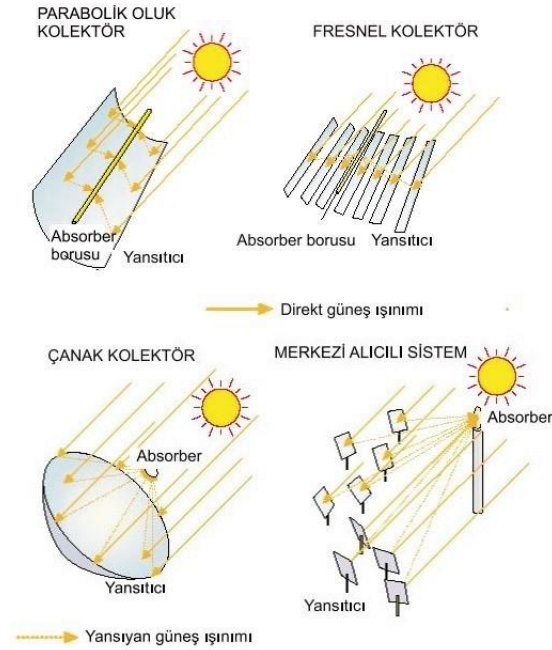
Zhang ve arkadaşları yeni bir konsept olan döngülü ısı borulu PV-T sisteminin deneysel çalışmasını yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre sistemin elektriksel verimi, termal verimi ve toplam verimi sırasıyla %10, %40, %50 oranında gerçekleşmiştir. Bunun yanında bu çalışmada sistemin başarımlık katsayısını etkileyen güneş radyasyonu, çevre sıcaklığı, cam kaplama, rüzgâr hızı gibi parametrelerin bireysel olarak sistemin başarımlık katsayısını nasıl etkilediği araştırılmıştır [23].

2.5. Yoğunlaştırıcı PV-T Kollektörü

Diğer bir PV-T kollektör çeşidi yoğunlaştırıcı PV-T kollektörleridir. Güneş ışınımının PV-T kollektör üzerinde yoğunlaştırılması prensibi ile çalışmaktadır. Güneş ışınımının yoğunlaştırılması lineer ya da dairesel frezel lensleri, bileşik

parabolik yoğunlaştırıcı (CPC), reflektörler ya da parabolik yansıtıcılar ile yapılmaktadır [24].

PV-T sistemlerine yoğunlaştırıcı elemanlar eklenerek aynı yapı üzerinde hiç bir değişiklik yapmadan elektriksel ve termal enerji verimleri artırılabilir. Konvansiyonel PV-T sistemlerine göre artan bu elektriksel verim yoğunlaştırıcı kullanılan sistemlerde daha iyi bir finansal sonuç ortaya çıkarabilir. Yoğunlaştırıcı birimler boyutsal olarak önemli ölçüde büyük olması nedeniyle uygulamadaki çatı üstü PV-T sistemlerinde sınırlı bir oranda kullanılabilir. Çatı üstüne entegre yoğunlaştırıcı PV-T sistemlerinin (BICPV-T) hem binanın çatısına hem de yan yüzeyine montajı sağlanabilmektedir. Tek aks takip sistemli tasarımların binaya montajları daha uygundur. Tipik bir yoğunlaştırıcı PV-T sistemin şematik çizimi Şekil 6'da görülmektedir [25].



Şekil 6. Yoğunlaştırıcı PV-T kolektörleri

Garg ve Adhikari (1999), bir sürü kesilmiş bileşik parabolik yoğunlaştırıcının tek bir PV-T panelde kullanılmasını araştırmıştır. Sonuç olarak, yoğunlaştırma oranı üç olan hava ısıtması için kullandıkları kolektörün bir sisteme entegre edilmesi durumunda çok daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır [26].

Othman ve arkadaşları (2005), lineer Fresnel reflektörleri kullanarak yoğunlaştırıcı PV-T kolektörü araştırmıştır. Yoğunlaştırma oranı 11 olan bu kolektörden elektriksel yük olmadan en fazla %60 termal verim elde etmiştir. PV-T sistemdeki en büyük termal direncin fotovoltaik

paneller ile emici yüzey arasında gerçekleştiğini tespit etmişlerdir [27].

Canan Kandilli spektral ayrıştırıcı metot kullanılarak tasarlanmış yeni bir yoğunlaştırıcı kombine sisteminin (CPVCS) deneysel incelemesini yapmıştır. Bu sistemde yoğunlaştırıcı yansıtıcının odak noktasında görünür ışığın ötesindeki ultraviyole ve kızılötesi gibi ışınları yansıtan sıcak ayna bulunmaktadır. Sıcak aynadan yansıyan ultraviyole ve kızılötesi ışınlar uygun bir optik tasarımla vakum tüplerine gönderilerek vakum tüplerinde kullanılabilir ısı enerjisi üretilmektedir. Sıcak aynadan geçen görünür dalga boyundaki ışınlar fotovoltaik panelin yüzeyinde elektrik enerjisine çevrilmiştir. Test sonuçlarına göre bu sistemde PV hücre başına 4,6W elektriksel güç üretilmiştir. PV hücrede yoğunlaştırıcı olmadan üretilen güç 3,6W olduğundan elektriksel verim hücre başına %27,8 oranında artış sağlanmıştır. Vakum tüpünde ise 141,2W değerinde ısı güç elde edilmiştir [28].

Xu ve arkadaşları düşük yoğunlaştırıcı ısı pompalı PV-T sisteminin (LCPV/T-HP) başanını incelemesini yapmıştır. Sabit kesilmiş parabolik yoğunlaştırıcı güneş ışığını ısı pompasının buharlaştırıcısını oluşturan PV-T kolektörünün PV panellerinin bulunduğu yüzeyine yönlendirmektedirler. Deneysel sonuçlarına göre güneşli yaz günlerinde sistemin başarımlık katsayısı (COP) 4,8 olarak gerçekleşmiş ısıtma amacıyla kullanılan suyun sıcaklığı 40°C'den 70°C'ye çıktığı gözlemlenmiştir. Aynı deneysel şartlarda elektriksel verim %17,5 olarak gerçekleşmiştir. Bu değer düşük yoğunlaştırıcı fotovoltaik panelin (LCPV) verimine göre 1,36 kat daha büyüktür. Bunun yanında düşük yoğunlaştırıcı parabolik yoğunlaştırıcının konsantrasyon oranı 1,6 olarak ölçülmüştür [29].

2.6. Hibrit PV-T Kolektörü

Çatı üstü enerji üretim sistemlerinin beklenen verim konusunda kendine özgü koşul ve sınırlandırmaları bulunmaktadır. Bu sebeple istenilen enerji ihtiyacının karşılanabilmesi ve verimliliğin artırılması amacıyla birden fazla sisteme ihtiyaç duyulabilmektedir. Hibrit'ten kast da çatı üstü enerji üretiminden elde edilen enerjinin de kullanılabilmesidir. Yani fotovoltaik paneli soğutmak için kullanılan akışkanın su ısıtmasında veya başka bir ihtiyaç için kullanılmasıdır.

PV sistemler genelde yüzde %5-20 verimlilikte çalışan ve geri kalan ısı enerjisini çevresine yayan verimliliği düşük sistemlerdir. Bu sebeple PV

sistemlerden üretilen ısı ve elektriği verimli bir şekilde kullanabilmek için BIPV/T gibi sistemler tasarlanır.

Engin ve Çolak, (2006) "PV/T Hibrit Sistemin İzmir Koşullarında Analizi" isimli çalışmalarında PV-T sistemlerin elektriksel ve termal verimini incelemiş; binaların elektrik, sıcak su ve ısıtma gibi gereksinimlerinin karşılanmasında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmalarda yan saydam fotovoltaiik panel ve Titanyum Dioksit kaplamalı düzlemsel kollektörleri bir arada kullanılmıştır. Kurulmuş olan hibrit sistemde en çok verimin elde edilebilmesi için sistem parametreleri optimize edilmiştir. Sonuç olarak; PV-T panelin verimini, termal kollektör ve güneş panelinin verimleriyle karşılaştırılmıştır [30].

Agrawai ve arkadaşları mikro-kanallı termal hücreleri Hindistan'ın Srinagar Şehrinin iklim koşulları altında değerlendirmiştir. Bu değerlendirmede PV-T hücrelerin ortalama elektrik ve termal verimliliğinin sırasıyla %14,7 ve %10,8 olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, %20,28'lik en çok enerji verimliliğine 0,000108 kg/s akışkan oranında ulaşıldığı gözlemlenmiştir [14].

Chow ve arkadaşları tamamen klima ile donatılmış bir binanın dikey duvarlarına monte edilmiş polikristal güneş pilleri ve düz termal emici plaka ihtiva eden özel bir hibrit PV-T su kollektörlerinin ılıman iklim koşullarında başarılarını ölçmüşlerdir. Yapılan yıllık değerlendirmede termal verim %37,5, elektriksel verim %9,39 oranında gerçekleşmiştir. Bu durumda söz konusu PV-T sisteminin yatırım maliyetini yaklaşık 14 yılda karşılayacağı hesaplanmıştır [2].

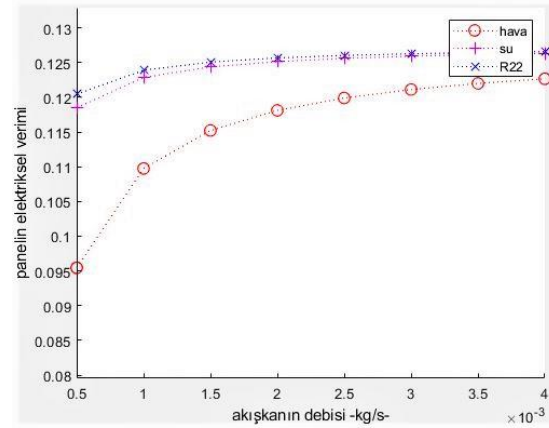
Sonuç olarak; hibrit PV-T sistemlerin kapladığı alandan üretilen elektrik ve termal enerji, bu alana karşılık gelen alanın yarısının fotovoltaiik panel ve diğer yarısının güneş kollektörüyle kaplanması durumunda elde edilebilecek enerjiden daha fazladır.

3. SONUÇLAR

İkinci bölümde de değinildiği gibi hibrit fotovoltaiik termal sistemleri (PV-T) yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisini termal ve elektrik enerjisine çevirdiği için son dönemde akademik çevrelerce rağbet gören, gelişmeye açık, gelecek vaat eden çevreci bir enerji üretim sistemidir. PV-T kollektörleri güneş enerjisini hem elektrik hem de termal enerjiye dönüştürdüğü için birim alandaki toplam enerji çevrimi oldukça yüksektir. Bununla beraber PV-T sistemde fotovoltaiik paneller soğutulduğu için elektriksel verimleri geleneksel fotovoltaiik sistemlere göre daha yüksektir.

Bu bildiri çalışmasında çatı üstü enerji üretiminde kullanılan PV-T kollektörlerinin uygulanma şekli ve başarımlarını anlatılmıştır. Farklı tip PV-T kollektörlerin çatılara entegrasyonu gösterilmiştir. Ayrıca çatıya entegre termal ve PV sistemlerin karakteristik farklarına da değinilmiştir. Yapılan literatür taraması ve akademik incelemeler sonucunda aşağıdaki hususlara ulaşılarak binalarda kullanılan termal ve elektrik enerjisi yenilenebilir enerjiden karşılamak için bir nebze de olsa çözüm aranmaya çalışılmıştır. Böylelikle çatı üstü enerji üretim sisteminde dikkat edilmesi gereken hususlar, sistemin faydaları, zararları ve sistemin verimliliğini arttırmak için önerilen çözümlere yer verilmiştir.

Şekil 7'de Matlab programında eşitliği yapılan PV-T sistemin elektriksel veriminin akışkan debisinin artmasına göre arttığı görülmektedir. Özgül ısı en düşük olan havanın elektriksel verim artışı %26 olarak hesaplanmıştır. Ancak çatı üstü sistemlerde açığa çıkan havanın termal kullanımını daha zordur. Özgül ısı birbirine yakın olan su ve R22 sıvılarının elektriksel verim artışı sırasıyla 5,9 ve 4,1 olarak hesaplanmıştır. Suyun termal olarak kullanımını en kolay olduğundan dolayı çatı üstü uygulamalarda en rahat şekilde kullanılabilir.



Şekil 7. Panelin elektriksel veriminin akışkan debisine göre değişimi

Yapılan çalışmadan da anlaşılacağı üzere, özgül ısı daha yüksek olduğundan dolayı çatı üstü uygulamalarda akışkan olarak su seçilmesi hava seçilmesinden elektriksel verim açısından daha etkilidir. Ayrıca havanın termal kullanımının zor olması ve hava sistemlerinin hantal olmasından dolayı çatı üstü sistemlerde akışkan olarak hava yerine su seçilebilir.

PV-T sisteminin etkili kullanımı, ekonomik ömrünün iyileştirilmesi, en verimli elektrik ve termal başarımları için ideal bir akış debisi belirlenebilir. Bu noktada artan akış debisinin 25°C

değerine kadar elektriksel verimi arttırdığı fakat akışkanın debisi çok artarsa termal verimi düşürdüğü unutulmamalıdır.

Birbirine seri bağlı olan panellerin sayısının artması akışın sonuna doğru akışkanın ısınması nedeniyle elektriksel verimi düşürmektedir. Bununla beraber fotovoltaik panelinin güneşe maruz kalan yüzeyiyle arka yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının yüksek olması da elektriksel verimi düşüren etkenlerdendir.

PV-T hava kolektörleri sıvı kolektörler ile karşılaştırıldığında düşük yoğunluk, düşük ısı sığası ve düşük termal iletkenliği nedeniyle düşük ısı transfer katsayısına sahiptir. Dolayısıyla sıvı kolektör sistemlerine göre daha hantal yapılıdır. PV-T hava kolektörlerinde sızma ya da donma sorunu bulunmamaktadır. Sistemi soğutmak için fan kullanıldığı takdirde gürültü sorunu ortaya çıkabilmektedir.

PV-T su kolektörleri, hava kolektörlerinden farklı olarak su sızdırmamalı, elektrik yalıtımı olmalı, su sirkülasyonu ve ısı transferi için gerekli borulara sahip olmalıdır. Yüksek akış debisi nedeniyle fotovoltaik panelin sıcaklığının azaltılması hususunda oldukça etkili bir kolektördür. Kullanılabilir bir termal enerji elde edilebilmesi için akış debisinin düşük olması ve düşük boru çapları kullanılması gerekmektedir.

PV-T kolektörlerinde enerji verimi bakımından mono-kristal sistemler daha verimliken, ekonomik anlamda amorf silikon daha faydalı olabilmektedir.

PV-T hava kolektörleri, havanın yoğunluğu, ısı kapasitesi ve termal iletkenliğinin düşük olması sebebiyle verimliliği düşük sistemlerdir. Ancak, yüksek akış hızı ve düşük besleme sıcaklığı ile yüksek termal dönüşüm verimliliği sağladığı da olmaktadır. Ayrıca daha yüksek kolektör verimi elde etmek için; hava akış yönü boyunca ince bir konfigürasyona sahip, emme ve taban plakaları arasındaki boşluğu az, emiciliği yüksek emisyonu düşük bir kaplaması olan, kütle akış hızını yüksek tutabilen ve giriş sıvısı ile ortam sıcaklığını birbirine çok yakın tutabilen termal hava kolektörleri kurmak gerekmektedir.

Suyun ısınma kapasitesinin havadan yüksek olması sebebiyle PV-T su kolektörlerin termal verimliliği hava bazlı termal kolektörlerden daha yüksektir. Günümüzde düz plakalar en çok kullanılan çeşidi olurken, ısı nakil borulu sistemler de yüksek maliyetli olmasına rağmen, tüplerin etkin bir şekilde kontrol edilebilmesi sebebiyle gelecek vaat eden bir tasarım olarak değerlendirilmektedir.

Isı borulu PV-T kolektörlerinde ısı kazanımı, elektrik kazancı ve PV-T verimi artan akış hızı ile doğru orantılıdır. Su akış hızının termal kazanç üzerindeki etkisi elektriksel kazanımdakine göre çok daha yüksektir. Ayrıca, ısı borusu yuvalarındaki boşluğun azalması PV-T verimliliği artıracaktır.

Boru tahliyeli kolektörlerde U-tube tasarımının başarmında daha iyi olduğuna ulaşılmıştır. Ayrıca cam boru tahliyeli kolektörlerde termal verimini değerlendirmek için sadece ısı verimliliğini değil, dış emici kaplamanın yüzey sıcaklığını da dikkate almak gerekmektedir.

Camlı PV-T kolektörler panellerin örtülü yapısı sayesinde genelde daha yüksek termal enerji çıkışı sağlarlar. Ayrıca, V oluklu kolektörler düz plaka ve kanatlı kolektörlerden daha verimliken bunların arasında en verimsiz olanı düz plaka yapılarıdır.

PV-T sistemlerin kapladığı alandan üretilen elektrik ve termal enerjileri, karşılık gelen alanın yarısının fotovoltaik panel ile ve diğer yarısının güneş kolektörüyle kaplanması durumunda elde edilecek enerjiden daha fazladır. Bu yüzden çatı üstü PV-T enerji üretim sistemleri geleceğin yenilenebilir enerji kaynağı olma potansiyeline fazlasıyla sahiptir. Fotovoltaik panelin sıcaklığı 25°C civarında tutularak yüksek elektrik verimi sağlanabilir. Ayrıca sıcaklığın oluşturacağı bozulmanın azalmasından dolayı panelin kullanım ömrü artar.

Bu çalışmada yapılan araştırma ve incelemelerde görüldüğü üzere, çatı üstü enerji üretiminde ihtiyaca göre PV-T sistem akışkanının debisi değiştirilerek termal ve elektriksel üretim oranı ayarlanabilir. Sonuç olarak; panel ve ortam sıcaklığını ölçüp akışkan debisini ayarlayan otomasyon sistemiyle termal ve elektriksel üretim istenilen oranda yapılabilir.

4. KAYNAKLAR

- [1] URL-1:<http://www.kiracgalvaniz.com.tr/solar-enerji>, (Ziyaret tarihi: 02.05.2019).
- [2] Chow vd., A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology., Applied Energy 87 (2010) 365–379 doi:10.1016/j.apenergy.2009.06.037.
- [3] S.A. Kalogirou, Y. Tripanagnostopoulos, Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production, Energy Convers. Manage. 47 (2006) 3368–3382.
- [4] Reddy vd., A review of PV-T system: Thermal management and efficiency with single phase cooling., Int. J. Of Heat and Mass Transfer 91 (2015) 861-871.

- [5] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 16 (2012) 1383–1398.
- [6] T.T. Chow, G.N. Tiwari, C. Menezo, Hybrid solar: a review of photovoltaic and thermal power integration, *Int. J. Photoenergy* (2012) 307287.
- [7] K. Moradi, M. Ali Ebadian, C. Lin, A review of PV/T technologies: effects of control parameters, *Int. J. Heat Mass Transfer* 64 (2013) 483–500.
- [8] S.B. Riffat, E. Cuce, A review of hybrid photovoltaic/thermal collectors and systems, *Int. J. Low Carbon Technol.* 6 (2011) 212–241.
- [9] Zondag HA, vd., The yield of different combined PV-thermal collector designs. *SolEnergy* 2003;74:253–69.
- [10] Micheal vd., Flat plate solar photovoltaic – thermal (PV/T) systems: A reference guide.
- [11] Hegazy Adela., Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Convers Manag* 2000;41:861–81.
- [12] Kamthania vd., Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal double pass facade for space heating. *Energy Build* 2011;43.9:2274–81.
- [13] Yang vd., A study of design options for a building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system with glazed air collector and multiple inlets. *SolEnergy* 2014;104:82–92.
- [14] Agrawai vd., Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions. *Appl Energy* 2010;87:417–26.
- [15] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M., Ruslan, I., Kazem, H., 2014. Performance Analysis of Photovoltaic Thermal (PVT) Water Collectors. *Energy Conversion and Management*, 78, s641-651.
- [16] Anderson vd., Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) solar collector. *Sol Energy* 2009;83:445–55.
- [17] Mishra vd., Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal water collector for constant collection temperature mode. *Sol Energy* 2013;90:58–67.
- [18] Fu HD vd., Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat-pump / heat-pipe system. *Appl Therm Eng* 2012;40:343–50.
- [19] Chen Hongbing vd., Experimental study on a hybrid photovoltaic / heat pump system. *Appl. Therm Eng* 2011;31:4132–8.
- [20] Jie Ji, vd., Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system. *SolEnergy* 2008;82.1:43–52.
- [21] Wang vd., Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system *Gang Energy and Buildings* 108 (2015) 175–184.
- [22] Minglu vd., Experimental study on the operating characteristics of a novel photovoltaic/thermal integrated dual-source heat pump water heating system. *Applied Thermal Engineering* 94 (2016) 819–826.
- [23] Zhang vd., Characterization of a solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump water heating system. *Appl Energy* 2013;102:1229–45.
- [24] Kundakçı B., 2010, Model Bir PV/T Trombe Duvarın Enerji Analizi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [25] Bernardo vd., Performance evaluation of low concentrating photovoltaic/thermal systems: a case study from Sweden. *SolEnergy* 2011;85:1499–510.
- [26] Garg, H.P., and Adhikari, R.S., 1999, System performance studies on a photovoltaic/thermal (pv/t) air heating collector, *Renewable Energy*, 16, 725- 730p.
- [27] Othman, M.Y.H., Yatima, B., Sopian, K. and Bakar, M.N.A, 2005, Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins, *Renewable Energy*, 30, 2005–2017p.
- [28] Canan Kandilli, Performance analysis of a novel concentrating photovoltaic combined system. *Energy Convers Manag* 2013;67:186–96.
- [29] Xu vd., Experimental study on the operating characteristics of a novel low-concentrating solar photovoltaic/thermal integrated heat pump water heating system. *Appl Therm Eng* 2011;31:3689–95.
- [30] Engin D., Çolak M., 2008. Yarı Saydam Güneş Pili/Termal Toplayıcı (PV/T) Hibrit Sistemin İzmir Koşullarında Analizi. *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2, s1-13.

Serdar UYAR



Serdar UYAR, 1991'de Samsun'da doğdu. 2009 yılında Samsun Fen Lisesi'nden mezun oldu. Lisansını Kayseri'de Elektrik-Elektronik Mühendisliği üzerine 2014 yılında tamamladı. 2020 yılında Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesinde Elektrik-Elektronik Mühendisliği alanında yüksek lisans çalışmalarını tamamladı. Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesinde Elektrik-Elektronik Mühendisliği doktora bölümünde eğitimine devam ediyor. Uzmanlık alanları yenilenebilir enerji, elektrik işleri proje hazırlanması ve kontrollük yapılmasıdır.

Atabak NAJAFİ



1982 İRAN doğumludur. 2009 yılında İran Tahran Üniversitesinden Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Eylül 2016'da Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden Doktora derecesi aldı. Uzmanlık alanları elektrik makineleri, güç elektroniği, arıza tespiti ve makine öğrenmesidir. Dr.Najafi çeşitli KOSGEB ve sanayi proje kapsamında görev almıştır.

REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri

REZES Internet of Things Based Recycling Application Systems

Sezer Uğuz¹, Gül Tokdemir¹

¹Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Çankaya Üniversitesi, Ankara, Türkiye
sezeruguz1@gmail.com, gtokdemir@cankaya.edu.tr

Öz

Nüfus artışı ve plansız sanayileşmenin sonucunda oluşan çevre kirliliği, insanoğlunun neden olduğu en büyük sorunlardan birisidir ve her geçen gün canlı ve cansız varlıklara olan olumsuz etkisi artarak devam etmektedir. Çevre kirliliğinin oldukça büyük bir kısmını oluşturan plastik, cam ve teneke kutu gibi geri dönüştürülmesi mümkün olan katı atıkların doğaya bırakılması sonucunda toprak ve su kirliliği meydana gelmektedir. Bu çalışmada sunulan sistem ile çevre kirliliği probleminin yenilikçi bir çözüm getirilerek, geri dönüşümün akıllı bir şekilde yapılması hem ekonomik katma değer sağlayıp hem de çevre kirliliğinin önlenmesi amaçlanmaktadır. REZES (Yenilenebilir Enerji Sıfır Enerji İsrafi) sistemi, Nesnelerin İnterneti, Görüntü İşleme, Büyük Veri Analizi ve Oyunlaştırma gibi en yeni teknoloji ve metotların kullanılmasıyla akıllı bir geri dönüşüm sistemi sunmaktadır. Böylelikle plastik, cam ve teneke kutu gibi katı atıkların geri dönüştürülmesi konusuna yenilikçi bir çözüm getirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çevre Kirliliği, Yenilenebilir Enerji, Akıllı Geri Dönüşüm, Nesnelerin İnterneti, Oyunlaştırma, QR Kod.

Abstract

Environmental pollution, which occurs as a result of population growth and unplanned industrialization, is one of the biggest problems caused by human beings and its negative effect on living and non-living beings continues to increase day by day. Soil and water pollution occurs as a result of leaving recyclable solid wastes such as plastic, glass and tin cans, which constitute a large part of environmental pollution, to nature. With the system presented in this study, it is aimed to bring an innovative solution to the environmental pollution problem and to make the recycling in a smart way, providing economical value and preventing environmental pollution. The REZES (Renewable Energy Zero Energy Waste) system offers a smart recycling system using the latest technologies and methods such as Internet of Things, Image Processing, Big Data Analysis and Gamification. In this way, an innovative solution is provided for the recycling of solid wastes such as plastic, glass and tin cans.

Keywords: Environment Pollution, Renewable Energy, Smart Recycling, Internet of Things, Gamification, QR Code.

1. Giriş

Günümüzde çevre kirliliği dünya çapında önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu sorunun büyük bir kısmı plastik, cam ve teneke kutu gibi geri dönüştürülebilir katı atıklardan kaynaklanmaktadır. Hava, toprak ve su kirliliği, bu katı atıkların çevreye atılmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenlerden dolayı hem insan sağlığı hem de doğa tehlikededir. Hava kirliliği insan sağlığına büyük ölçüde zarar verir ve solunum yollarını olumsuz yönde etkileyerek akciğer kanseri ve diğer akciğer hastalıklarını tetikler [1]. Öte yandan, toprak ve su kirliliği nedeniyle, tüm canlılar ve doğa tehdit altındadır.

Çevre kirliliğinin oldukça büyük bir kısmını oluşturan plastik, cam ve teneke kutu gibi geri dönüştürülmesi mümkün olan katı atıkların doğaya bırakılması sonucunda toprak ve su kirliliği meydana gelmektedir. Bu gibi atıkların azaltılması, kaynaklarında ayrıştırılması ve dolayısıyla kaynak israfının önlenmesi amacıyla uygulanan geri dönüşüm süreçleri çevre kirliliğinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanında geri dönüştürülebilir atıklar döngüsel ekonominin de önemli unsurlarından biri olarak görülmektedir [2]. Geri dönüştürülebilir atıklar endüstriyel üretim ve konutsal kaynaklı olabilmekte, ayrıştırılma ve çeşitli işlemlere tabii tutulduktan sonra geri dönüştürülebilmektedirler. Gelişmiş ülkeler kentsel geri dönüşüm faaliyetlerini belediyeler aracılığıyla başlatarak büyük başarılar elde etmişlerdir [3, 4].

Marcus Eriksen ve ark. [5], dünya okyanuslarının yüzeyinde 268,940 ton ağırlığında minimum 5,25 trilyon plastik parçası buldular. Su kirliliği hem suda yaşayan canlılara hem de suya ihtiyaç duyan toprak ve bitkilere ciddi şekilde zarar vermekle birlikte yeraltı sularının da kirlenmesine sebebiyet vermektedir. Bunun sonucunda ürünler verimli ve sağlıklı bir şekilde üretilmemektedir. Bu nedenlerden dolayı, hayat durma noktasına gelebilir. Çevre kirliliği probleminin önlenmesi ancak geri dönüşüm konusundaki farkındalığın artırılması ile sağlanabilir.

Günümüzde TOMRA, RVM Systems gibi şirketler geri dönüşüm amaçlı makineler üretmişlerdir. TOMRA [6] geri dönüşüm otomatları yapan lider şirketlerden biridir. 48 yıldır sensör bazlı makineler ve geri dönüşüm çözümleri üretmektedir. TOMRA, dünya genelinde 82.000'den fazla geri

dönüşüm makinesi kurulumu gerçekleştirmiştir. TOMRA'nın bulunduğu yerlerde, kullanıcılar atıkları makineye attıkları anda alışverişte kullanmaları için kâğıt bir kuponla ödüllendirilir. 2017 yılından itibaren TOMRA dijitalleşmeye geçerek mobil uygulama versiyonunda dijital barkoda sahip kuponla kullanıcıları ödüllendirmeye başlamıştır. RVM Systems şirketi de TOMRA gibi köklü bir geçmişe sahip ve 20 yıldan fazla geri dönüşüm çözümleriyle ilgilenen bir şirkettir. RVM Systems geri dönüşüm makineleri geliştirmekte, üretmekte ve bakımını yapmaktadır [7]. RVM Systems makinelerinin bulunduğu yerlerde de kullanıcılar bir alışveriş kuponuyla ödüllendirilmektedir. RVM Systems, dünya genelinde 5.000'den fazla geri dönüşüm makinesi kurulumu gerçekleştirmiştir. Avrupa ve Amerika'daki örneklerin dışında, Türkiye'de İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından 2018 yılında akıllı geri dönüşüm konteyneri uygulaması hayata geçirilmiştir. Bu uygulamada plastik ve teneke atıkların tek bir hazneye toplanmasıyla geri dönüşüm gerçekleşmektedir. Bu geri dönüşümdeki ödül, alışveriş kuponu yerine İstanbul ulaşım kartına bakiye yüklemesi olarak gerçekleşmektedir [8].

Gelişen teknolojiyle birlikte geri dönüşüm makinelerinin işlevsel özellikleri de gelişmektedir. Sensörler ve mikroişlemciler sayesinde geri dönüşüm makineleri de dijitalleşmeye ayak uydurmaktadır. REZES projesiyle yeni nesil geri dönüşüm sistemi geliştirilerek mevcut sistemlerde bulunmayan yeni özellikler eklenmiştir.

2. REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri

REZES günümüz teknolojilerini içinde barındıran yeni nesil bir geri dönüşüm sistemidir. REZES çevre kirliliği sorununa mevcut çözümlerin üstünde akıllı ve yenilikçi bir alternatif sunmaktadır. REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Sistemi; mobil bir uygulama (REZES mobil uygulaması), akıllı bir geri dönüşüm makinesi (Raspberry Pi 3 B+ mikroişlemci, 10.1 inç dokunmatik LCD ekran, 2 kamera modülü, elektronik devre ve sensör bileşenleri) ve web-tabanlı bir yönetim birimini içeren yazılım ve donanım modüllerini içermektedir.

REZES mobil uygulaması içerisinde Anasayfa (Home) bölümünde kullanıcıların geri dönüşüme kazandırdığı plastik, cam ve metal atıkların oranı görüntülenmektedir. Kullanıcı önceki aylardaki en yüksek geri dönüşüm oranını geçtiği anda ekstra puan kazanarak geri dönüşüme teşvik edilmesi sağlanmaktadır.

Mobil uygulamanın Profil kısmında kullanıcı geri dönüşüme kazandırdığı plastik, cam ve metal atıkların sayısını görüntüleyebilir ve kendisi için oluşturulan eşsiz QR ID koda ulaşabilir. Kullanıcının geri dönüşüm işlemine başlamadan önce REZES makinesinde bulunan sisteme QR ID kodunu okutarak giriş yapması ve kazanılan puanların kişinin hesabına aktarılması gerçekleştirilir. Daha sonrasında kazanılan puanlar ihtiyaç doğrultusunda QR ID kod aracılığıyla yapılır. Böylelikle QR ID kod sistemiyle işlemleri dijitalleştirerek kupon fişinden kaynaklanan kâğıt israfının da önüne geçilmiştir.

İşlemler kısmında ise kullanıcı geri dönüşümü gerçekleştirdiği yerlerdeki makine isimlerine, saat ve gün bilgilerine, atıkların

türüne ve sayısına, kazanılan puanlara ve makinenin doluluk oranlarına ulaşabilir. Ayrıca hangi makinenin kullanıcıya daha yakın olduğu konumdan tespit edilerek makinelerdeki doluluk oranlarına göre sıralanması ve kullanıcının bilgilendirilmesi sağlanır. Aynı şekilde sistem yöneticisi de web uygulama üzerinden kullanıcılarla ilgili tüm bilgilere ulaşabilir. Buna ek olarak sistem yöneticisi tarafından REZES makinesindeki doluluk oranı gün içerisinde düşük olduğu tespit edilirse bir sonraki gün atıkların toplanmasına karar verilir. Böylelikle atık toplama sürecinin daha az yakıtla gerçekleştirilmesi sağlanarak hem yakıt tasarrufu sağlanır hem de çevreye bırakılan egzoz gazı emisyonu azaltılmış olur. Ayrıca İşlemler kısmında yer alan kullanıcı atık bilgileri veri analizinde kullanılarak kişiye özel kampanyalar oluşturulabilir. Böylece geri dönüşüm bilincinin oluşturularak sürdürülebilirliğin sağlanması amaçlanmaktadır. Bunlara ek olarak geri dönüşüm makinelerin doluluk oranları analiz edilebilir. Geri dönüşümün az olduğu bölgelerde kullanıcıların mobil uygulamasına kampanya mesajları gönderilerek daha fazla puan kazanacaklarıyla ilgili bildirimler alması sağlanır. Bunun sonucunda oyunlaştırma yöntemi yoluyla kullanıcılar, doluluk oranı az olan makinelerde geri dönüşümü gerçekleştirmeye yönlendirilir. Mahalledeki veya bölgedeki en iyi çevreciler haftalık, aylık ve yıllık zaman dilimlerinde ödüllendirilerek rekabet ortamı oluşturulur. Oyunlaştırma çerçevesinde gerçekleştirilen bu rekabet ortamı sayesinde sürdürülebilir bir geri dönüşüm platformu oluşturulması hedeflenmiştir. Bu tür bir oyunlaştırmanın geri dönüşümde kullanılması REZES projesine özgüdür ve bu özellik REZES projesini var olan sistemlerden farklı olmasını sağlayan en önemli faktörlerden birisidir.

Kazanımlar kısmında kullanıcılar geri dönüşüme hangi tür atıktan ne kadar kazandırdığını ve bu atıklardan ne kadar puan kazandığını görüntüleyebilirler. Skorlar kısmında ise kullanıcının bulunduğu mahalle veya bölgedeki diğer kullanıcılarla birlikte puan sıralaması yer almaktadır. Böylelikle kullanıcı rakipleri arasındaki puan farkını görebilir ve liderliği elde etmek için daha fazla geri dönüşüm gerçekleştirilmesi sağlanabilir.

REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri, atılan materyalleri algılamak için "sensörler", materyali tanımlamak için "görüntü işleme", kullanıcıları daha fazla materyal atma ve puan kazanma konusunda motive etmek için "oyunlaştırma" ve geçmişte gerçekleştirilen geri dönüşümlerin sonucunda elde edilen verilerin analizine dayanan kampanyalar sağlamak için "veri madenciliği" yöntemlerini içermektedir. Bu nedenle REZES, etkili ve sürdürülebilir geri dönüşüm için geniş kapsamlı karmaşık bir sistem olarak tasarlanmıştır (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1: REZES Akıllı Geri Dönüşüm Makinesi'nin dış kısmı



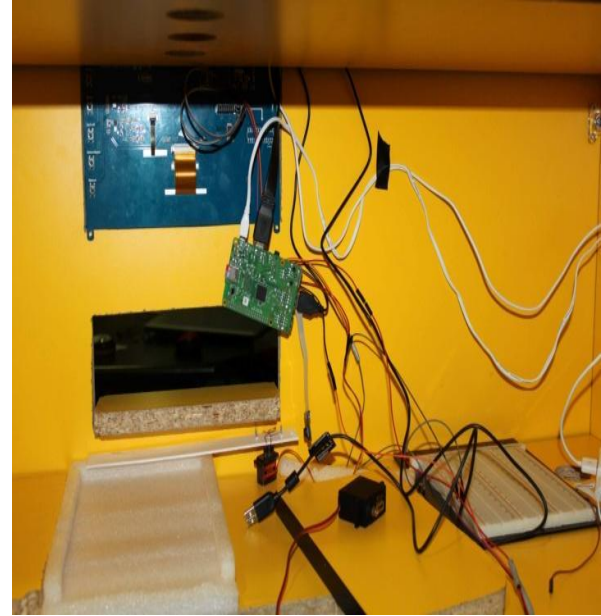
Şekil 2: REZES Akıllı Geri Dönüşüm Makinesi'nin iç kısmı

3. Materyal ve Metot

REZES, çevre kirliliğini en aza indirmeyi ve insanları geri dönüşüme daha fazla teşvik etmeyi amaçlayan entegre bir sistemdir. Bununla birlikte REZES sisteminde hem donanım hem de yazılım unsurları bulunmaktadır. REZES sistemi için 85 cm derinliğinde, 120 cm uzunluğunda ve 120 cm genişliğinde (85x120x120 cm) sunta prototip hazırlanmıştır. Kullanıcının mobil uygulamasındaki Profil kısmında bulunan QR Kod (Quick Response Code) kimliğiyle REZES Akıllı Geri Dönüşüm Makinesi sistemine erişim sağlamak için makinenin ön yüzüne Raspberry Pi Kamera Modülü v2 yerleştirilmiştir (Şekil 3).

Python kütüphanelerinden Zbar (pyzbar), kullanıcı için oluşturulan eşsiz QR Kod ID'yi tanımlamak için kullanılmıştır. Zbar, QR kod üzerinde bulunan bilgileri okuyarak işlemleri gerçekleştirir [9]. QR Kod, akıllı bir cep telefonu aracılığıyla bilgiye kolay erişim sağlamak için kullanılan 2 boyutlu bir barkod türüdür. Statik ve Dinamik QR Kod tipleri mevcuttur [10]. Projede Dinamik QR kod türü tercih edilmiştir. Kullanıcıya ait Türkiye Cumhuriyeti kimlik numarasından esinlenilmiş ve kullanıcı için benzersiz QR Kimlik Kodu oluşturulmuştur. Bu sayede, kullanıcının bilgileri ve puanları şifrelenmiş bir şekilde sistemde muhafaza edilmektedir.

Prototip sistemde 4 adet raf (40x2x120 cm) bulunmaktadır (Şekil 2). Üst raftaki bölüme görüntüyü algılayıp işlemek için bir web kamera yerleştirilmiştir. Görüntü işleme için Logitech C270 HD WebCam modeli (Şekil 4) kullanılıp 720p kalitesinde görüntüler sağlayarak nesne tanıma işleminin daha etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Web kamerası bölümünün altındaki diğer raf ise geri dönüştürülecek nesnenin atık imha boşluğu olarak konumlandırılmıştır.



Şekil 3: REZES- elektronik iç aksamı

Böylece, kullanıcı geri dönüşümü gerçekleştireceği zaman atığı bu bölüme bırakarak geri dönüşüm işlemini başlatmaktadır. Ayrıca plastik, cam ve teneke kutuların ayrıştırılmasını makine içerisinde sağlamak için biri nesnenin bulunduğu rafta diğeri alt rafta olmak üzere iki servo motor (Şekil 3) mevcuttur. Bu servo motorlar Raspberry Pi'dan gelecek olan komutlara göre hareket etmektedir.

Projedeki ayrıştırma bölümü, Arduino Renk Sınıflayıcı Projesi'nden esinlenerek oluşturulmuştur [11]. Servo motorlar hareket kontrol mekanizmasına sahiptir ve robot teknolojilerinde en yaygın kullanılan motorlardan biridir [12]. Böylece atıkları mekanik işlemlerle ayırmak için servo motorlar, Raspberry Pi sayesinde cihazların birbirleriyle iletişim kurmaları için elektronik devre sistemi (Şekil 3) ve makineye enerji vermek için transformatör kullanılmıştır. Servo motorlara hareket açısı verilerek geri dönüşüm işleminin gerçekleştiği anda, atıkların belirli açılarda konumlandırılmış

olan plastik, cam ve metal atık haznelere yönlendirilmesi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

Ayrıca geri dönüştürülebilir atıklar dışında başka bir cisim atıldığında, cisim tanınmayan atıklar kısmına yönlendirilerek ayrıştırılır. Ayrıştırma süreci gerçekleştirildikten sonra, işlemin başarılı bir şekilde gerçekleştirilip gerçekleştirilmediği bilgisi Raspberry Pi'daki sisteme bildirilir ve daha sonrasında Raspberry Pi'da bulunan sistem üzerinden kullanıcının mobil uygulama hesabına, kazanılan puanlar gerçek zamanlı olarak eklenir. Bu işlemlerin tümü Raspberry Pi 3 B+ (Şekil 3) ile sağlanmaktadır.

Raspberry Pi, REZES projesi için makinenin beyni olarak önemli bir rol oynamaktadır. Raspberry Pi küçük bir bilgisayardır ve Nesnelerin İnterneti tabanlı prototipler yapmak için uygun bir cihazdır [13]. Raspberry Pi açık kaynaklı işletim sistemlerini ve yazılımını destekler. Raspberry Pi cihazı, REZES'in Nesnelerin İnterneti (IoT) aşamasında önemli bir rol oynamaktadır (Şekil 4). Nesnelerin İnterneti, dahili ve harici iletişim kurmak için yerleşik teknoloji sağlayan fiziksel nesnelere ağına genel adıdır [14].



Şekil 4: Prototip çalışmalarından bir görüntü (Raspberry Pi, LCD dokunmatik ekran ve web kamera)

Raspberry Pi, çeşitli programlama dillerinde yazılmış uygulamaları destekler. REZES için Raspbian işletim sistemi (Raspberry Pi OS) kullanılmıştır. Raspbian, Debian işletim sistemine dayalı Linux dağıtımı olan bir işletim sistemidir. Raspbian 35.000'den fazla pakete sahiptir ve Raspberry Pi üzerinde yapılacak prototipler için uygundur [15]. Python, Raspbian'da uyumludur ve performans-maliyet bakımından REZES projesi için uygun olduğu belirlenmiştir. Python programlama diliyle yazılan uygulamalar, Raspbian'da hızlı ve verimli bir şekilde çalışmaktadır [16].

Raspberry Pi uyumlu WaveShare HDMI Dayanıklı 10,1 inç LCD Dokunmatik Ekran bileşeni (Şekil 1), grafiksel kullanıcı

ara yüzünü göstermek ve geri dönüşüm aşamasını başlatmak için kullanılmıştır. Dokunmatik ekrandaki Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (GUI), python araçlarından biri olan Tkinter ile yapılmıştır (Şekil 5). Tkinter modülü, grafiksel kullanıcı arabirimi yapmak için kullanılan Python kütüphanelerinden biridir [17]. Kullanıcı mobil uygulamadaki QR ID kod ile GUI Tkinter'daki sisteme erişebilir. Böylece, kullanıcı akıllı geri dönüşüm kutusuna atıkları atabilir. Atılan atık, nesne tanıma ve görüntü işleme bölümüne yönlendirilir. Nesne tanıma ve görüntü işleme, OpenCV (Open Source Computer Vision Library) ile Python programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir.



Şekil 5: REZES Akıllı Geri Dönüşüm Makinesi üzerindeki LCD dokunmatik ekranında yer alan GUI Başlangıç Menüsü

İşlem sonunda atılan atıklar kullanıcılara puan kazandırdığından dolayı, atıkların sayısına ve türüne göre puanlar veritabanına yüklenmektedir. REZES sistemi için gerçek zamanlı bir veritabanı gerekli olması nedeniyle, Firebase Gerçek Zamanlı Veritabanı kullanılmıştır. Firebase Gerçek Zamanlı Veritabanı (Firebase Realtime Database), bulutta barındırılan gerçek zamanlı bir veritabanıdır. İlgili veriler JSON (JavaScript Object Notation) olarak kaydedilir ve ilgili her istemciye gerçek zamanlı olarak senkronize edilir. Platformlar arası uygulamalar oluşturulurken, Firebase Gerçek Zamanlı Veritabanı anında ve otomatik olarak en son verilerle güncellemeleri alır [18]. Böylece kazanılan puanlar gerçek zamanlı olarak mobil uygulamaya aktarılır. REZES mobil uygulamasının genel çerçevesi Ionic, Typescript programlama dili ve AngularJS bileşenleri ile gerçekleştirilmiştir.

Ionic, etkileyci çapraz platformlu web uygulamalarını kolayca oluşturmayı sağlamaktadır [19]. Typescript ise geliştiricilere yüksek verimli geliştirme araçları ve uygulamaları kullanma olanağı sağlar [20]. AngularJS, uygulama geliştirmede en uygun çerçeveyi oluşturmak için kullanılan bir araç setidir [21]. Böylece, bu bileşenler kullanılarak mobil uygulama işlevsel ve grafiksel olarak daha iyi hale gelmektedir. Bu bileşenler sayesinde, REZES sistemi web tabanlı uygulama versiyonuna da sahiptir.

OpenCV, gerçek zamanlı nesne tespiti için güçlü bir kütüphanedir. Bilgisayarlı görme ve makine öğrenimi çalışmaları için açık kaynaklı bir yazılım kütüphanesidir. OpenCV kütüphanesi, nesnelere algılamayı ve tanımlamayı, insan yüzlerini sınıflandırmayı, hareketli nesnelere takip etmeyi içeren en az 2500 optimize algoritmaya sahiptir [22]. Atıklar OpenCV tarafından tanındıktan sonra, Raspberry Pi devreye girer ve tanıyan atıkları ilgili yere göndermesi için servo motorlara komut verir.

Büyük Veri Analizi aşamasında, akıllı geri dönüşüm makinesinin bulunduğu yerlerde gerçekleştirilen geri dönüşüm verileri kullanılarak analiz etmek için R programlama dili kullanılmaktadır. R, istatistiksel ve grafiksel uygulamalar için kullanılan açık kaynaklı bir yazılımdır. R programlama dili, veri analizi için bir geniş bir kütüphane içerir [23]. R dili yoluyla makine öğrenmesi algoritmaları çalıştırılmakta, gelecekte yapılacak atık miktarları bölgesel olarak tahmin edilmekte ve buna göre semt bazında kampanyalar planlanabilmektedir. Buna ek olarak, veri analizi sonuçları baz alınarak Oyunlaştırma teknolojisi ile kullanıcıların geri dönüşümü etkin bir şekilde gerçekleştirmesini arttırmak için lider panoları ve rozetler kullanılmaktadır. Oyunlaştırma ile kullanıcıların gerçekleştirdikleri geri dönüşümlerle farklı seviyelerde en iyi çevreciler olmasını hedefleyerek süreklilik ve akıllı geri dönüşümün teşvik edilmesi amaçlanmaktadır.

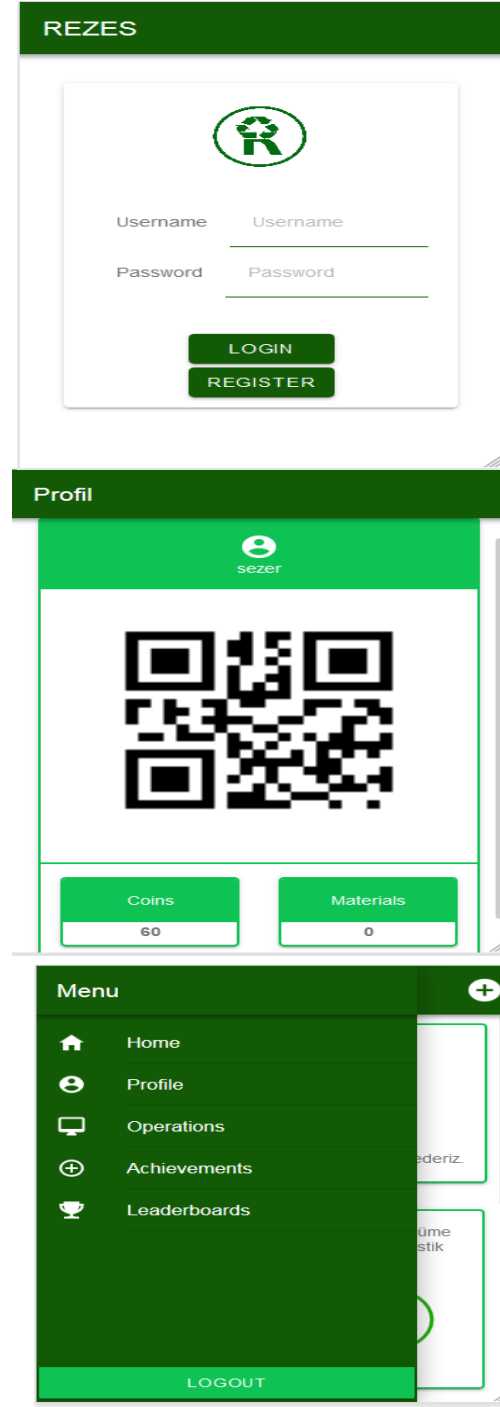
4. Sistemin İşleyişi

REZES Sistemi mobil uygulamasında farklı işlemlerin yapılabilmesi için arayüzler tasarlanmıştır (Şekil 6). Sistemin yapısı ve Akış Şeması sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmektedir. Öncelikle, kullanıcı REZES mobil uygulamasına kayıtlı değilse kaydolur veya kayıtlıysa oturum açarak sisteme giriş yapar. Daha sonra sistem tarafından kullanıcının kişisel bir QR Kimlik (ID) kodu oluşturulur (Şekil 6) ve kullanıcının geri dönüşüm işlemine başlamak için gerekli koşulları sağlaması mümkün olur.

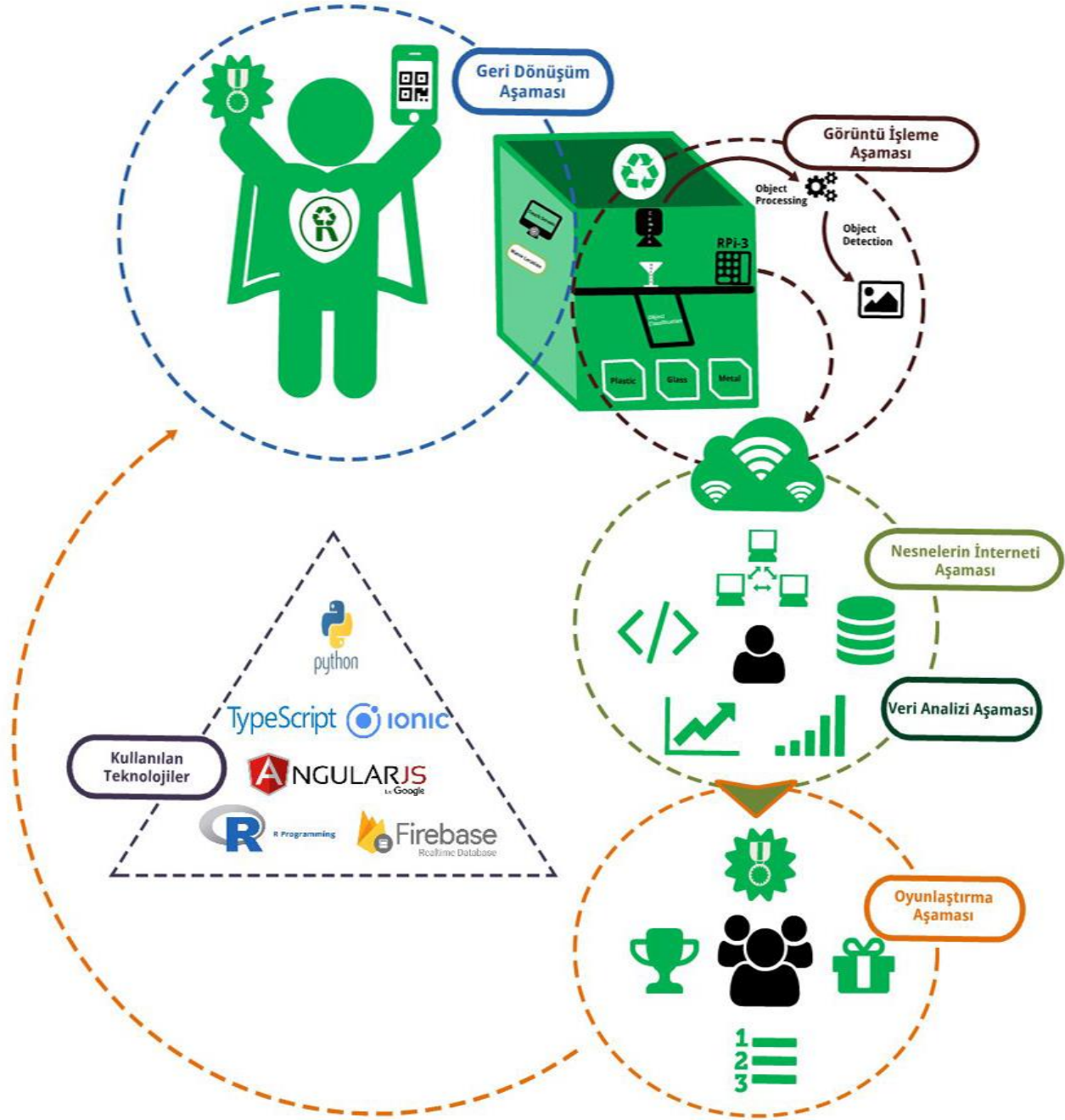
Kullanıcı, atıkları REZES Akıllı Geri Dönüşüm Makinesi'ne yerleştirdikten sonra, 10.1 inç LCD dokunmatik ekranında bulunan REZES Grafiksel Kullanıcı Arayüzü'nde yer alan (Şekil 5) "Onayla" (Confirm) düğmesine basarak geri dönüşüme başlamaktadır. REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri, QR ID ile kullanılmaktadır. Kullanıcı, Geri Dönüşüm aşamasında (Şekil 7) REZES mobil uygulamasındaki Profil kısmındaki QR ID kod ile sisteme giriş yapar.

Atılan atık, Görüntü İşleme aşamasında OpenCV tarafından tespit edilir ve tanınır (Şekil 7). Daha sonra Raspberry Pi'daki program servo motorlara komut verir ve atık ayrıştırma işlemi makinenin içinde gerçekleştirilir. Nesnelerin İnterneti aşamasında, kullanıcının kazandığı puanlar mobil uygulamasındaki hesabına bildirilmektedir (Şekil 7). Ayrıca, kullanıcı web tabanlı uygulamadan sisteme kayıt olabilir veya

giriş yapabilir. Daha sonra kullanıcı yaptığı geri dönüşümlerin raporlarına mobil uygulamadan erişebileceği gibi web tabanlı uygulama üzerinden de erişebilir.



Şekil 6: REZES Mobil Uygulamasının Genel Görünümü



Şekil 7: REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri'nin Genel Yapısı

Kullanıcı, REZES mobil uygulamanın İşlemler (Operations) bölümünden hangi REZES Akıllı Geri Dönüşüm Makinesi'ne, ne zaman, ne kadar ve ne tür atıkların atıldığı gibi geri dönüşüm hakkındaki tüm bilgilere erişebilir. Bu veriler sistem tarafından toplanır, daha sonrasında Büyük Veri Analizi aşamasında Oyunlaştırma süreci için hazırlanır ve kullanılır (Şekil 7). Böylece geri dönüşümün sürdürülebilirliğini sağlamak için kullanıcının mobil uygulamasında bildirimler ve kampanyalar gösterilmektedir. Oyunlaştırma sayesinde kullanıcıların ek ödüller ve promosyonlar kazanması sağlanmaktadır.

Kullanıcı kazandığı puanları süpermarket ve alışveriş merkezi gibi anlaşmalı birçok yerde kullanabilir (Şekil 8). Geri dönüşüm işlemine başlamak için kullanılan QR ID kod hem puanların kazanılmasını hem de kazanılan puanların alışverişte kullanılmasını sağlamaktadır. Kullanıcı anlaşmalı yerde alışveriş yaptıktan sonra ödeme işlemi REZES mobil uygulamasında bulunan QR ID kodu ile gerçekleştirebilir. Anlaşmalı yerde bulunan ödeme kasasında, personel tarafından kullanılan QR ID kod okuyucu ile kullanıcının puanlarını işleme alabilir veya anlaşmalı yerde akıllı kasa bölümü mevcut

ise kullanıcının kendisi kullanmak istediği kadar puanı işleme alabilir. Ödenmesi gereken miktar, puanlar tarafından tamamen karşılanıyorsa geri kalan tutar kullanıcı tarafından karşılanabilir. Böylelikle, geri dönüşüm sistematik bir şekilde gerçekleştirilir ve kullanıcı oyunlaştırma sayesinde ödüllendirilerek motivasyonu artırılır (Şekil 7).

5. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Sonuç olarak, REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri prototipi başarıyla oluşturularak test edilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, Görüntü İşleme aşamasında ağırlık sensörü ve hiperspektral kamera gibi yardımcı araçların kullanılmasıyla nesne algılama ve tanıma işlemlerinin daha hızlı yapılması planlanmaktadır. Amerika ve Avrupa'da var olan bazı makinelerdeki nesne algılama aşaması lazer barkod okuyucu yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Atık ambalajların üzerinde barkod var ise cisim algılanıyor, eğer barkod yoksa cisim tanınmıyor ve geri dönüşüm makinesinde yer alamıyor. Bu durum mevcut makinelerin dezavantajı haline gelmektedir çünkü tanımlı olmayan atıklar geri dönüşümde yer alamamaktadır.

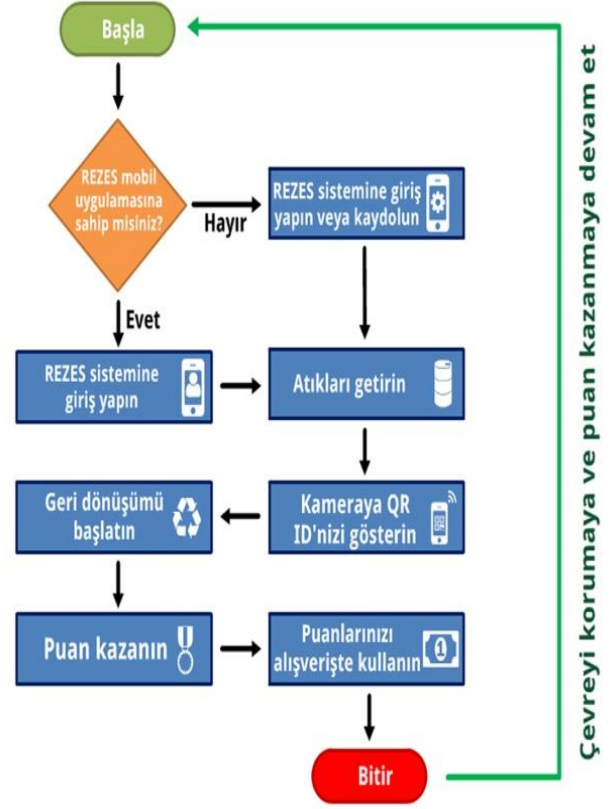
Türkiye'deki cam, plastik ve teneke gibi ambalajların geri dönüşüm makinesi tarafından tanınabileceği bir standart bulunmadığı için projemizde lazer barkod okuma sistemi tercih edilmemiştir. Başta Türkiye olmak üzere tüm dünyadaki geri dönüştürülebilir atıkların, REZES makinesinde yer alan görüntü işleme algoritmaları ile tanındıktan sonra ayrıştırılmasını sağlamak ve geri dönüşüm merkezlerindeki ayrıştırma için harcanan zaman kaybını azaltmak amaçlanmaktadır.

Bu prototipin gelecekte gerçek hayata uygulanması hedeflenmektedir. Bu sayede çeşitli noktalara yerleştirilecek olan REZES Akıllı Geri Dönüşüm Makineleri veri toplayarak, elde edilen veriler üzerinden Büyük Veri Analizi ve Oyunlaştırma işlemleri gerçekleştirilecektir. Böylece, REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri tamamen hayata geçirilecektir.

REZES ile geri dönüşüm etkili bir şekilde gerçekleştirilerek çevre kirliliğinin etkin bir şekilde en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Akıllı şehir kavramlarının popülerleşmeye başlaması ve uygulamaya alınmasıyla birlikte, akıllı geri dönüşüm sistemlerinin de hayata geçirilmesi kaçınılmaz olacaktır. REZES sistemi kullanılarak kazanılan puanların alışverişlerde kullanılmasının yanı sıra, ailelerin elektrik-sudoğalgaz gibi temel ev ihtiyaçlarından oluşan fatura ödemelerinde de kullanılması sağlanarak akıllı şehirler konseptine de katkıda bulunulabilecektir.

REZES makinesi bir ürün olarak geliştirildikten sonra, okul, alışveriş merkezi ve süpermarket gibi toplumun kolaylıkla ulaşabileceği ve yoğun olduğu yerlere dağıtılması planlanmaktadır.

Veri analizinin kullanılmasıyla birlikte oyunlaştırmadan faydalanarak geri dönüşümün gerçekleştirilmesi, teknolojinin gün geçtikçe gelişmesi ve akıllı telefon kullanımının artmasıyla birlikte, kullanıcıların akıllı kampanyalar yoluyla oyun benzeri bir ortamda geri dönüşüme dahil edilmesiyle etkili bir geri dönüşümün ortaya çıkması mümkün olacaktır.



Şekil 8: REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri'nin Akış Şeması

REZES projesinde uygulanan QR ID kod özellikli kullanıcı tanımlama ile birlikte Büyük Veri Analizi ve Oyunlaştırma teknolojileri daha önceki geri dönüşüm makine sistemlerinde yer almamaktadır. Bu yönüyle REZES Nesnelerin İnterneti Tabanlı Geri Dönüşüm Uygulama Sistemleri, yenilikçiliğini ortaya koyarak daha yaşanılabilir bir dünya için akıllı bir çözüm sunmaktadır.

6. Açıklamalar

REZES projemiz Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2209-B (2241-A) Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Tezi Destekleme Programı kapsamında destek almaya hak kazanmıştır. Bu nedenle TÜBİTAK'a destekleri için teşekkür ederiz.

Ayrıca, Çankaya Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi tarafından projemize ofis desteği sağlanmıştır. Çalışmalarımızı yaklaşık 2 yıl boyunca, üniversiteye bağlı Ön-Kuluçka Merkezi'nde gerçekleştirdik. Bu nedenle, Çankaya Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi'ne destekleri için teşekkür ederiz.

7. Referanslar

- [1] Kampa, M., Castanas, E., "Human health effects of air pollution", Environmental pollution, 151(2), 362-367, 2008.
- [2] Tisserant, A., Pauliuk, S., Merciai, S., Schmidt, J., Fry, J., Wood, R., Tukker, A., "Solid Waste and the Circular Economy: A Global Analysis of Waste Treatment and Waste Footprints", Journal of Industrial Ecology, 21(3), 628-640, 2017.
- [3] Fujii, M., Fujita, T., Chen, X., Ohnishi, S., Yamaguchi, N., 2012. Smart recycling of organic solid wastes in an environmentally sustainable society. Resour. Conserv. Recycl.63, 1–8.
- [4] Geng, Y., Tsuyoshi, F., Chen, X., 2010. Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: a case study of Kawasaki. J. Clean. Prod. 18 (10–11), 993–1000.
- [5] Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., Reisser, J., "Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea", PloS one, 9(12), e111913, 2014.
- [6] Reverse vending machines for collecting containers for recycling: TOMRA, URL: <https://www.tomra.com/en/collection/reverse-vending> (Erişim Zamanı: 03.11.18).
- [7] About us - RVM Systems, URL: <https://www.rvmsystems.com/about-us> (Erişim Zamanı: 30.10.2019).
- [8] Akıllı Geri Dönüşüm Konteyneri Projesi Hayata Geçti, <https://atikyonetimi.ibb.istanbul/akilli-geri-donusum-konteyneri> (Erişim Zamanı: 30.10.2019).
- [9] Pyzbar, <https://pypi.org/project/pyzbar> (Erişim Zamanı: 01.04.19).
- [10] What is QR code (quick response code)?, <https://whatis.techtarget.com/definition/QR-code-quick-response-code> (Erişim Zamanı: 16.02.19).
- [11] Arduino Color Sorter Project - HowToMechatronics, URL: <https://howtomechatronics.com/projects/arduino-color-sorter-project> (Erişim Zamanı: 30.10.2019).
- [12] Servo Motor Nedir? Çeşitleri ve Çalışma Prensibi, URL: <https://maker.robotistan.com/rc-servo-motor-nedir> (Erişim Zamanı: 16.02.19).
- [13] Raspberry Pi, URL: <https://market.samm.com/raspberry-pi-nedir-1> (Erişim Zamanı: 01.12.18).
- [14] Internet of Things Defined, URL: <https://www.gartner.com/it-glossary/internet-of-things> (Erişim Zamanı: 03.11.18).
- [15] Raspbian - Raspberry Pi Documentation, URL: <https://www.raspberrypi.org/documentation/raspbian> (Erişim Zamanı: 01.12.18).
- [16] Python Programming Language, URL: <https://www.python.org> (Erişim Zamanı: 01.04.19).
- [17] Python interface to Tcl/Tk, URL: <https://docs.python.org/2/library/tkinter.html> (Erişim Zamanı: 01.04.19).
- [18] Firebase Realtime Database - Google, URL: <https://firebase.google.com/docs/database> (Erişim Zamanı: 01.04.19).
- [19] Ionic Framework, URL: <https://ionicframework.com> (Erişim Zamanı: 01.04.19).
- [20] TypeScript, URL: <https://www.typescriptlang.org> (Erişim Zamanı: 01.04.19).
- [21] AngularJS, URL: <https://angularjs.org> (Erişim Zamanı: 01.04.19).
- [22] About OpenCV, URL: <https://opencv.org/about> (Erişim Zamanı: 21.03.19).
- [23] R Programming Language, URL: <https://www.r-project.org/about.html> (Erişim Zamanı: 01.04.19).

Sezer UĞUZ





Sezer UĞUZ, 1994 yılı Antalya doğumludur. İlkokulun bir kısmını İzmir’de bir kısmını ise Tercan/Erzincan’da tamamladı. Ortaokul, lise ve ön lisans öğrenimlerini Tercan/Erzincan’da tamamladı. 2015 yılında Erzincan Üniversitesi Tercan Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Programcılığı programından okul birinciliğiyle mezun olduktan sonra Çankaya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümüne dikey geçiş sınavıyla devam etti. 2017’de Krakow AGH Bilim ve Teknoloji Üniversitesi’ne (öğrenim hareketliliği) ve 2019 yılında Viyana Üniversitesi Görselleştirme ve Veri Analizi Araştırma Grubu’na (staj hareketliliği) Erasmus+ burslarıyla gitti. 2018 yılında REZES Geri Dönüşüm IoT Uygulama Sistemleri adlı projesi ile TÜBİTAK 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Destekleme Programı’ndan burs almaya hak kazandı. 2019 yılında Çankaya Üniversitesi’nden şeref öğrencisi olarak mezun olduktan sonra Atatürk Üniversitesi’nde tezli yüksek lisans yapmaya başlamıştır. Nesnelerin İnterneti, Veri Analizi ve Görselleştirme, Doğal Dil İşleme ve Endüstri 4.0 alanlarıyla ilgilenmekte ve çalışmalarına devam etmektedir. Aynı zamanda, Hamdi Ulukaya Girişimi – Girişimci Adayı Programı’nın 2020 yılı katılımcıları arasında olup iş fikirlerini geliştiren bir girişimci adayı olarak çeşitli çalışmalar sürdürmektedir.

Dr. Öğr. Üyesi Dr. Gül TOKDEMİR



Dr. Gül Tokdemir 1995 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi’nden mezun oldu. Georgia Institute of Technology’de (1997) yüksek lisansını ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi’nde (2009) doktora derecesini tamamladı. 2001-2010 yılları arasında Atılım Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde çalıştı. Ardından Eindhoven Teknik Üniversitesi Software Quality Lab (LAQUSO)’da doktora sonrası araştırmacı olarak çalıştı. Halen Çankaya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde öğretim üyesidir. Araştırma alanları arasında yazılım mühendisliği konuları arasında bulunan kavramsal modelleme, tasarım diyagramları ve veri madenciliği/analizi bulunmaktadır.

Türkiye Elektrik Enerjisi Üretiminde Yenilenebilir Kaynakların Artan Payı ve Puant Anlarına Katkıları; 2018 Yılı Analizi

 Hacer Şekerci Öztura¹, Sezai Polat¹ 

¹Mühendislik Fakültesi

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Yaşar Üniversitesi
hacer.sekerici@yasar.edu.tr, sezaipolat@hotmail.com

Öz

Ülkemiz mevcut elektrik üretiminin büyük kısmını kapsayan fosil enerji kaynaklarının rezervlerinin sınırlı oluşu ve bu kaynakların kullanımının yarattığı çevresel zararları ve bunların elde edilmesindeki döviz kuruna bağımlılık ve fiyatlardaki istikrarsızlıklar nedeniyle, yeni yaklaşımlar, politikalar belirlemek gerekmektedir. Ayrıca enerji arz güvenliği için yenilenebilir kaynakların yeni teknolojiler ile kullanılması, enerji verimliliği konusunun top yekûn uygulanıyor olması artık bir gereklilik noktasına gelmiştir. Bu çalışmada ülkemizin elektrik üretimi ve yenilenebilir enerjinin tarihsel süreci incelendikten sonra, puant yüklerin olduğu anlar detaylı incelenerek, bu anlardaki yenilenebilir enerjiden üretilen enerjinin toplam enerji üretimine katkıları araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: yenilenebilir, enerji kaynakları, üretime katkısı, puant güçler, yük, talep

Abstract

New approaches and policies need to be determined due to the limited reserves of fossil energy resources and the environmental losses caused by the use of these resources and the dependence on exchange rates in obtaining them and instability in prices. In addition, the use of renewable resources with new technologies for energy supply security and the fact that energy efficiency is fully implemented has become a necessity. In this study, after examining the historical process of renewable energy and electricity production of our country, the moments of peak loads are examined in detail and the contribution of renewable energy to total energy production is investigated

Keywords: renewable energy, contribution, penetration level, peak powers, demand, load

1. Giriş

Elektrik 1902 yılında Adana Tarsus'ta 2 KW'lık hidroelektrik santral ile ülkemiz yaşamına girmiştir. Elektrik üretimi, dağıtımı olarak her ayağı ile 1970'de kurulan Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) tarafından sürdürülürken, 1994 yılında özelleştirme ile Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ) ve Türkiye Elektrik Üretim İletim A.Ş. (TEAŞ) olarak hizmet veren sistem, 2001 yılında üç ayrı İktisadi Devlet Teşekkülü olarak yeniden teşkilatlandırıldı. Bu çalışmada TEK günlerinden başlayarak ülkemizin elektrik üretim, tüketim değerleri, bunların artış oranları ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanma oranları üzerine

bazı değerlendirmeler yapılacak, bu yıllar içinde artan değerler grafikler ve çizelgeler ile net bir şekilde sunulacaktır. Özellikle incelenmek istenen nokta ise, puant yüklerin oluştuğu anlar ile yenilenebilir kaynakların üretimi arasında bir ilişki olup olmadığının irdelenmesidir. Bu nedenle çalışma yenilenebilir kaynakların genel üretimdeki yeri ve yenilenebilir kaynakların puant güçlerle ilişkisi şeklinde iki ayrı bölümde detaylandırılacaktır.

O. Çoban ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sürdürülebilir büyüme ölçütü olarak aldıkları kişi başına düşen gelir ile güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biokütle arasında pozitif bir artış ilişkisi olduğunu göstermişlerdir [1]. Arz talep senaryoları ve Türkiye'nin yenilenebilir enerji projeksiyonu inceleyen S. Özçira ve arkadaşları söz konusu yıl için arz talep dengesinin karşılanabilmesi için gerekli yeni yatırım miktarını bulurken bu değerlerin bölgenin yapısal özellikleri ile hangi yenilenebilir kaynaklardan olması gerektiğini önermişlerdir [2]. İ. Yüksel ve arkadaşları ise süreci sera gazları açısından inceleyerek ülkemizin enerji politikasında yenilenebilir kaynakların yerinin önemini irdelemişlerdir [3]. Sürdürülebilir enerji konusunu teknik, çevresel, sosyal, ekonomik ölçütlere göre inceleyen G. Yılan ve arkadaşları yaptıkları matematiksel analiz sonucu en iyi çözümün hidroelektrik ve fotovoltaik enerji kaynaklarının en iyi çözüm olduğunu belirtmişlerdir [4].

Tayland'da yapılan çalışmada, yük faktörü, enerji talebi ve maksimum talep gibi kriterler ile enerji talebi tepe, orta ve temel olarak üç ayrı grupta incelenmiş ve talep karakteristikleri üzerine yenilenebilir enerjinin etkisini incelemişlerdir, bu çalışmada saatlik ve mevsimlik yenilenebilir rejimleri incelenerek işletme maliyetleri üzerine anlamlı etkilerini göstermişlerdir [5].

Yenilenebilir olarak ağırlıklı rüzgâr ve yeni yeni güneşin arttığı Portekiz'de yapılan bir başka çalışmada kesikli rejimi olan yenilenebilir kaynakların bu türlerinin, daha kararlı rejime sahip olan hidroelektrik ve biokütle ile kapalı çevrim çalışması incelenmiştir. Bu çalışmada puant yüklerin karşılanabileceğini otomatik geriye giden dağıtılmış gecikme olarak da adlandırılacak Autoregressive Distributed Lag metodu ile analiz etmişlerdir [6].

İranlı bir grup araştırmacı ise mikro şebekelerde talep cevabını vermek üzere yenilenebilir kaynakların kullanımı ve dolayısıyla da fiyat piyasası üzerine etkilerini incelemişlerdir [7]. Lineer programlama dili kullanarak yapılan bir yazılım ile gerekirse enerji depolama kesikli üreten yenilenebilir kaynak üretimlerinin depolanması ve puant anlarda kullanılması modellenmiştir.

Literatür araştırmasında görülen bir diğer çalışma ise, yerel yükleri beslemek üzere kurgulanan bir mikro şebekede rüzgâr, güneş üretim kaynağı olarak seçilip, enerji depolama sistemi ile en uygun ve ekonomik işletim sağlanmaya çalışılmıştır [8]. Bu tür çalışmaların sonuçları göstermektedir ki, ilerleyen zamanlarda talep yanıtı veya puant yüklerin karşılanması için sadece termik kaynaklara bağımlı olunmayacaktır.

Bu çalışmada ise öncelikle ülkemizde her geçen gün artan yenilenebilir enerji üretim yatırımları söz konusu olmakla birlikte, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin net bir fotoğrafının görülmesi hedeflenmiştir. Ayrıca saatlik bazdaki veriler söz konusu olduğu için yalnızca bir yıl (2018 yılı alınmıştır) üzerinde en düşük, en yüksek aylık yıllık puant anları ve bunların olduğu anlardaki yenilenebilir üretimleri incelenmiş ve aralarında bir ilişki olup olmadığına bakılmıştır.

2. Yenilenebilir Kaynakların Yeri

TEİAŞ verilerine göre Çizelge 1'den de görüleceği üzere 1975'den 2018'e nüfus 2,03 kat, kurulu güç 21,14 kat, elektrik tüketimi 18,89 kat artarken, bu artış oranları kişi başına değerlendirildiğinde; kurulu güç 10,375 kat, net tüketim ise 9,30 kat artış göstermektedir. Nüfus artışı ile teknolojinin ve dolayısıyla da kullanılan cihazların donanımların gelişimi tüketilen elektriğin büyük oranda artmasına neden olmuştur [9].

Çizelge 1. Yıllara göre nüfus, kurulu güç ve tüketilen elektriğin artışları [9]

Yıllar	Nüfus (bin)	Kurulu Güç MW	Tüketim GWh	K. Güç / Kişi (W)	Tüketim / Kişi (kWh)
1975	40348	4186,6	13491,7	104	334
1980	44737	5118,7	20398,2	114	456
1990	56473	16317,6	46820,0	289	829
2000	67845	27264,1	98295,7	402	1449
2007	70586	40835,7	155135,2	579	2198
2008	71517	41817,2	161947,6	585	2264
2009	72561	44761,2	156894,1	617	2162
2010	73723	49524,1	172050,6	672	2334
2011	74724	52911,1	186099,5	708	2490
2012	75627	57059,4	194923,4	754	2577
2013	76668	64007,5	198045,2	835	2583
2014	77696	69519,8	207375,1	895	2669
2015	78741	73146,7	217312,2	929	2760
2016	79814	78497,4	231203,7	984	2897
2017	80811	85200,0	249022,7	1054	3082
2018	82004	88500,8	254863,0	1079	3108

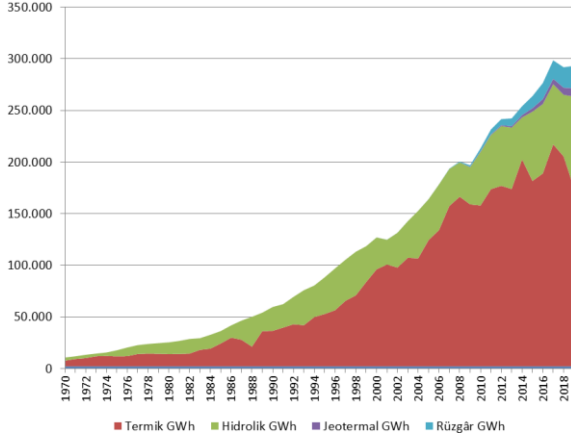
Enerji üretiminde kurulu güçlerin yıllar içerisinde artışı Çizelge 1'den görülebiliyor olsa da, yenilenebilir enerjinin hayatımıza girmesi, farkındalığımızın artması ve üretim istatistiklerinde anlamlı bir şekilde yerini almaya başlaması rüzgâr için 1998'leri güneş için ise 2016'ları görmüştür. Çizelge 2'de TEK'in kurulduğu 1970'den 2019 sonuna kadar termik ve yenilenebilir kapsamında hidroelektrik, jeotermal ve rüzgârdan elektrik üretim miktarları görülmektedir. Jeotermal kaynaklı elektrik üretiminin 2009 yılına kadar termik grubunda değerlendirildiği bu bilgilerin alındığı TEİAŞ web sayfasında net olarak belirtilmiştir [10].

Çizelge 2: 1970 ile 2019 arasında elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı

Yıllar	Termik GWh	Hidrolik GWh	Jeotermal GWh	Rüzgâr GWh	Toplam GWh
1970	5.590,2	3.032,8	-	-	8.623,0
1971	7.170,9	2.610,2	-	-	9.781,1
1972	8.037,7	3.204,2	-	-	11.241,9
1973	9.821,8	2.603,4	-	-	12.425,2
1974	10.121,2	3.355,8	-	-	13.477,0
1975	9.719,2	5.903,6	-	-	15.622,8
1976	9.908,0	8.374,8	-	-	18.282,8
1977	11.972,3	8.592,3	-	-	20.564,6
1978	12.391,3	9.334,8	-	-	21.726,1
1979	12.218,3	10.303,6	-	-	22.521,9
1980	11.927,2	11.348,2	-	-	23.275,4
1981	12.056,7	12.616,1	-	-	24.672,8
1982	12.384,8	14.166,7	-	-	26.551,5
1983	16.004,1	11.342,7	-	-	27.346,8
1984	17.187,2	13.426,3	-	-	30.613,5
1985	22.174,0	12.044,9	-	-	34.218,9
1986	27.822,2	11.872,6	-	-	39.694,8
1987	25.735,1	18.617,8	-	-	44.352,9
1988	19.099,2	28.949,6	-	-	48.048,8
1989	34.103,6	17.939,6	-	-	52.043,2
1990	34.395,3	23.147,7	-	-	57.543,0
1991	37.563,0	22.683,3	-	-	60.246,3
1992	40.774,2	26.568,0	-	-	67.342,2
1993	39.856,6	33.950,9	-	-	73.807,5
1994	47.735,9	30.585,8	-	-	78.321,7
1995	50.706,4	35.541,0	-	-	86.247,4
1996	54.386,4	40.475,2	-	-	94.861,6
1997	63.479,7	39.816,1	-	-	103.295,8
1998	68.787,9	42.229,0	-	5,5	111.022,4
1999	81.741,9	34.677,5	-	20,5	116.439,9
2000	94.014,2	30.878,5	-	33,4	124.926,1
2001	98.652,5	24.009,9	-	62,3	122.724,7
2002	95.667,8	33.683,6	-	48,1	129.399,5
2003	105.189,6	35.329,5	-	61,4	140.580,5
2004	104.556,9	46.083,7	-	57,7	150.698,3
2005	122.336,7	39.560,5	-	59,0	161.956,2
2006	131.929,1	44.244,2	-	126,5	176.299,8
2007	155.352,2	35.850,8	-	355,1	191.558,1
2008	164.301,6	33.269,8	-	846,5	198.418,0
2009	156.923,5	35.958,4	435,7	1.495,4	194.812,9
2010	155.827,6	51.795,5	668,2	2.916,4	211.207,7
2011	171.638,3	52.338,6	694,4	4.723,9	229.395,1
2012	174.871,7	57.865,0	899,3	5.860,8	239.496,8
2013	171.812,5	59.420,5	1.363,5	7.557,5	240.154,0
2014	200.434,0	40.644,6	2.364,0	8.520,1	251.962,7
2015	179.560,5	67.145,8	3.424,5	11.652,5	261.783,3
2016	186.841,3	67.230,9	4.818,5	15.517,1	274.407,7
2017	215.027,8	58.218,5	6.127,5	17.903,8	297.277,5
2018	203.318,0	59.716,7	6.905,58	19.757,2	289.697,4
2019	172.669,2	88.607,1	8.229,7	21.511,4	291.017,4

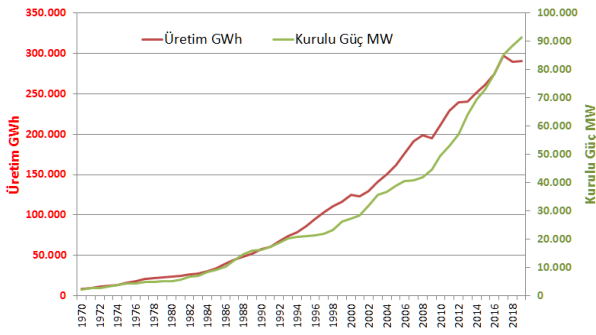
Çizelge 2'de görülen değerler grafikte daha net bir bakış açısı ile Şekil 1'de görülebilir. İlk başlarda termik ve hidroelektrik yaklaşık eşit bir şekilde üretimde paylarını alırken 1989-1990'lardan itibaren denge bozularak termik kaynaklı elektrik üretimi belirgin oranda öne geçmiştir. 2000'lerden itibaren termik kaynağın, rüzgârdan elektrik üretimi başlasa da anlamlı miktarda üretim yapan tek yenilenebilir kaynağımız olan hidroelektriğe göre 3-4 kat fazla kullanıldığı görülmektedir.

Çizelge 2'nin son kolonu üretim (GWh) ve kurulu güç birbirleri ile ilintili olsa da birebir aynı şey demek olmayan bu iki ölçütün artış ivmelerinin anlaşılabilir olması için Şekil 2'de üretim ve kurulu güç farklı eksenlerde gösterilerek, 1970 yılından 2017 yılına kadar gerçekleşen değerler verilmektedir. Artış ivmeleri 2012-2013 yıllarına kadar paralellik göstermektedir. Bu tarihten sonra tüketim ihtiyacının önüne geçen bir kurulu güç olduğu görülmektedir.



Şekil 1. 1970 ile 2017 arasında elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılım grafiği

İlk yıllardan bu yana gelişimi net bir şekilde anlayabilmek için bakılması gereken bir diğer yıllara göre değişim ise, Çizelge 3’de görülen GWh olarak üretim, tüketim, ithalat ve ihracat değerleri ile üretimin ve tüketime yıllara göre % artış oranlarıdır [10]. 1970-1974 yılları arasında üretim ve tüketim artış oranları aynı değerde iken, 1975’den 1989’a kadar tüketim artış oranları çoğunlukla daha fazla olduğundan bu 14 yıl boyunca ithalat ile farkın kapatılmaya çalışıldığı görülmektedir. 1990 yılı itibarıyla hem ithalat hem de ihracat yapılmaya başlanmıştır ve günümüze kadar hiçbir yıl üretim ve tüketim artışları aynı olamamıştır.



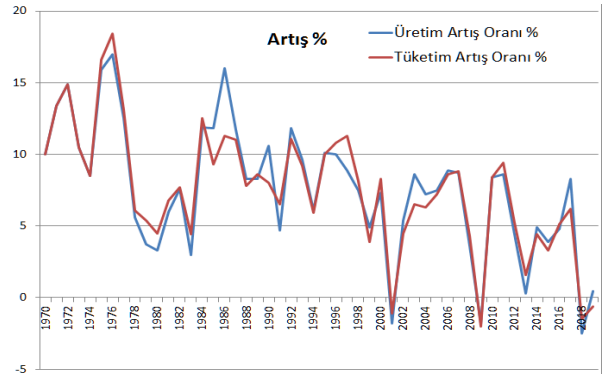
Şekil 2. 1970 ile 2017 arasında elektrik üretiminin ve kurulu gücün gelişim grafiği

Çizelge 3. 1970 ile 2019 arasında elektrik üretim tüketim, ithalat, ihracat değerleri

Yıllar	Üretim GWh	Artış Oran %	İthalat GWh	İhracat GWh	Tüketim GWh	Artış Oran %
1970	8.623,0	10,0	0,0	0,0	8.623,0	10,0
1971	9.781,1	13,4	0,0	0,0	9.781,1	13,4
1972	11.241,9	14,9	0,0	0,0	11.241,9	14,9
1973	12.425,2	10,5	0,0	0,0	12.425,2	10,5
1974	13.477,0	8,5	0,0	0,0	13.477,0	8,5
1975	15.622,8	15,9	96,2	0,0	15.719,0	16,6
1976	18.282,8	17,0	332,2	0,0	18.615,0	18,4
1977	20.564,6	12,5	492,2	0,0	21.056,8	13,1
1978	21.726,1	5,6	621,0	0,0	22.347,1	6,1
1979	22.521,9	3,7	1.042,9	0,0	23.564,8	5,4
1980	23.275,4	3,3	1.341,1	0,0	24.616,5	4,5
1981	24.672,8	6,0	1.616,2	0,0	26.289,0	6,8
1982	26.551,5	7,6	1.773,4	0,0	28.324,9	7,7

1983	27.346,8	3,0	2.220,8	0,0	29.567,6	4,4
1984	30.613,5	11,9	2.653,0	0,0	33.266,5	12,5
1985	34.218,9	11,8	2.142,4	0,0	36.361,3	9,3
1986	39.694,8	16,0	776,6	0,0	40.471,4	11,3
1987	44.352,9	11,7	572,1	0,0	44.925,0	11,0
1988	48.048,8	8,3	381,2	0,0	48.430,0	7,8
1989	52.043,2	8,3	558,5	0,0	52.601,7	8,6
1990	57.543,0	10,6	175,5	906,8	56.811,7	8,0
1991	60.246,3	4,7	759,4	506,4	60.499,3	6,5
1992	67.342,2	11,8	188,8	314,2	67.216,8	11,1
1993	73.807,5	9,6	212,9	588,7	73.431,7	9,2
1994	78.321,7	6,1	31,4	570,1	77.783,0	5,9
1995	86.247,4	10,1	0,0	695,8	85.551,6	10,0
1996	94.861,6	10,0	270,1	343,1	94.788,6	10,8
1997	103.295,8	8,9	2.492,3	271,0	105.517,1	11,3
1998	111.022,4	7,5	3.298,5	298,2	114.022,7	8,1
1999	116.439,9	4,9	2.330,3	285,3	118.484,9	3,9
2000	124.926,1	7,3	3.791,3	437,3	128.280,0	8,3
2001	122.724,7	-1,8	4.579,4	432,8	126.871,3	-1,1
2002	129.399,5	5,4	3.588,2	435,1	132.552,7	4,5
2003	140.580,5	8,6	1.158,1	587,6	141.150,9	6,5
2004	150.698,3	7,2	463,5	1.144,3	150.017,5	6,3
2005	161.956,2	7,5	635,9	1.798,1	160.794,0	7,2
2006	176.299,8	8,9	573,2	2.235,7	174.637,4	8,6
2007	191.558,1	8,7	864,3	2.422,2	190.000,3	8,8
2008	198.418,0	3,6	789,4	1.122,2	198.085,2	4,3
2009	194.812,9	-1,8	812,0	1.545,8	194.079,1	-2,0
2010	211.207,7	8,4	1.143,8	1.917,6	210.434,0	8,4
2011	229.395,1	8,6	4.555,8	3.644,6	230.306,3	9,4
2012	239.496,8	4,4	5.826,7	2.953,6	242.369,9	5,2
2013	240.154,0	0,3	7.429,4	1.226,7	246.356,6	1,6
2014	251.962,7	4,9	7.953,3	2.696,1	257.220,0	4,4
2015	261.783,3	3,9	7.135,5	3.194,5	265.724,4	3,3
2016	274.407,7	4,8	6.330,3	1.451,7	279.286,4	5,1
2017	297.277,5	8,3	2.728,3	3.303,7	296.702,1	6,2
2018	289.697,4	-2,5	3258,4	2583,2	292.171,3	-1,5
2019	291.017,4	0,45	2.212,0	2.824,5	290.446,9	-0,6

Çizelge 3’de detayı görülen elektrik üretim ve tüketimlerin bir önceki yıla göre artış yüzdeleri Şekil 3’de verilmiştir. 2001 ve 2009’daki ekonomik kriz yıllarında üretim ve tüketim artış oranları negatife düşmüştür.



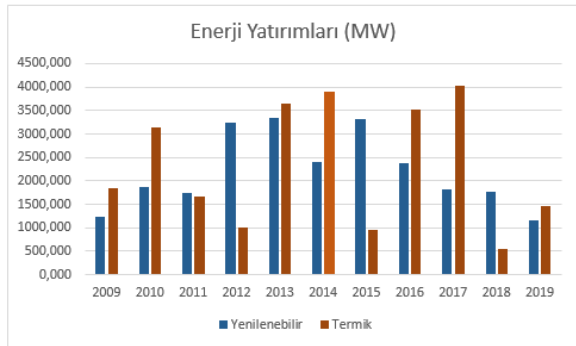
Şekil 3. 1970-2017 yılları arası elektrik üretim ve tüketim yüzde artış oranları

Yenilenebilir kaynakların hayatımızda yer almaya başlamasıyla birlikte bazı tanımların biraz daha netleşmesi gerekebilir. Şekil 4’de enerji kaynaklarının direkt kullanılışlarına veya dönüşümden geçip geçmeden kullanılışlarına göre yapılan bir sınıflama görülmektedir [11]. Kaynağı tükenmeyen olarak ve dolayısıyla yenilenebilir enerji sınıfında olan hidroelektrik, güneş, rüzgâr, jeotermal, hidrojen ve diğerleri aynı zamanda birincil enerji kaynağıdır.

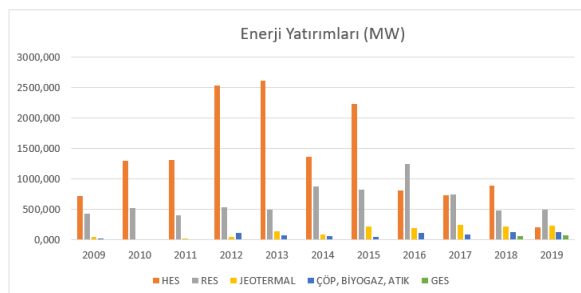


Şekil 4. Enerji kaynakları sınıflandırılması

Elektrik üretiminde yenilenebilir kaynak olarak güneş, rüzgâr ve jeotermalin önemli bir yer edinmeye başladığı son 10 yılın enerji yatırımları eigm.gov.tr adresinden erişilerek bu tablolar üzerinde analiz yapılmıştır. 2009-2019 (2019 yılının ilk 10 ayı) arasındaki yenilenebilir ve termik yatırımları Şekil 5’de, yenilenebilir yatırımların kendi içindeki dağılımı ise Şekil 6’da görülmektedir [11,12]. 2012, 2015 ve 2018’de yıllık olarak devreye alınan yenilenebilir enerji santralleri termik santral kapasitesinden büyüktür. Geriye kalan 8 yıl boyunca termik yatırım miktarı daha fazla olmuştur.



Şekil 5. 2009-2019 arası yıllık devreye alınan yenilenebilir ve termik santral yatırımları



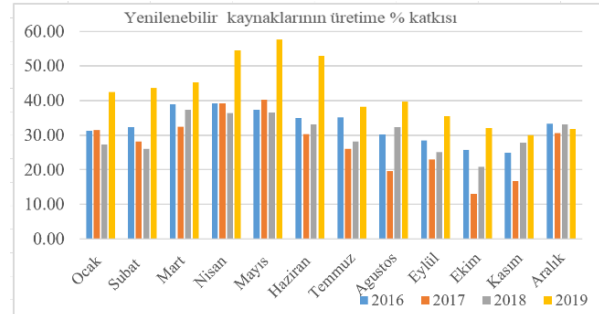
Şekil 6. 2009-2019 arası yıllık devreye alınan yenilenebilir santral yatırımları

Şekil 5 ve 6’daki grafikleri oluşturan gerçek değerler ise Çizelge 4’de görülmektedir [13]. GES üretimdeki yerini ancak 2016’larda alırken, çöp, atık ve biyogaz gibi alanlarda yapılan akademik çalışmalar ve bunları kullanan uygulamalar oldukça artmıştır. 2015 yılından bu yana jeotermal enerji yatırımları yaklaşık aynı değerlerde devam etmektedir.

Çizelge 4. 2009 ile 2019 arasındaki enerji yatırımları

MW	Termik	HES	RES	Jeotermal	Çöp,Atık, Biyogaz	GES	Toplam
2009	1835,006	725,168	439,100	47,400	21,673	0	3068,347
2010	3150,084	1299,449	528,600	17,000	17,092	0	5012,225
2011	1666,021	1305,624	408,550	20,000	18,532	0	3418,727
2012	1011,299	2534,645	531,850	48,000	118,721	0	4244,515
2013	3647,178	2613,359	498,100	148,620	79,078	0	6986,335
2014	3899,960	1368,755	882,290	94,100	60,069	0	6305,174
2015	958,436	2229,462	830,750	218,957	49,966	0	4287,571
2016	3531,139	809,720	1245,678	196,980	122,681	12,900	5919,098
2017	4019,402	736,921	746,315	242,870	89,953	5,000	5840,461
2018	540,176	889,669	480,325	218,790	125,705	63,760	2318,425
2019	1451,616	207,494	495,460	232,170	131,727	8,086	2599,553
Top.	25710,317	14512,772	7087,018	1484,887	835,197	162,746	

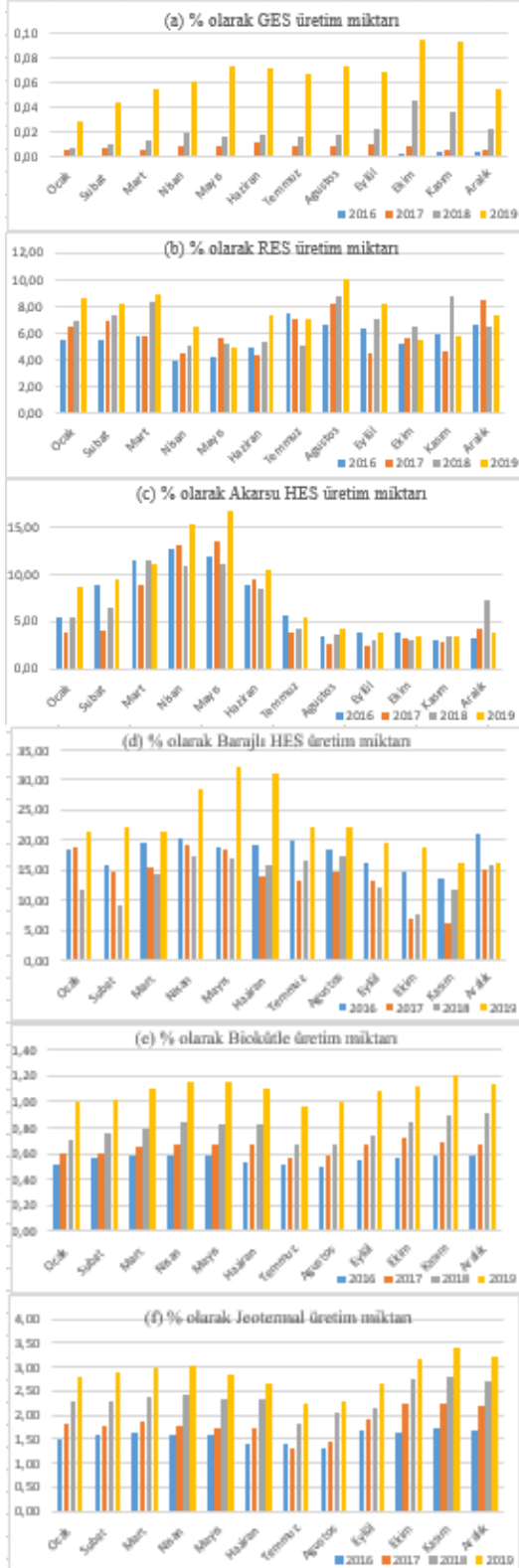
Şekil 7’de ise TEİAŞ web sayfasından alınan veriler ile 2016 yılından 2019 yılına kadar elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların toplam olarak üretime katkıları aylık olarak görülmektedir [10].



Şekil 7. 2016-2019 arasında yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretim yüzdesi

Yeni yapılan yatırımların etkisi ve yenilenebilir kaynaklardan özellikle akarsu, rüzgâr ve güneşin değişen rejimleri ile farklılık göstermekle birlikte 2019 yılının ilk 10 ayında diğer yılların aynı aylarına göre çok daha fazla üretime katkı konduğu görülmektedir. Şekil 4’de verilen yenilenebilir kaynak grubundan hidrojen, dalga ve gel-git enerjileri henüz ülkemizde üretimde bulunmadığından, yukarıda toplamı verilen kaynak türlerinin üretime katkıları Şekil 8’de ayrı ayrı görülmektedir.

GES lisanslarının verilmesi ve üretime başlamaları ile 2018 yılının ikinci yarısı ile 2019 yılında olmaya başlamıştır ancak toplamdaki yeri halen binde mertebesinde. RES’in ise tüm yıllarda kış ve yaz ayları olmak üzere yılın bir yarısında daha yüksek enerji ürettiği görülmektedir. Akarsu HES’lerin yılın ikinci yarısında rejimi çok düşmektedir. Barajlı HES’lerde incelenen tüm yıllarda Ekim Kasım aylarında üretim düşüşleri gözlenmektedir. Biokütle’nin mevsimlere göre değişmediği, jeotermal’in ise Temmuz Ağustos’ta çok az bir düşüş gösterdiği açıktır. Yenilenebilir kaynaklardan üretim katkısı olarak bakıldığında en önemli oranın RES ile her iki tür HES olduğu diğer üç kaynağın toplam etkisinin %2-3’leri ancak bulunduğu görülmektedir.

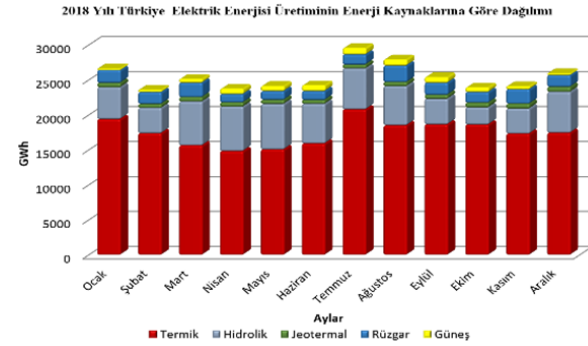


Şekil 8. 2016-2019 arasında a) GES, b) RES, c) Akarsu HES, d) Barajlı HES, e) Biokütle, f) Jeotermal yenilenebilir kaynaklarından elektrik üretim yüzdeleri

3. Yenilenebilir Kaynakların Puant Güçler İle İlişkisi

Bu kısımda analiz yapabilmek için 2018 yılının puant değerlerinin hangi gün ve tarihlerde olduğunu belirlemek gerekmektedir. TEİAŞ'dan elde edilen veriler, bir yıla ait her bir saate, güne, aya ve yıla ait en düşük ve en yüksek puant anını yani saatini vermektedir. Verilen bu saat dakikalık çözünürlüğe sahip olup, her dakika veri tazelenmektedir. O ana ait üretim verisi kaynaklardan temin edilememesi sebebiyle, puant (dakikasındaki) anına ait saat dilimindeki elektrik üretimi EPIAŞ'dan alınmış ve puant anı enerji üretimi olarak kabul edilmiştir.

Puant yükler ile ilgili analizler sadece bir tek 2018 yılına ait veriler üzerinde yapılmıştır. Bu amaçla TEİAŞ'ın yük tevzi bilgi sistemi web sayfasından [14] ve EPIAŞ'ın web sayfasından [15] faydalanılarak aşağıdaki bilgiler derlenmiştir. 31 Aralık 2018 tarihi itibarıyla ülkemizde 45,940.96 MW'lık (%52) termik ve 42,269.86 MW'lık (%48) yenilenebilir kaynak temelli kurulu güç olduğu görülmektedir. Kurulu güçler birbirine bu kadar yakın iken üretimin kaynaklara göre dağılımında benzer bir oran söz konusu değildir ve üretim değerleri Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. 2018 yılı kaynaklara göre elektrik enerjisi üretimi

Yıl bazında bakıldığında 2018 için üretilen 289.697,4 GWh'lik enerjinin 203.318 GWh'lik kısmı termik kaynaklardan elde edilmiştir. Bu oran üretimde %70.18 olarak ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 5'de görülen 2018 yılına ait her ayın puant gün, saat ve talep miktarı görülmektedir. Özellikle zaman veya ayın hangi günü olduğu konusunda bir ilişki kurabilmek çok olası gözükmemektedir. Sabah 11:00'de veya gece 21:00'de en yüksek talep olabilmıştır. 2018 yılının puantı 1 Ağustos günü saat 15:20 da gerçekleşip, Temmuz ayı puant değeri ve gerçekleşme zamanı ile çok yakınlık göstermektedir. Yılın ayları arasında en yüksek ve en düşük puant güç farkı %28 olmuştur.

Çizelge 5. 2018 yılı aylık en yüksek puant zaman ve değerleri

Tarih	Saat	Üretilen Enerji
18.01.2018	11:50	42.460 MWh
26.02.2018	11:20	40.280 MWh
01.03.2018	11:00	40.435 MWh
03.04.2018	20:00	37.481 MWh
04.05.2018	21:00	35.552 MWh
28.06.2018	14:40	40.532 MWh
30.07.2018	16:30	45.349 MWh
01.08.2018	15:20	45.543 MWh

04.09.2018	16:00	43.201 MWh
26.10.2018	19:00	35.967 MWh
29.11.2018	17:30	40.670 MWh
12.12.2018	17:40	41.417 MWh

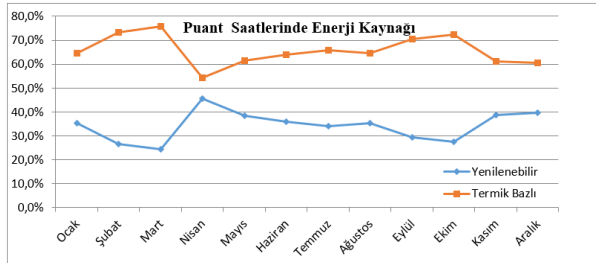
16.06.2018	6:00	18.406 MWh
01.07.2018	6:00	26.292 MWh
22.08.2018	7:00	21.842 MWh
30.09.2018	8:00	23.804 MWh
29.10.2018	4:00	22.565 MWh
04.11.2018	8:00	23.868 MWh
31.12.2018	4:00	24.790 MWh

Çizelge 5’de görülen zamanlar için EPİAŞ web sayfası şeffaflık platformundan [15] elde edilen saatlik üretim verileri ve kaynaklara göre dağılımından Çizelge 6 elde edilmiştir. Bu puantlarında termik kaynaklardan elektrik elde edilmesi en yüksek %77.02 ile Eylül, en düşük oran %56,94 ile Mart ayında gözlenmektedir.

Çizelge 6. 2018 yılı aylık puant anında elektrik enerjinin üretildiği kaynak dağılımı

Puant Saatinde Üretilen Enerji (MWh)	Ay	HES	Rüzgar	Güneş	Jeotermal	Biyokütle	Diğer (termik, doğal gaz vb.)
22.979	Ocak	17,15%	4,96%	0,00%	3,52%	0,94%	73,44%
25.719	Şubat	14,52%	17,26%	0,00%	3,01%	0,92%	64,29%
25.049	Mart	20,92%	17,89%	0,01%	3,14%	1,10%	56,94%
24.445	Nisan	17,95%	3,36%	0,01%	3,54%	1,09%	74,06%
21.685	Mayıs	25,87%	4,27%	0,02%	3,23%	1,25%	65,37%
18.406	Haziran	24,29%	5,53%	0,01%	4,30%	1,36%	64,52%
26.292	Temmuz	19,34%	2,36%	0,01%	3,06%	0,98%	74,25%
21.842	Ağustos	17,64%	12,65%	0,02%	3,75%	1,05%	64,90%
23.804	Eylül	8,84%	9,44%	0,06%	3,63%	1,00%	77,02%
22.565	Ekim	13,68%	5,86%	0,00%	4,08%	1,09%	75,29%
23.868	Kasım	11,53%	11,53%	0,07%	3,90%	1,10%	71,87%
24.790	Aralık	20,21%	1,70%	0,00%	3,93%	1,24%	72,91%

2018 yılı puantlarındaki toplam yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi ile termik kökenli üretim grafiği Şekil 10’da görülmektedir.



Şekil 10. 2018 yılı aylık puantlarındaki termik ve yenilenebilir kaynak yüzdeleri

Değerlendirmesinin yapıldığı yıl 2018 olması nedeniyle, bir de 2018 yılı elektrik üretiminde kaynak kullanım oranlarına da bakmak gerekecektir. 2018 yılında elektrik üretimimizin, %37,5'i kömürden, %29,8'i doğal gazdan, %19,9'u hidrolik enerjiden, %6,7'si rüzgardan, %1,6'sı güneşten, %2,8'i jeotermal enerjiden ve %1,7'si diğer kaynaklardan elde edilmiştir [13].

2018 yılı için aylık en düşük puantın gerçekleştiği gün, saat ve miktar bilgisi ise Çizelge 7’de görülmektedir. En yüksek puant saati konusunda bir benzeşim söz konusu olmamakla birlikte en düşük puant için sabahın erken saatleri olduğu görülmektedir. Yılın en düşük puant değeri soğutma ve ısıtma hatta aydınlatma yüklerinin olmadığı 16 Haziran sabah 06.00’da görülmüştür.

Çizelge 7. 2018 yılı aylık en düşük puant zaman ve değerleri

Tarih	Saat	Üretilen Enerji
01.01.2018	5:00	22.979 MWh
11.02.2018	8:00	25.719 MWh
18.03.2018	8:00	25.049 MWh
23.04.2018	7:00	24.445 MWh
20.05.2018	7:00	21.685 MWh

Çizelge 7’de görülen 2018 yılının en düşük puantlarında üretimin hangi kaynaktan karşılandığının verisi ise Çizelge 8’de verilmiştir. Yenilenebilir kaynakların en düşük katkısı Eylül 2018 ayında gerçekleşip %23,9 olarak gerçekleşmiştir. Mart 2018’de ki en düşük puantın olduğu zamanda ise yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi %43,1 ile en üst seviyede olmuştur.

Çizelge 8. Aylık en düşük puant anında kaynak dağılımı

2018	Yenilenebilir	Termik Bazlı
Ocak	26,6%	73,4%
Şubat	35,7%	64,3%
Mart	43,1%	56,9%
Nisan	25,9%	74,1%
Mayıs	34,6%	65,4%
Haziran	35,5%	64,5%
Temmuz	25,8%	74,2%
Ağustos	35,1%	64,9%
Eylül	23,9%	77,0%
Ekim	25,6%	75,3%
Kasım	29,2%	71,9%
Aralık	28,2%	72,9%

Bir diğer bakılması gereken karşılaştırma ise yılın 12 ayında gerçekleşen en yüksek ve en düşük puantlarında her bir yenilenebilir enerji kaynağının genel üretime katı oranı olmalıdır. Bu nedenle Çizelge 9’da en yoğun olarak hayatımızda olan dört kaynağın üretime katkı oranları yüzdesel olarak görülmektedir. Her bir kaynağın kendi özellikleri gereği, puantın olduğu zaman dilimi için kesin bir ilişki tanımlamak mümkün görülmemektedir.

Çizelge 9. Aylık en düşük ve en yüksek puant saatlerinde yenilenebilir enerji kaynak dağılımı

Aylar	Hidroelektrik		Rüzgar		Güneş		Jeotermal	
	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Ocak	21,40%	17,15%	11,44%	4,96%	0,01%	0,00%	1,84%	3,52%
Şubat	16,93%	14,52%	7,08%	17,26%	0,03%	0,00%	2,00%	3,01%
Mart	18,75%	20,92%	2,95%	17,89%	0,02%	0,01%	2,00%	3,14%
Nisan	37,72%	17,95%	5,11%	3,36%	0,00%	0,01%	2,13%	3,54%
Mayıs	30,66%	25,87%	5,11%	4,27%	0,00%	0,02%	1,97%	3,23%
Haz.	25,39%	24,29%	8,17%	5,53%	0,04%	0,01%	1,71%	4,30%
Tem.	26,92%	19,34%	5,24%	2,36%	0,01%	0,01%	1,39%	3,06%
Ağus.	28,01%	17,64%	5,38%	12,65%	0,03%	0,02%	1,40%	3,75%
Eylül	25,03%	8,84%	2,41%	9,44%	0,03%	0,06%	1,45%	3,63%
Ekim	19,63%	13,68%	4,57%	5,86%	0,00%	0,00%	2,54%	4,08%
Kasım	22,77%	11,53%	13,00%	11,53%	0,00%	0,07%	2,35%	3,90%
Aralık	32,29%	20,21%	4,53%	1,70%	0,00%	0,00%	1,92%	3,93%

Değerlendirilmesi istenebilecek bir diğer ilişki ise, söz konusu ay için en yüksek puantın yaşandığı gün, en yüksek üretimin olup olmadığı, ya da tersinin geçerli olup olmadığı araştırılmasıdır. Bu nedenle Çizelge 10 ve Çizelge 11’de en yüksek ve en düşük puant ile en yüksek ve en düşük üretimlerin olduğu günler karşılaştırılmıştır.

Çizelge 10. Aylık en yüksek puant ve en yüksek üretim tarihleri

En Yüksek Puant			En Yüksek Üretim	
Tarih	Saat	Üretilen Enerji	Tarih	Toplam
18.01.2018	11:50	42.460 MWh	25.01.2018	893.523,04 MWh
26.02.2018	11:20	40.280 MWh	27.02.2018	855.209,51 MWh
01.03.2018	11:00	40.435 MWh	01.03.2018	858.397,04 MWh
03.04.2018	20:00	37.481 MWh	27.04.2018	793.591,50 MWh
04.05.2018	21:00	35.552 MWh	03.05.2018	783.703,67 MWh
28.06.2018	14:40	40.532 MWh	28.06.2018	867.226,90 MWh
30.07.2018	16:30	45.349 MWh	31.07.2018	960.555,94 MWh
01.08.2018	15:20	45.543 MWh	02.08.2018	977.367,86 MWh

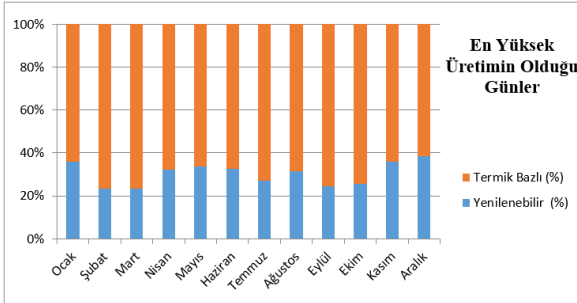
04.09.2018	16:00	43.201 MWh	04.09.2018	922.137,19 MWh
26.10.2018	19:00	35.967 MWh	25.10.2018	775.404,39 MWh
29.11.2018	17:30	40.670 MWh	30.11.2018	843.664,61 MWh
12.12.2018	17:40	41.417 MWh	19.12.2018	868.901,35 MWh

Aylık en yüksek puant ile en yüksek üretim tarihleri sadece Mart, Haziran ve Eylül aylarında aynı güne denk gelmiştir. Aynı kesişim en düşük puant için bakıldığında Ocak, Şubat, Haziran Temmuz, Eylül ve Kasım olarak toplam 6 ayda karşımıza çıkmaktadır. En yüksek puantı takip eden günde en yüksek üretimin çıkması (5 ay), tam tersi en düşük puanttan önceki gün en düşük üretimin olmasının (4 ay) tesadüf olup olmadığı üzerine bir değerlendirme yapılamamıştır.

Çizelge 11. Aylık en düşük puant ve en düşük üretim tarihleri

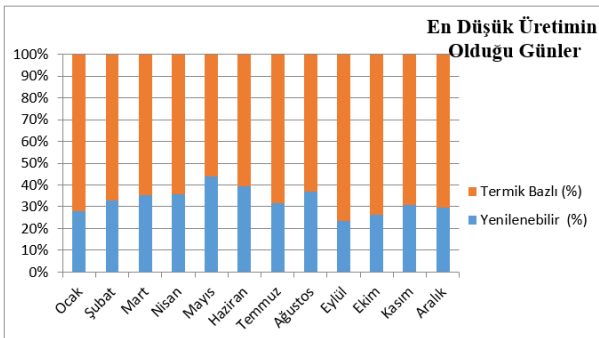
En Yüksek Puant			En Düşük Üretim	
Tarih	Saat	Üretilen Enerji	Tarih	Toplam
01.01.2018	5:00	22.979 MWh	01.01.2018	669.982,72 MWh
11.02.2018	8:00	25.719 MWh	11.02.2018	703.905,04 MWh
18.03.2018	8:00	25.049 MWh	11.03.2018	658.040,59 MWh
23.04.2018	7:00	24.445 MWh	22.04.2018	662.336,67 MWh
20.05.2018	7:00	21.685 MWh	13.05.2018	630.978,49 MWh
16.06.2018	6:00	18.406 MWh	16.06.2018	542.071,82 MWh
01.07.2018	6:00	26.292 MWh	01.07.2018	745.271,87 MWh
22.08.2018	7:00	21.842 MWh	21.08.2018	600.454,79 MWh
30.09.2018	8:00	23.804 MWh	30.09.2018	655.402,14 MWh
29.10.2018	4:00	22.565 MWh	28.10.2018	624.217,30 MWh
04.11.2018	8:00	23.868 MWh	04.11.2018	645.262,75 MWh
31.12.2018	4:00	24.790 MWh	02.12.2018	690.277,19 MWh

Her ayın en yüksek ve en düşük üretiminin olduğu günlerde termik ve yenilenebilir kaynaklardan enerji elde edilme yüzdeleri Şekil 11 ve Şekil 12'de görülmektedir.



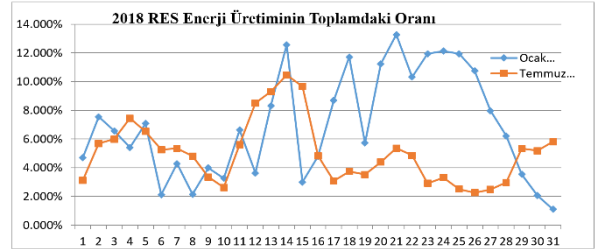
Şekil 11. En yüksek üretimin olduğu günler için kaynak dağılımı

Bu grafiklerden oransal bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarının her ayın en yüksek ve en düşük üretiminin olduğu günlerdeki oranları arasında bir ilişki olmadığına dair bir gözlem gerçekleştirilmemiştir.



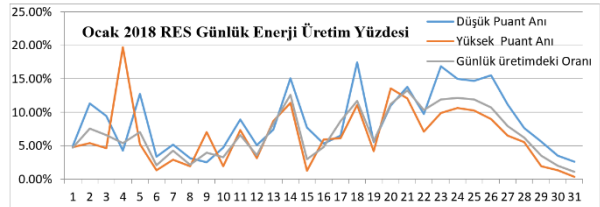
Şekil 12. En düşük üretimin olduğu günler için kaynak dağılımı

Değerlendirme ölçütlerinden bir diğeri olarak 2018 yılının Ocak Temmuz aylarında RES'in üretiminin puant anları ile ilişkisi incelenmesi düşünülmüştür. Bazı yenilenebilir kaynakların rejiminin mevsimlerden bağımsız olması ve GES'in de 2018 yılı için toplamda çok küçük bir katkı koyması açısından bu inceleme sadece RES için gerçekleştirilmiştir. Şekil 13'de RES üretiminin Ocak ve Temmuz 2018'deki toplam üretime % olarak katkısı görülmektedir. En düşük günlerde %2 olan katkı, en yüksek zamanında %13'leri geçmektedir.

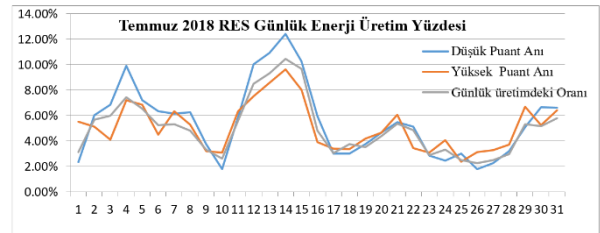


Şekil 13. RES'in Ocak ve Temmuz aylarında üretime katkısı

Şekil 14 ve 15'de sırası ile Ocak ve Temmuz aylarının her bir gününde puantın yüksek ve düşük olarak yaşandığı saat dilimi için RES üretim oranları elde edilmiştir.



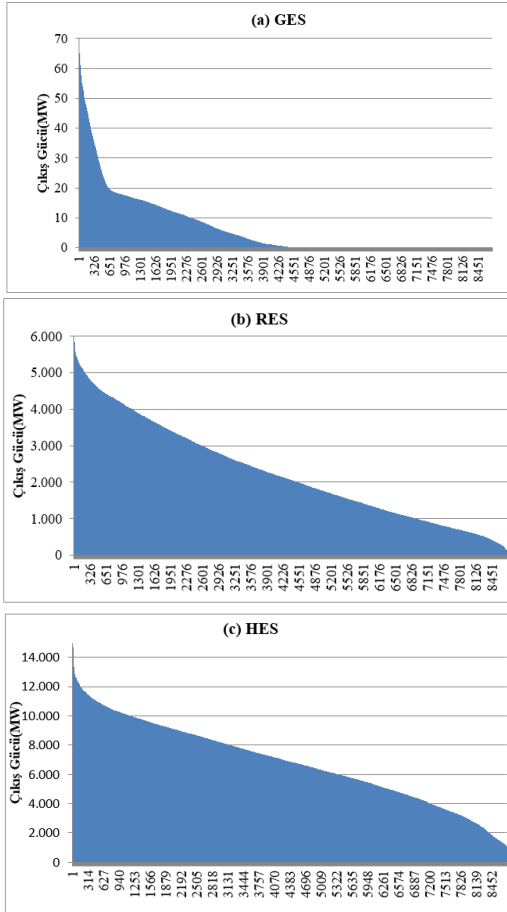
Şekil 14. Ocak 2018'de RES'in puant anlardaki üretimi



Şekil 15. Temmuz 2018'de RES'in puant anlardaki üretimi

Ocak ve Temmuz aylarında RES üretiminin düşük puant anlarında daha fazla enerji üretecek bir rejime sahip olduğu görülmektedir. Aranılan katkının RES tarafından konamadığı incelenen bu iki ay için oluşmadığı net bir şekilde görülmektedir.

Aranılan ilişkinin varlığının net olarak ortaya konamayacağı tüm bu analizlerden görüldüğünden söz konusu çalışmanın son ayağında yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçlerinin tam kapasite ile çalışıp çalışmadığına bakılmıştır. Bir tam yıl (365 gün*24 saatten) için 8760 saat olarak GES, RES ve HES (Barajlı ve akarsu olarak birlikte) santrallerinin çalışma süresi TEİAŞ ve EPIAŞ web sayfalarındaki verilerin analizi sonucu elde edilmiş ve Şekil 16'da sunulmuştur.



Şekil 16. Bir yıl içinde yenilenebilir santrallerinin a)GES b)RES c)HES kullanım durumu

Tüm bu santraller tam kapasite ile bir yıl boyunca çalışsaydı, yukarıdaki grafiklerde görülen dolu alanların birer dikdörtgen olması gerekirdi. GES'in gündüz saatlerinde enerji üretilebilmesi nedeniyle daha küçük bir alan kaplaması doğaldır, yukarıdaki grafikten de görüleceği üzere GES yaklaşık 4400 saat süresince hiçbir şey üretmemiştir. RES ve HES'lerinde neredeyse %50 kapasite ile çalıştığı açıktır.

4. Sonuç

Bu çalışmaya TEK'in kurulduğu günden bu yana elektrik üretiminde gözlenen gelişmeler üzerinde kısa bir değerlendirme yapılarak başlanmıştır. Elektrik üretim ve tüketimindeki artışın nüfus artışı, kişi başına kurulu güç ve kişi başına tüketim değerlerindeki tarihsel süreç gözlenmiştir. Bu büyük artışın gelişen teknoloji ile paralellik göstererek ihtiyaç atışı olduğu düşünülerek yorumlanmalıdır.

Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişim sürecine bakılarak, şu anda ülkemizin yenilenebilir enerjideki durumunun resmi verilere ulaşılabildiği Ocak 2016 yılından başlayarak 4 tam yılın saatlik üretim verilerinden farklı grafikler elde edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Bir nevi mevcut durum fotoğrafı çekilmeye çalışılmıştır. Ayrıca son on yıldır yapılan enerji yatırımları detaylandırılmıştır. Bu kaynak türüne göre yatırım detayına bakılınca, termik ve

yenilenebilir enerji kurulu güçleri arasındaki farkın kapanmasının yakın vadede beklenememesi gerektiği açıktır.

Bu çalışmanın diğer bir inceleme konusu ise puant yükler ile yenilenebilir kaynaklar arasında bir ilişki olup olmadığının araştırılmasıdır. En yüksek/en düşük puant yükler ve en yüksek/en düşük üretim verileri TEİAŞ ve EPIAŞ'ın sayfalarından indirilerek bir nevi veri madenciliği ile incelenmiştir. Puant yüklerin incelendiği bu çalışma sadece 2018 yılı ile sınırlı tutulmuş durumda kalmıştır.

Her ayın puant değerlerinin görüldüğü gün ve saatlerdeki termik ve yenilenebilir kaynaklarda elde edilen üretim miktarları gözlemlendiği gibi, örnek olarak seçilen Ocak ve Temmuz 2018 aylarının her bir gününün en yüksek ve en düşük puant anları ile bu anlarda RES'den üretilen enerji miktarları grafikler halinde sunulmuştur.

Görülebilir formata getirilen tüm veriler ışığında gözlenen net bir şey vardır ki: sadece puantın olduğu gün ve saat bilgisi ile saatlik üretim verisi bir mevcut ilişkiyi tanımlamak yeterli değildir. Ocak ve Temmuz aylarında günlük düşük puantın gerçekleştiği anlarda rüzgâr santrallerinin daha fazla enerji ürettiği görülmektedir.

Her bir yenilenebilir enerji kaynağının kendine özgü bir oluşma rejimi vardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ülke içinde konum olarak dağılımı ve her enerji kaynağının kendine has rejimi bilinip bunlar matematiksel olarak analiz edilmeden bir görüş bildirilmesi doğru olmayacaktır.

Literatür araştırmalarından da görülmüştür ki, büyük enterkonekte sistemdeki mevcut durum analizinden ise, son yılların yeni gelişen konuları dağıtım üretim, mikro şebekeler konularında yenilenebilir enerji kaynakları ile puant yüklerin karşılanabilmesi ve dolayısı ile enerji maliyetlerinin optimize edilmesi güncel araştırma alanlarıdır. Ayrıca kesikli rejimi olan bazı yenilenebilir enerji kaynaklarının üretiminin enerji depolama sistemleri ile depolanarak talep anlarında kullanılması da bir başka yeni çalışma yapılan alandır.

5. Kaynaklar

- [1] O. Çoban, F. N. Yorgancila, ve A. Çoban, "Relationship between Renewable Energy Consumption and Sustainable Economic Growth: The Case of Turkey", *Proceedings of the Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy, ICUE*, c. 2018-October, sayı October, 2019.
- [2] S. Ozcira, E. Aycicek, ve I. Y. Onel, "Features of renewables in energy projection of turkey in view of energy supply and demand scenarios", *2009 International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP 2009*, ss. 492-495, 2009.
- [3] I. Yuksel, H. Arman, ve I. H. Demirel, "Clean energy for future energy policy in Turkey", *5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Application, ICREGA 2018*, c. 2018-Janua, ss. 260-263, 2018.

- [4] G. Yılan, M. A. N. Kadirgan, ve G. A. Çiftçioğlu, “Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: The case of Turkey”, *Renewable Energy*, c. 146, ss. 519–529, 2020.
- [5] K. Chaiamarit ve S. Nuchprayoon, “Impact assessment of renewable generation on electricity demand characteristics”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 39, ss. 995–1004, 2014.
- [6] F. R. Serras, A. C. Marques, ve J. A. Fuinhas, “Evaluating the Impact of New Renewable Energy on the Peak Load - An ARDL Approach for Portugal”, *Energy Procedia*, c. 106, ss. 24–34, 2016.
- [7] R. Bahmani, H. Karimi, ve S. Jadid, “Stochastic electricity market model in networked microgrids considering demand response programs and renewable energy sources”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, c. 117, sayı October 2019, s. 105606, 2020.
- [8] A. Mehdizadeh, N. Taghizadegan, ve J. Salehi, “Risk-based energy management of renewable-based microgrid using information gap decision theory in the presence of peak load management”, *Applied Energy*, c. 211, sayı November 2017, ss. 617–630, 2018.
- [9] TEİAŞ Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi. <http://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2018-08/Önsöz.xls>. [Erişim: 02-Oca-2020].
- [10] TEİAŞ, “Elektrik Enerjisi Üretimi-Tüketimi-Kayıplar 2018”, <https://webapi.teias.gov.tr/file/5b2fb3e8-bf05-48b1-b2f0-20139c0cc7fb?download>. [Erişim: 05-Oca-2020].
- [11] A. Koç, “Dünyada ve Türkiye ’ de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi General Evaluation of Energy Outlook in Turkey and the World”, *Mühendis ve Makina Dergisi*, c. 59, sayı 692, ss. 84–112, 2018.
- [12] “Enerji İşleri Genel Müdürlüğü-Enerji Yatırımları”, <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-yatirimlar>. [Erişim: 03-Oca-2020].
- [13] “Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı-Elektrik”, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>. [Erişim: 02-Oca-2020].
- [14] “Yük Tevzi Bilgi Sistemi-Günlük İstatistikler”, https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf. [Erişim: 04-Oca-2020].
- [15] “Gerçek Zamanlı Üretim - Gerçekleşen Üretim - EPIAŞ Şeffaflık Platformu”, <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/uretim/gerceklesen-uretim/gercek-zamanli-uretim.xhtml>. [Erişim: 05-Oca-2020].

Hacer Şekerci ÖZTURA



Sarıkamış doğumlu olan Hacer Şekerci Öztura, 1986 yılı Dokuz Eylül Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği mezunudur. Yüksek lisans ve doktora çalışmalarının ardından, 2009 yılına kadar Dokuz Eylül Üniversitesinde öğretim üyesi olarak çalışan Öztura, halen Yaşar Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünde görev yapmaktadır. Doktora çalışmasını elektrik motor tasarımı üzerine yapan yazar, güç sistemleri, enerji verimliliği ve enerji kalitesi gibi alanlarda çalışmalarını sürdürmektedir.

Sezai POLAT



Sezai Polat, 1980 yılı Beyşehir doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini ise İzmir'de tamamlamıştır. Lisans eğitimini 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Yüksek Lisans öğrenimini 2011- 2014 yılları arasında Yaşar Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği programında tamamlamıştır. Doktora öğrenimine 2017 yılından itibaren Yaşar Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği programında devam etmektedir. Lisans öğrenimi mezuniyetinden itibaren özel sektör içerisinde Elektrik Mühendisi pozisyonunda çalışmıştır. Halen İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'nda Etüd Proje Birimi sorumlusu olarak çalışmaktadır. Araştırma alanları arasında yenilenebilir enerji sistemleri, enerji kalitesi, mikro şebekeler bulunmaktadır.

Fotovoltaik Enerjinin Sulama Amaçlı Uygulama İçin Kurulacak Bir Sistemin Sayısal Tasarımı ve Model Çalışması

Numerical Design & Modelling Study of Photovoltaic Energy System For Irrigation Applications

Volkan Peren ¹, Feriha Erfan Kuyumcu ², Çiğdem Gündoğan Türker ²



¹ Hyundai Assan Otomobil Fab. Tesis Yönetimi Bölümü, Kocaeli, Türkiye
volkanperen@hyundaiassan.com.tr

² İstanbul Gedik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İstanbul, Türkiye
Elektrik ve Elektronik Müh. Bölümü
feriha.kuyumcu@gedik.edu.tr, cigdem.gundogan@gedik.edu.tr

Öz

Çalışmanın amacı, sulama uygulamalarında fotovoltaik (FV) sistemlerin kullanılabilmesi için sistemin sayısal tasarımı ve modelinin geliştirilmesidir. Öncelikle, sistemin doğru boyutlandırılabilmesi için tasarım kriterleri belirlenir. Bu kriterlerden en önemlileri gereken su miktarı (debi), suyun temin edileceği kaynak ve kaynaktan iletileceği nokta arasındaki yükseklik, sistemin kurulacağı bölgedeki güneşlenme süresi ve ışınım miktarıdır. Sonrasında akım, gerilim ve güç gibi elektriksel özellikler ile FV sistemin verimi belirlenmektedir. Ayrıca model çalışması ile pompalanan suyun debisi, pompanın hidrolik güç ve motorun elektriksel güç değerleri hesaplanmaktadır. FV panellerden elde edilen enerji ile DA/DA dönüştürücü üzerinden Fırçasız Doğru Akım (DA) pompa motorunun sürücü devresi beslenmektedir. FV sisteme bağlı üretilen elektrik enerjisi ile dalgıç pompaların çalıştırılması durumu için sulama sistemi modelinin simülasyonu gerçekleştirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Sulama, Güneş Enerjisiyle Su Pompalama.

Abstract

The aim of this study is to develop numerical design and model of photovoltaic (PV) systems in irrigation applications. First of all, the design criteria are determined for correct dimensioning of the system. The most important of these criteria are the amount of water (flow) required, the height between the source from which the water will be supplied and the point to be transmitted from the source, the amount of sunshine period and the amount of radiation in the region where the system will be installed. Afterwards, the electrical properties such as current, voltage and power and efficiency of PV system are determined. In addition, the flow rate of the pumped water, the hydraulic power of the pump and the electrical power of the motor are calculated with the model study. With the energy obtained from the PV panels, the drive circuit of the Brushless Direct Current (DC) pump motor is supplied via the DC / DC converter. The simulation of the irrigation system model is performed for the operation of the submersible pumps with the electrical energy generated connected to the PV system.

Keywords: Photovoltaic Irrigation, Solar Water Pumping.

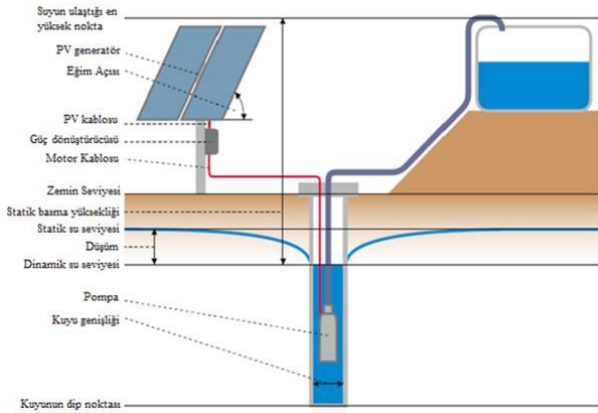
1.Giriş

Şebeke elektriğinin olmadığı tarımsal alanlarda sulama, fosil kaynaklı enerjiler ile sağlanmaktadır. Bu tip kaynaklar maliyetli, gürültülü ve devamlı ek yakıt gideri bulunmaktadır. Temiz ve sürekliliği ile ön planda olan fotovoltaik sistemleri her alanda olduğu gibi tarımsal alanda da çiftçilere sulamada daha ekonomik ve tamamen doğal yolla, çevreci bir kolaylık sağlamaktadır [1-3]. Güneş enerjili tarımsal sulama sistemleri, fosil yakıtlı sulama sistemleriyle kıyaslandığında amortisman süresi 1,5-2yıl gibi bir süreye kadar düşmektedir. Ayrıca, Tarımsal sulamaya devlet tarafından vergi teşviki ve hibeleri yer almaktadır.

Fotovoltaik sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, bu sistemlerin olabildiğince doğru bir şekilde boyutlandırılmasını gerektirmektedir. Güneş enerjisi ile çalışan tarımsal sulama sistemlerinin tasarımında; suyun pompalanacağı toplam yükseklik, gereksinim duyulan günlük su ve bölgedeki ortalama güneş enerjisi miktarlarının önceden hesaplanması veya tahmin edilmesi gereklidir. Bu verilere bağlı olarak sistemin boyutlandırılması ve panel, pompa, motor gibi bileşenlerin seçimi kolaylaşır. Bu çalışma ile gerçek veriler ile boyutlandırılmış tüm sistemin tasarımı, hesaplanması ve modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

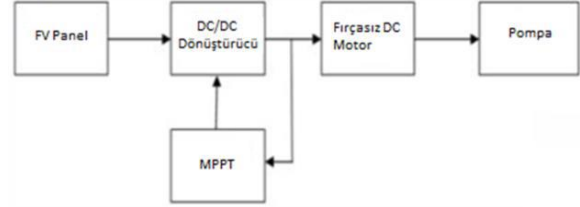
2. Fotovoltaik Su Pompalama Sistemi

Fotovoltaik panelleri, güç dönüştürücüleri ve pompa motorundan oluşan su pompalama sisteminin blok diyagramı Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1: FV Su Pompalama Sistemi

FV panellerin çıkışındaki gerilim; ışınım ve sıcaklık gibi faktörlerden etkilenerek değişkenlik gösterebilir. DC/DC dönüştürücü bu olumsuzluğu çıkış gerilimini istenen değerlerde tutarak gidermeye çalışır. Bu amaçla sistemin maksimum verimde çalışabilmesi için maksimum güç noktasını izlemek üzere özel elektronik devre ve algoritmalar kullanılmaktadır. Sistemde güneş ışınımının bulunduğu sürelerde su pompalanır veya üretilen enerji daha sonra kullanılmak üzere depolanır. Güneş ışınımının olmadığı sürelerde kullanılmak üzere bataryalarda güç depolanabilir. Batarya dolmuş sistemi kullanılması durumunda, sistemin kontrolü için elektronik kontrol üniteleri gereklidir. Bataryalar, bulutlu günlerde güneş ışınım şiddetinin düşük olması durumunda, sistemin çalışmasına olanak sağlarlar [4].



Şekil 2: FV su pompalama sistemi blok şeması

Fotovoltaik pompa sistemlerinin maliyetlerinin yüksek olması, bu sistemlerin olabildiğince doğru bir şekilde boyutlandırılmasını gerektirmektedir. Şekil 2'de fırçasız DC motor kullanılan FV su pompalama sisteminin blok şeması verilmektedir. Fırçasız DC motorların en önemli avantajları; yüksek verim, sessiz çalışma, fırça ve kolektör sistemlerinin kaldırılmasından dolayı bakım işleminin oldukça basit ve masrafsız olmasıdır. Ayrıca, patlayıcı ortamlarda tehlike oluşturan elektriksel arkların oluşmaması, endüvi sargılarının statorlarda bulunması nedeniyle sargı sıcaklığının dışarıya kolayca aktarılması, rotor üzerinde hiçbir sargı bulunmadığından dolayı elektriksel kayıpların minimum olması gibi avantajları bulunmaktadır. Düşük güçlerde fırçasız DC motorlar, diğer motorlara göre daha iyi verim ve daha yüksek güç/hacim oranına sahip olduğundan, aynı motor boyutlarında daha fazla çıkış gücü sağlamaktadır.

Elektrik motoru, güç gereksinimi ve akım tipine bağlı olarak seçilmelidir. Alternatif akım (AC) ile çalışan motor kullanılması durumunda, sisteme DC/AC dönüştürücü yerleştirilmesi gerekir. Güç elektronisi dönüştürücüleri, gerilim düşümü etkisi ile oluşan kayıplar dikkate alındığında 42V ya da 72V gerilimle beslenebilecek BLDC (Fırçasız Doğru Akım Motoru) tipi motor kullanımı solar sulama sistemlerinde oldukça yaygındır [5-6].

Tarımsal sulama sistemlerinin tasarımında; suyun pompalanacağı toplam yükseklik, gereksinim duyulan günlük su ve bölgedeki ortalama güneş enerjisi miktarlarının önceden hesaplanması veya tahmin edilmesi gerekir. Uygulamada su kaynağı olarak kuyu, depo, nehir, kanal vb. olmasına göre kullanılacak pompa tipi değişecektir. Yüzeysel uygulamalarda santrifüj pompalar kullanılırken, kuyu suyu temini için dalgıç pompalar tercih edilmektedir. Derin kuyulardan su çıkarmak için kullanılan dalgıç pompa besleme borusuna asılı olarak sarkıtıldığı kuyuda su soğutmalı olarak çalışır. Kurşun bronz gibi özel malzemeden yapılan yataklar su ile yağlanır. Pompa mili motor miline özel bir kavrama ile bağlanır. Burada motor olarak kullanılan sincap kafesli asenkron motor ise, rotor sürtünme kayıplarını azaltmak için ince ve uzun yapılıdır. Su ile dış yüzeyden soğutulur. edelenen besleme kablosundan suyun motor ç ne sızmasını önlemek için kablo girişinde özel bir sızdırmazlık bulunur. Delik millî pompa motorlarında ters dönüş tek yönlü kavrama ile önlenir. Bu düzen kullanılmazsa akımı kesilen motor pompa içinde kalan suyun etkisi ile ters yönde döner ve pompa m l n n kavramadan çözülerek kuyuya düşmesine neden olabilir.

Simülasyonunu gerçekleştirilen uygulama için kuyudan su temini düşünülerek dalgıç tipi pompa seçilmiştir. Seçilen dalgıç pompalar fırçasız sürekli miktatsız doğru akım motoru (BLDC) tahriklidir.

3. Sistem Tasarımı

Fotovoltaik sulama sistemi tasarlanırken şu maddelere dikkat edilmelidir;

- Kurulumun yapılacağı yerdeki güneş ışınımı ve güneşlenme süreleri,
- Gereken su miktarı,
- Sistemdeki toplam dinamik yükseklik,
- Pompalanan suyun kalitesi,
- Su kaynağı (kuyu, akarsu, su kanalı, baraj ya da tank),
- Kullanılacak FV teknolojisi (Mono/Polikristal, ince film),
- Panellerin kurulacağı yer (çatı, bahçe, arazi vb.) ve montaj tipi.

Uygulamanın yapıldığı arazi şartlarına, sulamanın yapılacağı ürüne göre sulama miktarı ve ihtiyaç duyulan su miktarı değişmektedir. Su miktarının değişmesi tasarımı etkilemektedir. Ayrıca, pompayla temin edilen suyun bir tankta depolanması avantaj sağlayacaktır. Böylece güneşlenmenin olmadığı zamanlarda da su kullanılabilir. Seçilen boru çapı da önemlidir. Geniş çapta boru seçmek dinamik basma yüksekliğini düşüreceğinden toplam güç tüketimini azaltacaktır [7-9].

3.1. Günlük Su Gereksiniminin Belirlenmesi

Sistem tasarımını gerçekleştirebilmek için, öncelikli gereken bilgi günlük pompalanan su miktarıdır. Su pompaları için debi; m³/s, m³/saat, l/s gibi birimlerle ifade edilirken, fotovoltaik sistem güneş ışığına bağlı olarak çalıştığından sistem tasarımında ihtiyaç duyulan su miktarı gün bazında ele alınır.

Tasarlanan sistemde su ihtiyacı kuyudan karşılanan, tarım arazilerinin sulamasına yönelik bir sistem olarak düşünülmektedir. Sulamaya yönelik uygulamalarda yetiştirilen ürün tipine bağlı olarak su ihtiyacı, sulama süresi ve sulama yöntemleri değişiklik gösterebilir. Örnek bir uygulamadan yola çıkarak, 6 hektarlık bir alanın sulanması için sistemin toplam su ihtiyacı 120 m³/gün olarak kabul edilmektedir.

3.2. Toplam Dinamik Yükseklik

Suyun en alçak noktası ile ulaştığı en yüksek nokta arasındaki mesafe, statik yükseklik olarak adlandırılır. Denklem 1'de verildiği gibi statik yükseklik ve sürtünme kayıplarından toplam dinamik yükseklik (TDY) hesaplanabilir.

$$TDY = H_g + H_d + H_p + H_f + H_v \quad (1)$$

H_g; geometrik yükseklik, H_d; derin kuyu ya da su kaynağında debiye bağlı meydana gelen seviye düşümü, H_p; sistemin çıkışında istenen basınç veya işletme basıncı, H_f; sistemde kullanılan düz boru ve endüvide meydana gelen toplam sürtünme kayıpları ve H_v; pompalanan suyun hız enerjisidir. Geometrik yükseklik dışındaki yükseklik ve kayıplar mevcut uygulama için ihmal edilebilir ölçektektir. Buna bağlı olarak tüm kayıplar da dâhil olmak üzere sistem için öngörülen TDY, 40 m olarak düşünülmektedir.

3.3. Pompanın Gücü

Pompalanacak su miktarı, beraberinde sulama süresine bağlı olarak debinin ve TDY'nin bilinmesiyle pompa sistemi için gerekli olan Hidrolik güç (P_h) hesaplanabilir;

$$P_h = Q \text{ (m}^3\text{/s)} \cdot TDY \text{ (m)} \cdot \rho \text{ (10}^3\text{kg/m}^3) \cdot g \text{ (m/s}^2) \quad (2)$$

Pompa miline aktarılması gereken mekanik güç (P_{mek}), hidrolik güç (P_h) ve pompa verimi (μ_p) ile Denklem (3)'deki gibi belirlenir;

$$P_{mek} \text{ (W)} = P_h \text{ (W)} / \mu_p \text{ (\%)} \quad (3)$$

Seçilen pompanın katalogunda yazan verim değeri %55, motorun verimi ise %92 alınmıştır. Gün içinde sulama yapılan süre, 8-10 saat olduğu bununla birlikte gün ışığına bağlı olarak üretilen güç ve pompalanan su debisi değişeceğinden, pompanın ortalama 15 m³/saat'lik bir debiye sahip olması durumunda toplam su ihtiyacını karşılayabileceği öngörülmektedir. (15 m³/saat=0,00416 m³/s)

$$P_h = 0,00416 \text{ (m}^3\text{/s)} \cdot 40 \text{ (m)} \cdot 10^3 \text{ (kg/m}^3) \cdot 9,8 \text{ (m/s}^2) \quad (4)$$
$$= 1,63 \text{ kW}$$

$$P_{mek} \text{ (W)} = 1,63 \text{ kW} / 0,55 = 2,96 \text{ kW} \quad (5)$$

Mekanik çıkış gücünün motor verimine bölünmesiyle, elektriksel giriş gücü hesaplanır;

$$P_{elk} \text{ (W)} = 2,96 \text{ kW} / 0,92 = 3,21 \text{ kW} \quad (6)$$

Güç dönüştürücüsünün veriminin de % 90 olduğu kabul edilerek FV panellerden çekilecek olan güç değeri aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$P_{FV} \text{ (W)} = 3,21 \text{ kW} / 0,9 = 3,57 \text{ kW} \quad (7)$$

3.4. FV Panellerin Boyutlandırılması

Eğer sistemin geceleri de çalışması düşünülüyorsa batarya grubuna gereksinim duyulmaktadır. Fakat böyle bir zorunluluk yoksa enerjinin depolanması yerine, gün içerisinde suyun depolanması, akülerin pahalı, bakım ve kontrol gerektirmesi, ağır ve sınırlı bir kullanım ömrüne sahip olması göz önüne alınarak daha da ekonomik bir çözüm olacaktır.

FV panellerin boyutlandırılması sistem yükü ve sistemdeki tüm kayıplar göz önüne alınarak yapılmalıdır. Sistemde gerekli olan 3,57 kW 'lık gücü sağlamak için FV panellerden 3 dizi halinde 4 seri modül kullanılmaktadır. Bu durumda toplam kurulu güç;

$$P_K \text{ (W)} = 12 \cdot 305,2 \text{ kW} = 3,66 \text{ kW} \quad (8)$$

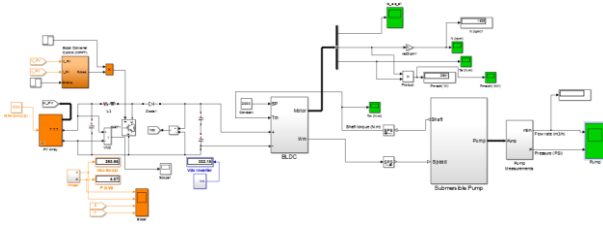
olmaktadır.

4. Simülasyon Sonuçları

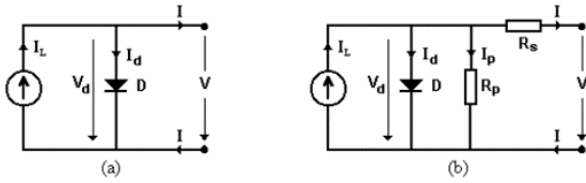
FV su pompalama sistemi simülasyonu için Matlab/Simulink ortamında tasarlanan model Şekil 3'de gösterilmiştir. Model FV panel, DC/DC dönüştürücü, MPPT kontrol bloğu, fırçasız DC motor ve pompadan oluşmaktadır.

Simülasyon başlatıldığında FV panellerde üretilen elektrik enerjisi DC/DC dönüştürücü üzerinden fırçasız DC motoru beslemekte ve pompanın çalışması sağlanmaktadır. Simülasyon başlangıcından itibaren FV panellerin çıkışındaki gerilim ve akım değerleri maksimum güç noktasına ulaşıncaya kadar yükselir ve bu noktaya ulaşıldığında gerilim ve akım değerleri

MPPT kontrol bloğunun gönderdiği kapı sinyalleri ile DC/DC dönüştürücünün çıkışındaki değerler kontrol edilmiştir. Simülasyonun başlangıç anından itibaren motorun devir sayısı ve pompalanan su miktarı giderek artar. Maksimum güç noktasında çalışırken bir süre sonra motorun devir sayısı istenen değere sabitlenir ve hedeflenen debiye ulaşılır. Pompa, bu noktada kararlı çalışmasını sürdürür. Modüler bir yapıya sahip olan FV su pompalama sisteminin her bir bileşeni, simulinkte ayrı ayrı bloklar halinde modellenmiş ve bir araya getirilmiştir.



Şekil 3: FV su pompalama sistemi simülasyon modeli



Şekil 4: Fotovoltaik hücrenin (a) basitleştirilmiş (b) tek diyotlu eşdeğer devresi

İdeal bir fotovoltaik hücre, Şekil 4’de görüldüğü gibi, bir diyot ve paralel bir akım kaynağı kullanılarak modellenebilir. Akım kaynağı, ışık şiddeti (G) ile direkt orantılı olan fotovoltaik akım I_L ’yi meydana getirir. Şekildeki diyot, fotovoltaik hücrenin P-N geçiş bölgesini temsil etmektedir. FV pil yarı iletken bir malzeme olması nedeniyle diyot ile gösterilmektedir.

Şekil 5’te verilen FV panelin modellenmesinde tek bir hücre için matematiksel olarak Denklem 9’dan faydalanılmaktadır;

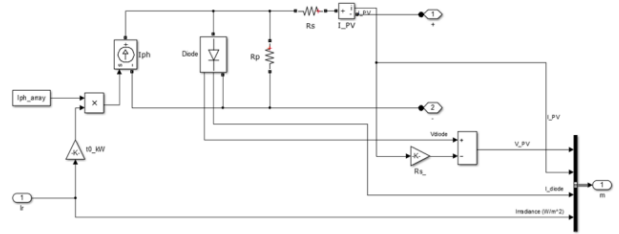
$$I = I_L - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V+I.R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{(V+I.R_s)}{R_p} \quad (9)$$

I_d ; diyot akımı, diyot ters doyma akımı, I_{sat} ; elektronun elektrik yükü, V ; diyot üzerinde düşen gerilim, n ; diyot emisyon faktörü, k ; Boltzmann sabiti ve T ; mutlak sıcaklıktır. Gerilim düşümü seri bir R_s direnci ile, pratikte gözlenen sızıntı akımı R_p direnci ile modellenebilir.

Fotovoltaik akım, ışık şiddeti ve fotovoltaik hücre sıcaklığının bir fonksiyonudur;

$$I_L = [I_{L,ref} + k_i (T - T_{ref})] \cdot (G/G_{ref}) \quad (10)$$

k_i ; FV hücre kısa devre akımının sıcaklık katsayısı ($A^\circ C$), $I_{L,ref}$; referans sıcaklıktaki fotovoltaik akım, G_{ref} ; referans sıcaklıktaki ışık şiddetidir.



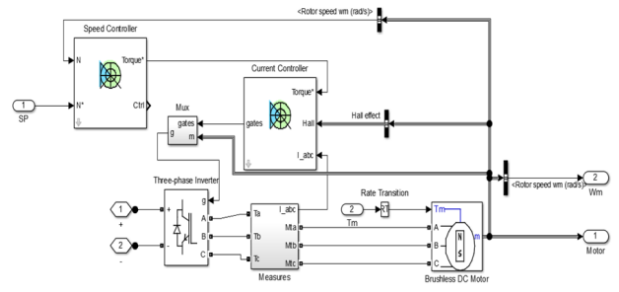
Şekil 5: FV panelin simülasyon modeli

Panelin katalog değerlerinden ışımanın değeri sabit 1000 W/m2 olarak seçilmiştir. Sıcaklık etkisi de 25 °C olarak alınmıştır. Seçilen güneş panellerinin her bir modülünde 96 adet hücre bulunmaktadır. 4 adet seri bağlı modülün bulunduğu 3 dizden meydana gelerek 3,66 kW 'lık kurulu güce sahiptir. Simülasyonda kullanılan güneş panellerinin katalog değerleri Tablo 1’de verilmektedir.

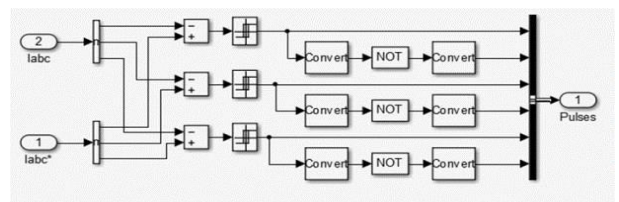
Tablo 1. FV Modülün Parametreleri

Sıra No	Parametreler	Değerler
1	Kısa devre akımı (I_{kd})	64,2 A
2	Açık devre gerilimi (V_{od})	5,96 V
3	Maksimum güç (P_{max})	305,2 W
4	Maksimum güç noktasındaki gerilim (V_{mpp})	54,7 V
5	Maksimum güç noktasındaki akım (I_{mpp})	5,58 A
6	Seri hücre sayısı (N_s)	96
7	Paralel hücre sayısı (N_p)	1

Şekil 6’da görüldüğü gibi, Fırçasız DC Motorun simülasyon modelinde Fırçasız DC motor için dışarıdan referans bir hız değeri ve pompanın yük momenti girilmektedir. Buna bağlı olarak geri besleme elemanından alınan bilgiyle konum bilgisi alınarak referans akımlar hesaplanmakta ve anahtarlar sinyalleri üretilmektedir. Motorun sürücü kısmı akım kontrolü ve hız kontrolü olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir.



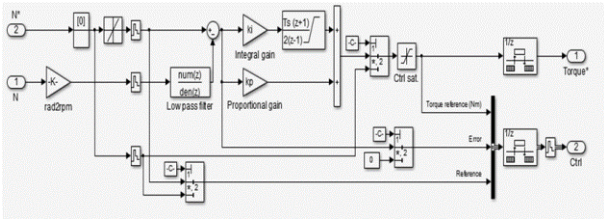
Şekil 6: Fırçasız DC motor simülasyon modeli



Şekil 7: Fırçasız DC Motor Akım kontrolü bloğu

Şekil 7’de verilen akım kontrolü bloğunda referans akımlar ile faz akımları histeresis kontrol yapısı ile karşılaştırılmaktadır. Histeresis kontrolör, gerçek akım ile referans akım arasındaki farkı hesaplayarak, gerçek akımın belirli bir aralık içinde kalmasını sağlar. Fazların enerjilendirilmesi için eviriciye gönderilecek olan darbe sinyalleri üretilir. Evirici bloğu altı adet mosfet kullanılarak oluşturulan üç faz tam köprü eviricidir. Akım kontrolöründen PWM anahtarlama için uygun darbe sinyalleri üretilir.

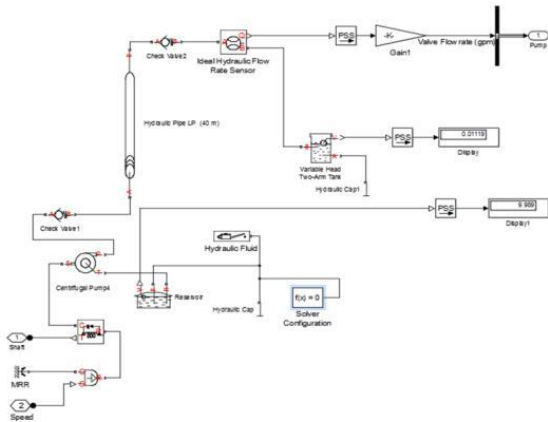
Şekil 8’de verilen hız kontrol bloğunda ise PI kontrolör yardımıyla, referans hız ile gerçek rotor hızı arasındaki hata hesaplanarak, hata sıfıra indirilmeye çalışılmıştır. Hız kontrolünden gelen moment sinyali ve hall konum sensörlerinden gelen pozisyona göre değişen bir fonksiyon kullanılarak referans akım sinyaline dönüştürülür.



Şekil 8: Fırçasız DC Motorun Hız kontrol bloğu

Şekil 9’da verilen pompa modelinde ise motor mili üzerinden bir mekanik hız bilgisi alınmakta, bu hız bilgisi moment sensörü üzerinden yük momenti olarak motora iletilmektedir. Burada su temin edilen kuyu, bir seviyesi değişen bir tank olarak düşünülmüştür. Pompa kuyudan çektiği suyu boru aracılığıyla basmaktadır. Basma yüksekliği 40 m uzunluğunda bir boru ile modellenmiştir. Boru çıkışına bir akış sensörü konularak debi ölçülmüştür.

Sistem simülasyonu sonucunda, güneş panellerinden üretilen elektrik enerjisi, dönüştürücü üzerinden fırçasız DC motoru besleyerek pompanın öngörülen miktarda yaklaşık 15,26m³/saat su pompalanması sağlanmaktadır.

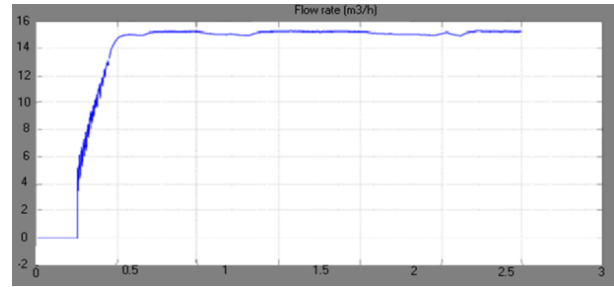


Şekil 9: Pompa simülasyon modeli

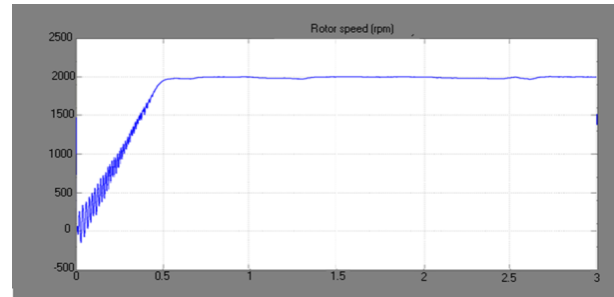
FV panellerden elde edilen güç değeri, maksimum noktada olduğu ve bu noktada kararlı çalıştığı görülmektedir. Dönüştürücünün girişi ve çıkışındaki gerilim değerleri, motorun çektiği akım ve güç değerleri motor kataloğundaki değerlerle örtüşmektedir. Simülasyonda dönüştürücünün giriş gerilimi 235V, çıkış gerilimi 365V, giriş akımı 15,58A çıkış

akımı 10A olarak elde edilmektedir. Pompa kataloğundan; motor besleme gerilimi max. 375 V, akımı max. 15A'dır. Şekil 10’da görüldüğü gibi, pompa yaklaşık 0,5 sn gibi bir sürede maksimum debiye ulaşmakta ve kararlı hale geçmektedir. Şekil 11’de gösterilen pompa devir sayısı set edilen referans hız değerinde, 2000 devir/dakika, çalışmaktadır. Şekil 12’de pompa mekanik güç değeri görülmektedir.

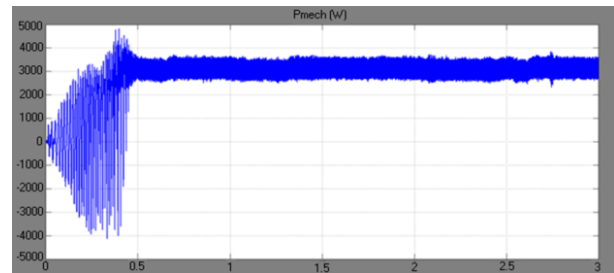
Şekil 13’te FV Panelin gerilim güç ve çevrim oranı değerleri verilmektedir. Panel verimi , pompanın verimi 'tir. MPPT algoritması yardımıyla belirlenen çevrim süresinin olarak simülasyon boyunca sabit kaldığı görülmektedir. Ayrıca, boost dönüştürücü üzerinden pompanın çektiği akımda dalgalılık gözlemlenmektedir. Mevcut dalgalılığı giderilerek pompanın daha düzgün çalışması için iyileştirmeler yapılabileceği sonucu çıkarılabilir. Şekil 14’de fırçasız DC motorun bir fazına ait stator akım, elektriksel moment ve pompa yük momenti dalga şekilleri gösterilmektedir.



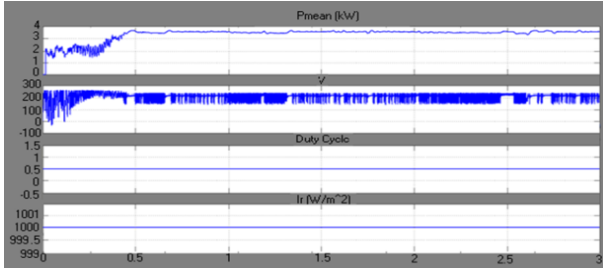
Şekil 10: Pompanın debi eğrisi



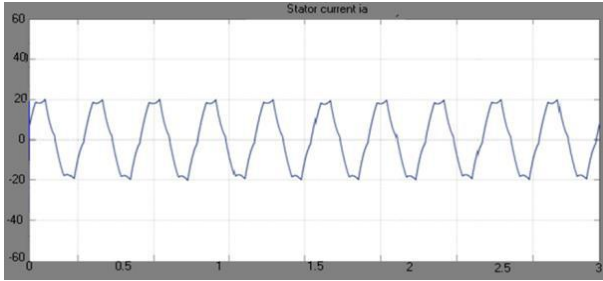
Şekil 11: Pompanın devir sayısı



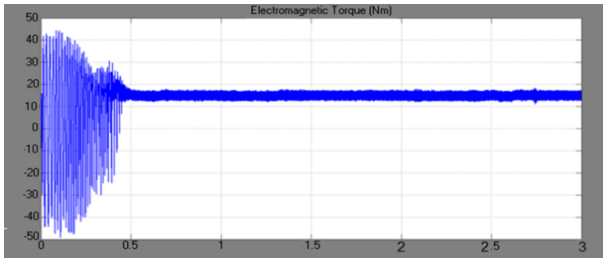
Şekil 12: Pompanın mekanik gücü



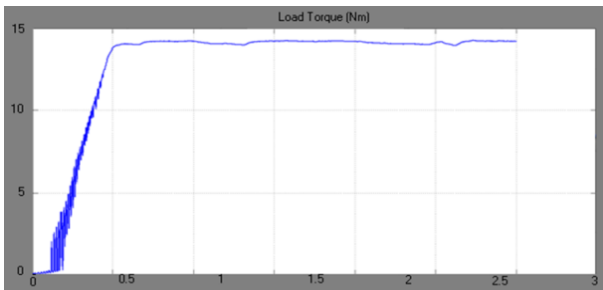
Şekil 13: FV Panelin gerilim, güç ve çevrim oranı değerleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 14: Fırçasız DC Motorun bir fazına ait (a) Stator akımı, (b) Elektriksel moment, (c) Pompanın yük momentini

5. Sonuçlar

FV su pompalama sistemlerinin, kullanım suyu, tarımsal ya da sulama amaçlı birçok uygulama alanında ekonomik ve uzun ömürlü olduğu açıkça gözlenmektedir. Özellikle, akaryakıt fiyatlarının dünya standartlarından çok fazla olduğu gerçeğinden yola çıkarak, tarımsal sulama için oldukça yüksek bütçeler ayrılmaktadır. Bu durum akaryakıt sektöründe dışa bağımlı olan ülkemiz için hem ekonomik açıdan hem de sürdürülebilir çevre için olumsuz bir durum yaratmaktadır. Sürdürülebilir çevre açısından son derece önemli olan yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve yerinde kullanımı,

yönetimler tarafından daha fazla desteklenmesi ile hızla yaygınlaşması beklenmektedir. Bu yeni teknolojilerin hem daha düşük maliyetlere kurulabilmesi hem de tüm toplum tabanına yaygınlaşabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarının özellikle de FV teknolojilerin kullanılacağı her uygulama alanına destek verilmesi büyük bir önem arz etmektedir.

Bu çalışmada hedeflenen model ile daha önce arz edilen sorunların giderilmesi, verimli, ekonomik ve sürdürülebilir bir sistemin mevcut uygulamalarda fosil yakıtlı geleneksel sistemlerin yerini alabileceğine dair uygulama modeli oluşturuldu. Kurulan FV su pompalama sistemi modeli ile gerçek uygulamalardan örnek alınarak simülasyon gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları ile piyasada var olan ürünlerin performans değerlerinin örtüştüğü görülmektedir. Bununla birlikte pompa motorunun akımına ait dalgalı yapıdaki sinyal formunun düzeltilmesi için güç dönüştürücüsü ve motor sürücüsü üzerinde yapılacak iyileştirmeler, sistemin daha optimum bir performans sağlaması için geliştirilebilir özellikleri olarak değerlendirildi. Sistemin GSM ve/veya internet üzerinden kontrol edilebilmesi için gerekli donanımların sisteme eklenmesi, uzaktan kontrol ve gözlem imkânı tanınması sayesinde sistemin daha cazip hale getirilebileceğine kanaat getirilmektedir.

6. Kaynaklar

- [1] Lajnef T., Abid S., Ammous A., "Design and simulation of water pumping system", International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 – 8958, Volume-2, Issue-4, April 2013 161.
- [2] Eker B., Solar powered water pumping systems, Trakia Journal of Sciences, Vol. 3, No. 7, pp 7-11, 2005 ISSN 1312-1723.
- [3] Rishel J.B., Water Pumps And Pumping Systems, 1st edition, McGraw-Hill, USA, 2002.
- [4] Messenger R., Ventre J., "Photovoltaic Systems Engineering", 2nd edition, CRC Press, USA, 2004.
- [5] Hammadi S., Hidouri N., Sbata L., FOC drive scheme for a photovoltaic water pmsm-pumping system, International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'13) Proceedings Engineering & Technology - Vol.2, pp. 27-32, 2013.
- [6] Kulaksız A., Maksimum Güç Noktası İzleyicili ve UVM inverterli Fotovoltaik Sistemin Yapay Sinir Ağları Tabanlı Kontrolü, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 212-386,2012.
- [7] Oi A. Design and simulation of photovoltaic water pumping system, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, September 2005.
- [8] ATLAM Ö., KUYUMCU F.E., Fotovoltaik pompa sisteminde maksimum güç noktasının izlenmesi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, 18-21 Eylül 2003, İstanbul, Türkiye.
- [9] Hamidat A. ve Benyoucef B., Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems, Renewable Energy, 2008,33, 933–942.

Fotovoltaik Güç Santrallerinin Elektrik Şebekesine Harmonik Etkisinin Modellenmesi ve Analizi

Modeling and Analysis of Harmonic Effect of Photovoltaic Power Plants on the Electricity Network

Halil İbrahim AYDINÖZ¹ 

¹Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye
halil.ibrahim.aydinoz@gmail.com

Öz

Şebekeye entegre edilmiş fotovoltaik (fv) elektrik güç sistemindeki varlığı her geçen gün artmaktadır. Bu artışla beraber fv güç santrallerinin şebekeye etkisi üzerine incelemenin önemi artmaktadır. Bu incelemeler neticesinde fv sistemlerden dolayı oluşan çeşitli sorunların azaltılması, başarımlerinin yapılması ve sisteme verdiği güç kalitesindeki değerleri iyileştirmeyi hedeflemektedir. Bu çalışmada harmonik sorunu incelenmiştir. Elektrik güç sistemlerinin her aşamasında harmonik seviyesinin minimum olacak şekilde sistemlerin yer alması enerji verimliliğini yükseltecek ve bununla beraber ekonomik olarak pozitif yönlü iyileşmelere sebep olacaktır. Bu analizde elektrik güç şebekesine entegre edilmiş fv güç sisteminin şebekede senkron olması süreci ve fv sistemde eviriciden kaynaklı harmonikleri incelemek için Matlab/Simulink programı ile şebeke modellenmesi yapılmıştır. Yapılan modelleme işleminde harmonikleri uygun standartlara getirmek için LCL (endüktans-kapasitör-endüktans) pasif filtresi modellenip kullanılmıştır. Yapılan çalışmada şebekeye entegre edilmiş fv sistemin daha etkin çalışması ve şebekeye verdiği harmonikleri minimum seviyeye indirmek için uygun filtre önerileri geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Enterkonnekte Şebeke, Yenilenebilir Enerji, Güneş Enerjisi, Harmonikler, Güç Kalitesi, Filtre Sistemleri

Abstract

Its presence in the photovoltaic electric power system integrated into the grid increases every passing day. With this increase, it pushes the investigation on the effect of photovoltaic power plants to the grid. As a result of these examinations, it aims to reduce various problems caused by photovoltaic systems, to perform performance analyzes and to improve the power quality values given to the system. In this study, harmonic problem is examined. Including systems with minimum harmonic level at each stage of the electrical power systems will increase energy efficiency and will result in economically positive improvements. In this analysis, network modeling was performed with Matlab / Simulink program to examine the synchronization process of the photovoltaic power system integrated in the electrical power network and the harmonics originating from the inverter in the photovoltaic system. LCL (inductance-capacitor-inductance) passive filter has been modeled and used to bring harmonics to appropriate standards in the modeling process.

Keywords: Interconnected Network, Renewable Energy, Solar Energy, Harmonics, Power Quality, Filter System

1. Giriş

Güç kalitesi terimi, bir elektrik bileşenin amacına uygun kullanımında belirlenen ömründe herhangi bir kayba uğramadan aktif kalabilmesi için elektrik kıstasları olarak tanımlanabilir [1].

Güç kalitesi kavramı günümüzde bir çok araştırmaya konu olmuştur. Araştırmalar özellikle kaliteyi etkileyen unsurlar üzerine odaklanmıştır. Güç kalitesinde çözümler üretmeden önce olayın kaynağını ve nedenlerini bilmek büyük önem teşkil etmektedir. Güç kalitesi kavramında ilk olarak akım ve gerilim dalga formunun ideal sinüs olmaması olarak gösterilebilir. Bu dalga yapısı elektrik güç sistemlerinde gürültülere ve elektriksel kirliliğe sebep olmaktadır. Dalga yapısının istenen sinüs biçimde olamaması en büyük sebebi orta gerilim şebekesindeki non-liner yüklerin varlığıdır. Güç kalitesi sorunlarında ilk olarak gerilim yükselmesi, kesinti ve çökmesi, doğru akım (DA) yapının varlığı, transiyet durumlar ve harmonikler olarak sıralanabilir. Bu güç kalitesizlikleri hassas yüklerin servis harici olmasına trafo ve motorların enerji kaybına sebebiyet vermektedir. Bunların neticesinde elektrik güç sistemini olumsuz etkilemektedir. Bundan kaynaklı olarak bu tür bozukluklara sebeplerinin bilinmesi gereken koruma önlemlerin alınması büyük önem teşkil etmektedir [2].

Dünya'da çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretilmektedir. Bu kaynaklar; rüzgar, güneş, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle olmak üzere söylenebilir. Bu enerji kaynağı türleri arasında en hızlı gelişme gösteren enerji türü güneş enerji kaynaklarından fv güç sistemleridir. Günümüzde ticari kaynaklı veya elektrik gücünün yetmediği yerlerde şebekeye entegreli fv güç sistemlerinin kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Fv güç sistemleri şebeke bağlantılı (on-grid) ve şebeke bağlantısız (off-grid) olacak şekilde 2 yapıya ayrılmaktadır. Şebeke bağlantısız sistemler, şebeke bağlantısının olmadığı veya uzak yerleşim yerlerinde evsel veya ticari amaçlı kullanılmaktadır. Şebeke entegreli sistemler ise şebekeye beraber paralel çalışmada şebekeye direkt enerji aktarmaktadır. Bu tip güç sistemleri bir evirici yardımı ile doğru akım alternatif akıma dönüştürülür [16-17].

Şebeke bağlantılı güç sistemleri yapılarında şebekeye bağlanması için öncelikle senkronizasyonu sağlaması gerekmektedir. Senkronizasyonun gerçekleşmediği zamanda büyük sirkülasyon akımları oluşarak eviriciye zarar verebilir. Sistemin şebekeye senkron olabilmesi için önemle dikkat edilmesi gerek senkron olma anıdır. Senkron olma durumunda şebekeye paralel olacak fv sistemin şebeke fazları üst üste gelmesiyle tamamen gerçekleşir. Şebeke entegreli fv sistemin senkronluğu sağlaması yalnızca yeterli değildir. Bununla beraber fv sistemdeki evirici kaynaklı harmoniklerin azaltılması elzem olmaktadır. Elektrik bileşenlerinde akım ve gerilimin harmonik yönünden standartlar içerisinde olmamasında sistem verimli olmaz. Eğer fv sistemler uygun filtre yapıları eklenip harmonikler azaltılmazsa çeşitli yönlerde zararlar oluşur [3].

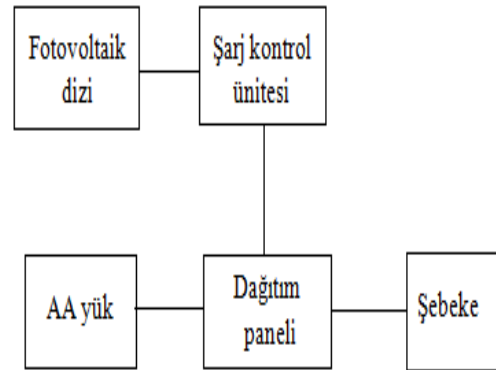
Bu çalışmada şebeke bağlantılı FV güç sistemlerinin şebekeye entegrasyonu 2. Bölümde incelenmiştir. Bu kısımda şebekeye bağlanma limitleri ve gerilim seviyeleri anlatılmıştır. 3. Bölümde güç kalitesi ve harmonikler ele alınmış olup bu parametrenin uluslararası limit değerleri bu kısımda belirtilmiştir. 4. Bölümde ise yapılan benzetim çalışması gösterilmiştir elde edilen grafikler burada verilmiştir. 5. Bölümde önceki bölümde elde edilen sonuçlar tartışılıp incelenmiştir. Son olarak sonuç kısmında çalışmanın

çıktılarının etkileri ve literatüre katkıları belirtilmiştir. Bu belirlenen etkilerin fv güç santrallerine ilerde ele alınacak önlemler ve güç sistemlerinde verimli çalışmanın önemleri ortaya konulmuştur.

2. Şebeke Bağlantılı FV Güç Sistemleri

Şebeke bağlantılı fv güç sistemleri güneş panelleri, akü grupları ve solar kontrol sistemleriyle beraber fv güç sistemini oluşturmaktadır. Şebekeye senkron olan fv güç sistemlerine evirici ekipmanı ilave edilerek akü grubunun çıkışındaki doğru akım istenen genlikteki ve frekans değerleri alternatif akıma dönüştürülür. Fv güç sistemleri önceki belirtilen bileşenlerden fazla olarak sigorta, topraklama elemanları, aşırı akım koruma röleleri ve sistem daha optimum çalışabilmesi için maksimum güç noktası (MNG) cihazları özellikle sistemde olması gerekir [4].

Dünya çapında bahsedilen fv güç sistemleri 2000'li yılların başında şebeke entegreli fv güç sistemleri yaygınlaşmıştır. FV güç santrallerinde elektrik şebekesine bağlantı noktasında kurulu gücüne göre farklılık göstermektedir. Kurulu güç 50 MW'a kadar olan sistemde 34,5 kV dağıtım şebekesine 50 MW üzerindeki güçler ise 154 kV veya 400 kV gerilim seviyende iletim hattı şebekesine bağlanmaktadır. Şekil 1'de fv güç santrali sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1. Şebeke bağlantılı fv sistem yapısı [5]

Bağlanacak şebekedeki gerilim seviyesi belirlendikten sonra sistem direkt olarak şebekeye entegre olabilmesi için bazı senkron olma şartları gerekmektedir. Bu şartlar;

- FV sistem terminal voltajı ile şebekenin voltajının genlikleri uygun olmalıdır. Şebeke gerilimi nominal gerilimin $\pm 10\%$ limitleri içinde olmalıdır.
- FV sistem çalışma frekansı ile şebeke frekansı aynı olmalıdır.
- FV sistem ile şebeke sistemi faz sıralamaları aynı olmalıdır.
- FV güç sistemi şebekeye vereceği güç minimum kurulu üretim sınırlarının altında olmalıdır.

Bu şartlar yerine getirildiğinde şebekeye entegre sağlanabilir. Belirtilen şartlardan bir veya bir kaçının olmaması durumunda

entegrasyon sağlanamaz ve bunun sonucu olarak daevirici sistemleri zarar görür.

2.1. Şebekeye Bağlı FV Sistemlerin Avantajları ve Dezavantajları

Fv güç sistemlerinin elektrik şebekesine bağlı olmasının pozitif ve negatif yönleri bulunmaktadır. Belirlenen lokasyona tesis edilecek santralin fizibil olabilmesi için aşağıda belirtilen durumlar bakıp karar verilmelidir.

2.1.1. Şebekeye Bağlı Sistemlerin Avantajları;

- Elektrik enerjisi ve şebeke sistemine direkt verildiği için batarya gruplarına ihtiyaç yoktur.
- Elektrik güç sistemindeki iletimden kaynaklı kayıplar azaltılmış olur.
- Kullanımında fazla kalan enerji bağlı olduğu şebekeye verilir.
- Farklı güç seviyelerinde kurulum uygunluğa vardır.
- Herhangi bir arıza yaşandığında fv sistemi yeterince beslenmediğinde elektrik şebeke sistemi otomatik olarak devreye girer[6].

2.1.2. Şebeke Bağlı Sisteminin Dezavantajları

- Fv güç sisteminin yeterli olmadığı yerde elektrik güç sistemindeki bir kesinti durumunda sistem enerjisiz kalacaktır.
- Güç faktörü, harmonik ve gerilim yükselmesi ve düşmesi gibi güç kalitesi parametrelerinde fv güç sistemleri daha hassas tepkiler oluşturmaktadır.
- Fv güç sisteminin hava durumuna bağlı olduğunda kötü hava durumu koşullarında sisteme güç vermeyeceğinden tüketiciler ya enerjisiz kalacak veya ekstra jeneratör ihtiyaç duyulacaktır [6].

3. Güç Kalitesi

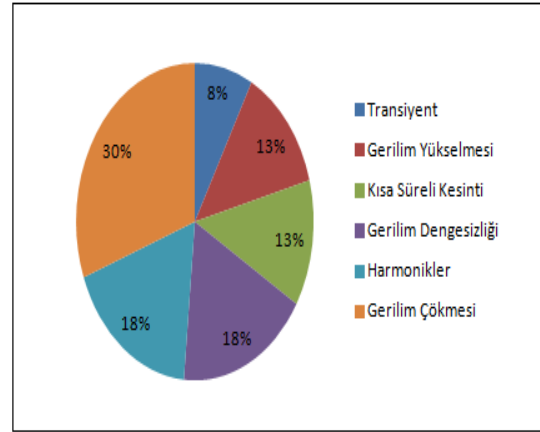
Güç kalitesi için yapılan çeşitli tanımlar içerisinde kamusal elektrik yapılarının güç kalitesi tanımı güvenilirlik olarak tanımlanmaktadır. Elektrik cihazlarının üreticileri ise güç kaynağı karakteristiği cihazların doğru ve sorunsuz görev yapmasının yeterli olmasına bakarak güç kalitesi tanımlanabilir. Bunun yanında güç kalitesi akım, gerilim ve frekans değerlerinin açıkça gözlemlenen sapmalarının elektrik cihazların çalışma hataları ile neticelenmesi şeklinde güç kalitesi problemi için kapsayıcı bir tanım yapılabilir.

Elektrik enerjisinde kalite, elektrik güç şebekesinde belirlenen herhangi bir noktada voltajın genliği ve frekansın anma değerlerinde kalması ve gerilimin dalga şeklinin düzgün sinüzoidal olarak bulunması demektir. Kısaca güç kalitesi sabit şebeke frekansı ve düzgün sinüzoidal nokta gerilimidir. Bu tanımdaki yapıyı elde edebilmek için elektrik güç şebekesindeki önlem alacak teçhizatlara ihtiyaç duyulur. Buna karşın bazı ekipmanlar ve buna neden olan olaylarda kaynaklı optimum sinüzoidal olmayan dalga şekli meydana gelmektedir [7].

3.1. Güç kalitesinin Sınıflandırılması

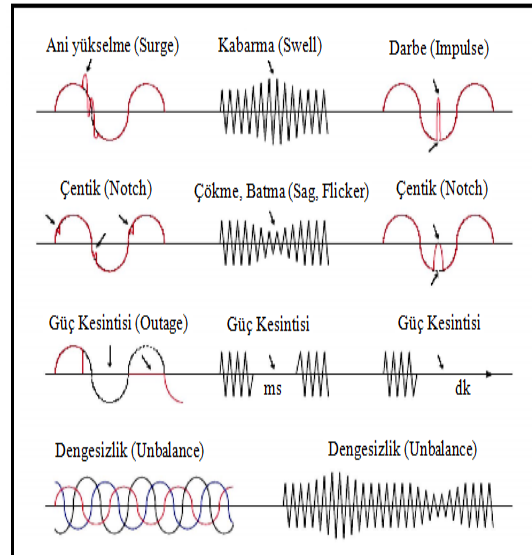
Güç kalitesi istenilen durumda olmaması şebekede belirlenen bir noktada voltajın genliği ve frekans anlık değerlerin

koruyamaması voltaj dalga şeklinin sinüs şeklinden uzaklaşması, kesintiler, gerilim darbeleri, gerilimin doğru doğru bileşen bulundurmaması vs. durumlarda elektrik güç sistemlerinde bozulmalar görülebilir. Güç kalitesinin istenilen standartlarda olmaması neticesinde elektrik güç sisteminde çeşitli sıkıntılar meydana gelecektir. Belirtilen problemlerin oluşma yüzdeleri Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektrik enerji kalitesi problemleri [8]

Şekil 3’de ise güç kalitesi problemleri fiziksel açıklamaları gösterilmiştir. Güç kalitesinde meydana gelecek sıkıntılar, enerji arz ve talebinde sağlayamaması, ekipman arızalarına ve ekonomik kayıplarına neden olarak hem insani hem de endüstriyel faaliyetleri olumsuz etkiler.



Şekil 3. Elektrik enerji kalitesi problemlerinin fiziksel açıklaması [9]

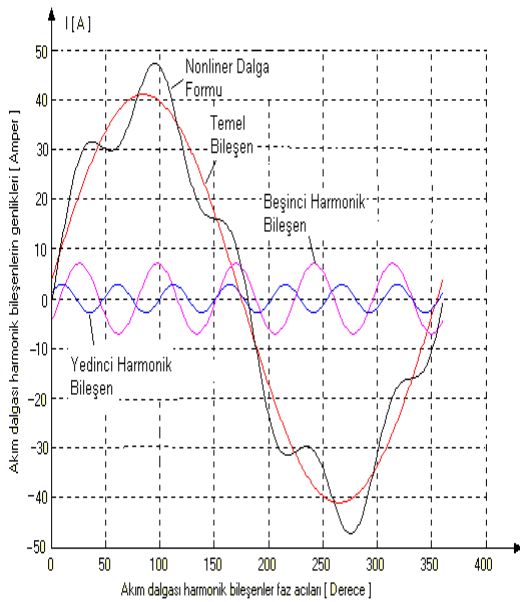
3.2. Harmonikler

Alternatif akım (AA) elektrik güç sistemleri voltaj ve akım dalga şekli optimum sinüzoidal olması istenir. Non-linear yüklerin sebep olduğu akım ve voltajın ideal sinüs biçiminde değildir. Bundan dolayı lineer olmayan elemanların veya sinüs biçimli olmayan kaynakların var olması veya bunların her

ikisinde sistemde olması harmoniklere sebebiyet vermektedir. Zamanla değişen, sinüs olmayan akım ve gerilim harmonik bulunduran akım ve gerilimler olarak belirlenirken akım ve gerilimin dalga biçimi sinüs olmayan olmasına yüksek frekans bileşen harmonik olarak adlandırılır.

Harmonik kavramı temel ifadeyle, akım ve gerilim dalga şekillerinin sinüzoidal şekilden sapması sonucu yeni dalga formunun oluşması olarak tanımlanabilir.

Harmonik tanımı, Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği'nde; "Doğrusal olmayan yükler veya gerilim dalga şekli ideal olmayan jeneratörlerden dolayı bozulmaya uğramış bir alternatif akım veya gerilimde, ana bileşen frekansının tam katları frekanslarda oluşan sinüzoidal bileşenlerin her biri" şeklinde tanımlanmıştır [15]. Elektrik güç sistemlerindeki harmonikler, elektrik yapılarındaki ekipmanlarda ortaya çıkıp iletim ve dağıtım hattı üzerinden yayıldıkları için sadece ortaya çıktığı yerlerde değil diğer tesisleri de etkiler. Bundan kaynaklı olarak harmonikler elektrik güç sisteminde güç kalitesinin düşmesine, ekipmanların arızalanmasına, koruma cihazlarının anlamsız yer çalışmasına ve sistemde kayıplara sebep olmaktadır. Harmonikler temel dalga bileşenin haricindeki sinüs dalgalarına harmonik bileşen olarak adlandırılmaktadır. Güç sisteminde sinüs dalganın simetrisinden dolayı tekli harmonikler var olur. Bunlar 3., 5., 7., ... gibi tek harmonik bileşeni bulunur. Harmonik ve lineer olmayan dalga biçimi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Harmonik bileşenler ve nonlineer dalga formu [10]

1822 yılında Fransız fizikçi ve matematikçi Joseph Fourier sinüzoidal olmayan periyodik dalga şekillerinin, temel bileşen içeren frekansının tam katı frekanslarda başka sinüzoidal dalgaların toplamından oluştuğunu göstermiştir. Bu ifade kullanılarak sinüzoidal olmayan dalga şekilleri bileşenlerine ayrılabilir. Bir dalga şekline bu teoremin uygulanabilmesi için Dirichlet koşullarının sağlanmasıdır. Bu koşullar bir periyot içinde sonlu sayıda süreksizlik bulunması, sonlu sayıda maksimum ve minimum noktalarının bulunması ve ortalamasının sonlu değer almasıdır.

Sinüzoidal olmayan dalga şekillerini matematiksel olarak ifade etmek için fourier serileri kullanılır.

Elektrik güç kalitesi IEEE-519 standartlarına göre limitler belirlenmiştir. Toplam harmonik distorsiyon gerilim ve akım sınır değerleri ise sırayla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Elektrik güç kalitesi IEEE-519 standartlarına göre limitler belirlenmiştir. Toplam harmonik distorsiyon gerilim ve akım sınır değerleri ise sırayla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1: IEEE-519 THD gerilim sınır limitleri [11]

Bara gerilimi	Max. HarmonikKomponent (%)	Tek Max. THDV (%)
69 kV altı	3	5.0
69 kV-161 kV	1.5	2.5
161 kV üstü	1.0	1.5

Çizelge 2. IEEE-519 THD akım sınır limitleri [11]

SCR=Is/I _L	h<11	11-16	17-22	23-24	35<h	THD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	7.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Harmonik dalga şekillerinin direkt ve direkt olmayan birden fazla olumsuz etkisi vardır. Bu olumsuz etkilerin başında olduğu sistemde ekstra güç kayıplarına sebep olmakta ve enerji verimliliğine negatif yönlü etkilemektedir. Harmonikler bu süreçte güç sisteminde ekstra kayıplara sebep olarak sistemin verimini önemli şekilde düşürmektedir. Bununla beraber harmonikler iletkenler, transformatörler, generatörler, motorlar ve dielektrik malzemeler üzerinde direkt olarak kayıplara yol açmasının yanı sıra bir çok yönden ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Fabrikalarda yaşanan elektronik ekipman arızaları neticesinde üretim kayıpları, rezonans neticesinde devre ekipmanları zarar görmesi, sistemin devre dışı kalması vb. bir çok zararlı etki örnek gösterilir.

3.3. Harmoniklerin Filtrelenmesi

Harmonik sebebiyle ortaya çıkacak zararlı etkilerin engellenmesi yalnızca sistemin ilk tasarımında alınacak önlemler ile mümkün olmamaktadır.

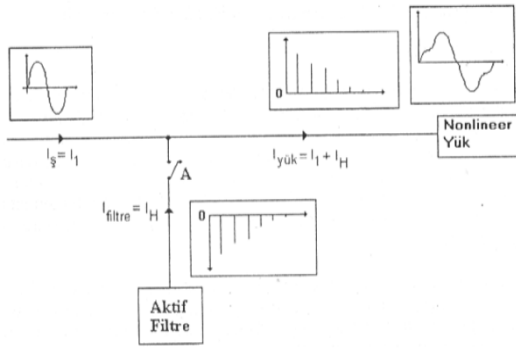
Harmonik içeren akımların güç sistemine geçmesini engelleme amacıyla ek ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ekipmanlar harmonik filtresi adı verilmektedir. Harmonik filtrelerinin görevi, belirlenen bir yada birden fazla frekanstaki akım ve voltajın başka bir deyişle harmonik etkisini azaltmaktır. Harmonik filtrelerin bir başka görevi AA sisteme giren harmonik dalgaların bileşenlerini engellemek olarak özetlenebilir. Kullanım şekliyle filtreler ikiye ayrılır;

- Filtrelerin kontrollü akım ya da gerilim kaynağına sahip olduğu "aktif" filtreler
- Filtre bileşenlerinin direnç endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşturulduğu "pasif" filtreler [12-13].

3.3.1. Aktif Filtreler

Harmoniklerin pasifize etmek için geliştirilmiş ekipmanlardır. Bu filtreler ileri güç elektroniği prensiplerine dayanır ve pasif filtrelerden çok daha ekonomik olarak yüksektir. Aktif

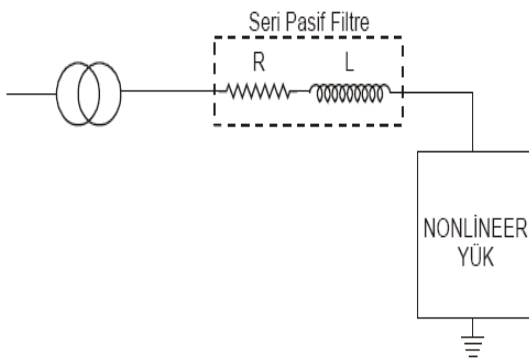
harmonik filtreleri birden fazla harmonik frekansı için ayarlanabilir ve güç kalitesini etkileyen sebepleri ortadan kaldıracaktır. Aktif filtrenin çalışma şekli, lineer olmayan yükün çekeceği temel bileşen dışındaki akımı karşılamaktır. Bu şekilde aktif filtreler yük tarafından çekilen harmonikleri analiz ederek harmonik bileşen içeren dalgaları uygun bir fazda yüke uygularlar. Şekil 5'te aktif filtre ile harmonikleri engellediği gösterilmiştir [12-13].



Şekil 5. Aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi

3.3.2. Pasif Filtreler

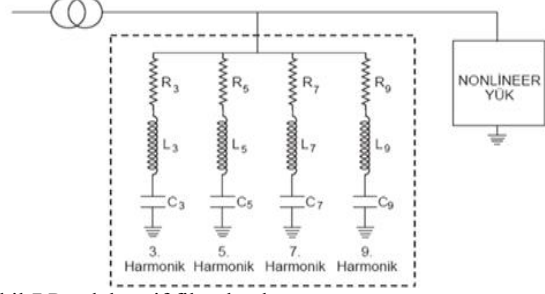
Pasif filtreler şekil olarak, kaynak ile alıcı arasına yerleştirilen ve temel frekans dışındaki bileşenleri ekarte eden seri bağlı kondansatör ve endüktans bileşenleridir. Bazı durumlarda direnç de ilave edilebilir. Pasif filtrelerde istenilmeyen harmonik frekansı rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Arı harmonik bileşenler için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre gerekli olmaktadır. Seri filtreler, harmonik kaynağıyla güç sistemine arasına seri bir şekilde bağlanır ve harmonik geçişine yüksek empedans gösterirler. Bu yüzden seri filtrelerin ayarlanmış olduğu frekansta yüksek empedans vardır. Paralel filtreler harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Bu tip filtrelerde, düşük bir paralel empedans yoluyla istenmeyen harmonik bileşenlerini filtre üzerinden akmasını sağlanmaktadır. Pasif filtreler, seri pasif filtreler ve paralel pasif filtreler olacak şekilde ikiye ayrılır. [12-13]. Seri pasif filtreler uygulamada; AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DA inverterler önlerinde kullanılır. Seri pasif filtre için bir örnek Şekil 6'da verilmiştir [14].



Şekil 6. Seri pasif filtre bağlantısı

Paralel pasif filtreler, harmonik kaynağı ile şebeke arasına kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı durumlarda direnç (R) elemanlarının paralel olarak bağlanmasından oluşan

devrelerdir. Paralel pasif filtre için bir örnek Şekil 7'te verilmiştir.

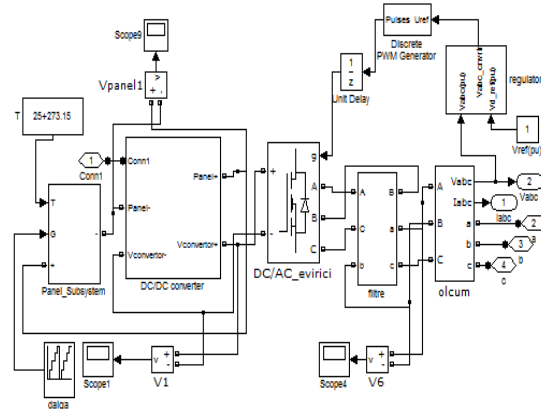


Şekil 7. Paralel pasif filtre bağlantısı

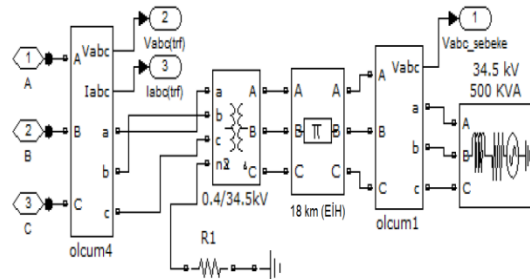
4. Benzetim Çalışmaları

Yapılan bu çalışmada fv güç sisteminin elektrik güç sistemiyle senkron olabilmesi ve fv güç sisteminin evirici kaynaklı harmonik etkisini görebilmek için MATLAB/Simulink'de fv güç sisteminin benzetimi yapılmıştır.

Benzetme yapılan fvsistem ve şebeke sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekillerde ölçüm noktaları da gösterilmiştir.



Şekil 8. Simülasyonda kullanılan fv sistemin blok diyagramı.

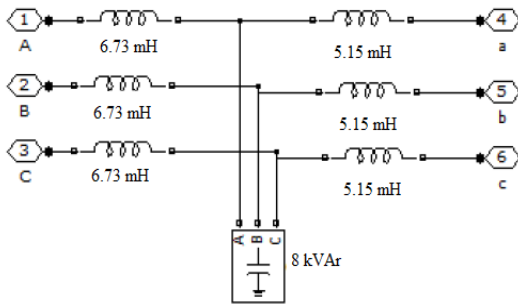


Şekil 9 Simülasyonda kullanılan şebekenin blok diyagramı.

Şebeke entegreli fv güç sistemi MATLAB/Simulink'te seri ve paralel bağlantı ile 11 kW pik gücünde fv bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistem DA/DA boost çevirici bağlantısı yapılarak DA gerilim yükseltilmiştir. Daha sonra yükseltilen bu DA gerilim alternatif akıma dönüştürmek için DA/AA bir eviriciye bağlanmıştır.

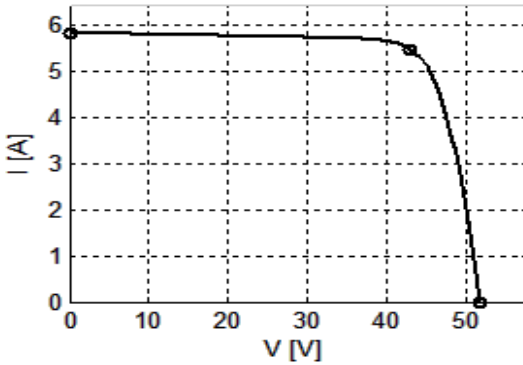
Fv güç sisteminde meydana gelen harmonikleri azaltmak için ise evirici çıkışına filtre sistemi entegre edilmiştir. Filtre

bağlantısının çıkışını devamına şebeke ve yük bağlantıları yapılmıştır. Filtre türü olarak LCL filtre tercih edilmiştir. Simülasyonda kullanılan filtrenin iç yapısı ise Şekil 10'da gösterildiği gibi olup LCL filtre modelinde sırasıyla 6.73mH ve 5.15mH değerine sahip indüktörler ile 8 kVar'lık kondansatör kullanılmıştır. Ayrıca filtrenin 400V ve 50Hz'lik sistem parametrelerine göre ayarlanmıştır. Belirtilen parametrelerle tasarlanan LCL filtre ile sistemdeki harmonikler büyük oranda azaltılmış olup sistemin daha kaliteli bir şekilde çalışması sağlanmıştır.

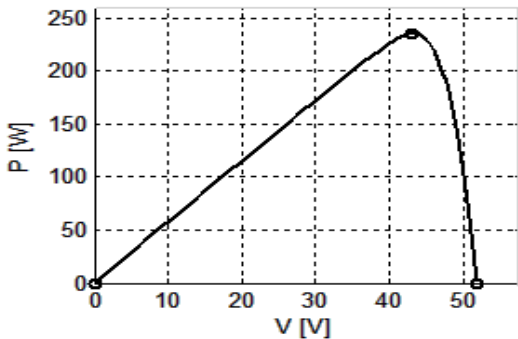


Şekil 10. Simülasyonda kullanılan filtre bloğunun iç yapısı.

Simülasyonda kullanılan RC tipi yük, 35 kW aktif, 920 Var kapasitif reaktif güce, 400V genliğe ve 50Hz frekansa sahip olup simülasyonda yük üzerindeki gerilim, harmonik bozulmaları gibi ölçümler yapılmıştır. Şekil 11'de fv panele ait Akım (I)–Gerilim (V) grafiği gösterilmiş olup Şekil 11'de ise fv panele ait Güç (P)–Gerilim(V) grafiği gösterilmiştir.



Şekil 11. Fv panelin I-V grafiği.



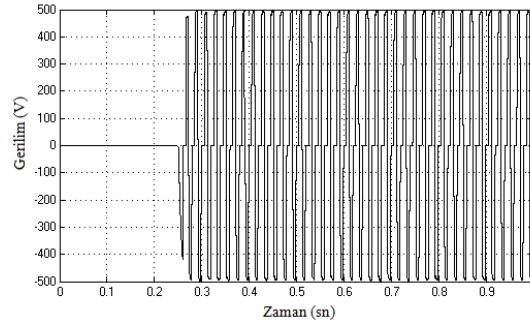
Şekil 12. Fv panelin P-V grafiği

Şebeke bağlantılı fv sistemin modelleme aşamaları ve simülasyonu yukarıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Fv

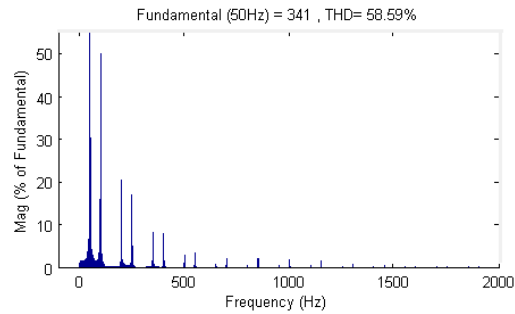
sistemin ve şebekenin frekans, faz açısı, gerilim, güç ve harmonik ölçümleri yapılmıştır. Simülasyon sonunda ortaya çıkan grafikler ve ölçüm değerleri gösterilmiş olup elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

Şebekeye bağlı sistemde frekans, faz ve gerilim değerleri 0.25'inci saniyeden itibaren sabitlendiği için sistemin senkronizasyonu 0.25'inci saniyeden itibaren sağlanmıştır. Bu sebeple ilk başta açık anahtar şeklinde olan breaker, programlanarak 0.25'inci saniyeden itibaren kapanmıştır. Şekil 13'de filtre öncesi DA/AA konverter çıkışında gözükten gerilim gösterilmekte olup breaker 0.25'inci saniyede kapandığı için o ana kadar gerilim 0 olup 0.25'inci saniyeden itibaren bol harmonikli bir dalga elde edilmiştir.

Şekil 14'da ise Şekil 13'de verilen dalganın harmonik değeri gösterilmekte olup bu değer %58.59 (50 cycle için) olarak ölçülmüştür. Bu değer yüksek oranda bir harmonik teşkil ettiği için bir filtre tasarlanarak (L-C-L filtre) harmonik oranı azaltılmıştır. Şekil 13'de filtre öncesi gözükten gerilim ve Şekil 14'de filtre öncesi gözükten gerilimin harmonik değeri sırasıyla gösterilmiştir.

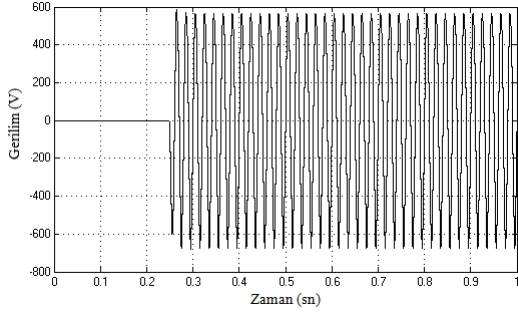


Şekil 13. Filtre öncesi DA/AA konverter çıkışında gözükten gerilim dalgası.



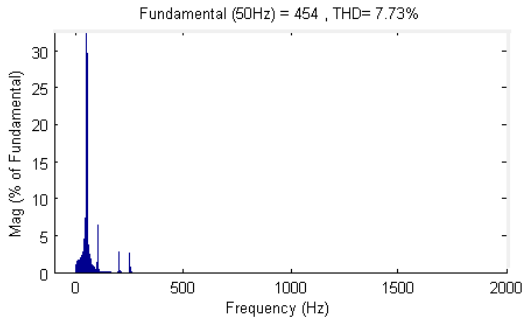
Şekil 14. Filtre öncesi gözükten gerilim dalgasının harmonik değeri

Şekil 15'de filtre sonrası harmoniklerin azaltılması sonucu oluşan gerilim dalgası verilmiş olup breaker 0.25'inci saniyeden itibaren kapandığı için dalga 0.25'inci saniyeden itibaren maksimum değeri 566.08V olacak şekilde sabitlenmiştir. Maksimum gerilim değeri, etkin gerilim değerinin $\sqrt{2}$ katı olduğu için filtre sonrası oluşan gerilim dalgasının etkin değeri 566.08 $\sqrt{2}$ den 400.2V olarak bulunur.



Şekil 15. Filtre sonrası harmoniklerin azaltılması sonucu oluşan gerilim dalgası.

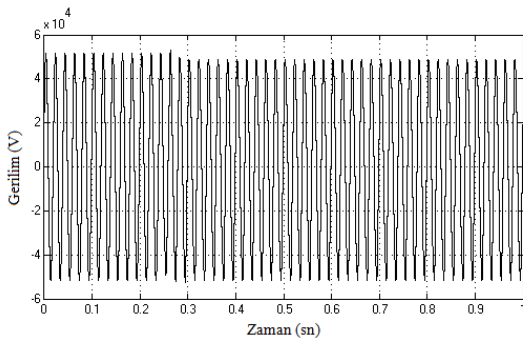
Şekil 16'da ise filtre sonrası oluşan gerilim dalgasının harmonik değeri verilmiş olup bu değer %4.58 olarak (50 çevrim için) ölçülmüştür.



Şekil

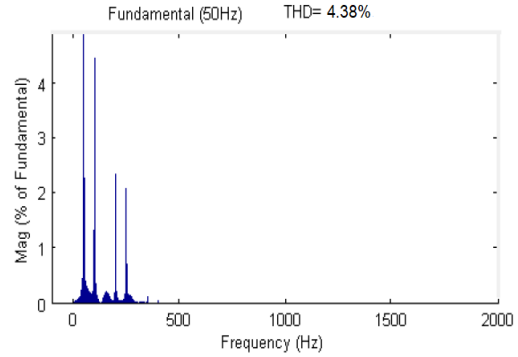
16. Filtre sonrası oluşan gerilim dalgasının harmonik değeri.

Şekil 17'de trafo çıkışındaki gerilim dalgası verilmekte olup yine senkronizasyon 0.25'inci saniyeden itibaren gerçekleştiği için gerilim dalgası 0.25'inci saniyeden itibaren maksimum değeri 48.84kV olacak şekilde sabitlenmiştir. Trafo çıkışındaki gerilim dalgasının etkin değeri ise $48.84/\sqrt{2}$ den 34.5kV olarak bulunur. Burada da 0.25'inci saniyeye kadar sistemde yük olmadığı için 0.25'inci saniyeye kadar trafo çıkışında hafif bir gerilim artışı olmuştur.



Şekil 17. Trafo çıkış gerilimi

18 km'lik pi tipi enerji hattı başındaki gerilim dalgasında meydana gelen harmonik oranı verilmiş olup bu değer %4,38'dir. Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Hat başındaki gerilim dalgasının harmonik değeri

5. Tartışma

Şebeke entegreli fv güç sistemlerinin bağlanması ve güç kalitesi parametreleri standart sınırlar içinde kılması önemli bir konudur. Fv güç sistemleri şebekeyle entegreli problemsiz çalışabilmesi için harmonik bozulma değerlerinin standartlara uygun olması, gerilim değişimlerinin sınırlar çerçevesinde olması ve anahtarlama ve anlık devreye girmede şebekede meydana gelecek sıkıntıların minimum seviyeye indirilmesi gerekmektedir. Bu etkilerinin tümünün analizi yapıldıktan sonra şebekeye entegrasyon yapılmalıdır.

Fv sistemler şebekeyle paralel çalışırken harmonikler ile güç faktörü belirli sınır değerinin altında olmalı ve şebekeye doğru akım vermemelidir.

Sistemde oluşan problemlerin giderilmemesi veya azaltılmaması durumunda sistem veriminin azalması, sistemde kullanılan elemanların bozulması, güç kalitesi sorunlarının yaşanması, maliyetin artması ve enerji kayıpları kaçınılmazdır. Şebekeye bağlı fv sistemler, hangi güçte olursa olsun şebekedeki arızalarda veya enerji kesilmelerinde şebekeden bağlantılarını ayırarak sistemleri bulundurmaları gerekir. Aksi takdirde herhangi bir arızadan veya enerji kesilmesinden şebeke ve fv sistem olumsuz etkilenebilir

6. Sonuç

Yapılan bu analiz çalışmasında, şebekeye entegreli fv sistemin Matlab/Simulink programında benzetimi yapılarak fv sistemin şebekeye olan etkileri görülmüştür. Gerçek değer ve ekipman modelleri kullanılarak oluşturulan gerçek şebeke entegreli fv sistemde meydana gelen değişimlerin, simülasyon ortamında grafiksel olarak şekillerinin gösterimiyle kullanıcıların bilgi edinmeleri amaçlanmıştır.

Yapılan ölçümlerde fv sistem ile şebeke arasındaki senkronizasyonun 0.25'inci saniyeden itibaren gerçekleştiği gözlemlendiği için simülasyonda kullanılan breaker (kesici), 0.25'inci saniyede kapatılarak fv sistem ile şebeke arasındaki bağlantı gerçekleştirilmiştir. Fv sistemlerde konverterlerden kaynaklı harmonikler Matlab/Simulink programında FFT Analiz bölümünde ölçülmüştür. Tasarlanan filtreyle beraber harmoniklerin uluslararası standartlar sınırına uygun olacak şekilde indirildiği gözlemlenmiştir.

Burada, şebeke entegreli fv güç sistemlerinin her geçen gün arttığı için fv sistemlerin şebekeye etkileri ve güç kalitesini artırma yolları üzerine daha detaylı çalışmalar yapılmalıdır.

Fv sistemde konverterler gibi güç kalitesini negatif olarak etkileyen elemanların özellikleri iyi bilinmeli, gerekirse bu elemanları geliştirme yoluna gidilmelidir. Sistemde kullanılacak olan her bir eleman, sistem özelliklerine uygun olarak sisteme ve şebekeye en iyi uyum sağlayacak şekilde seçilmelidir. Sistemde ne kadar çok problem giderilirse o kadar çok verimin artacağı ve kayıpların azalacağı unutulmamalıdır. Tüm bu değerlendirmeler sonunda; bir fv güç santralinin devreye alınması ve devreden çıkarılması sırasında şebekede geçici de olsa harmonik değerlerini yükselttiği anlaşılmıştır. Bu durumu gidermek için ise şebekeye bir pasif filtreleme işleminin yapılması önerilmektedir.

Maliyetlerinin Kestirimi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, (1999).

7. Kaynaklar

- [1] Li, J., Yan, H., Tang, G., Jiang, P., Bo, B., Simulation study of the series active power filter based on nonlinear immune control theory. In Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference, 2, (2004), 758-762.
- [2] Zhan, Y., Ding, Y. F., Cheng, H. Z., Zeng, D. J., A robust support vector algorithm for harmonics analysis of electric power system [J], Proceedings of the Csee, 2004, 1-12.
- [3] Arifoğlu U. Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi. Alfa Yayınları, 1. baskı, İstanbul, Türkiye, 2002.
- [4] Abamor, S. Şebeke Bağlantılı Fv Enerji Santrallerinin Elektrik Güç Kalite Parametrelerinin İzlenmesi ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2016.
- [5] <http://www.solarcell.com.tr.html>, 20.12.2019.
- [6] <http://320volt.com/gunes-pillerive-teknolojik-uygulamaları>. 20.12.2019
- [7] Bonnett, A.H. Quality and Reliability of Energy Efficiency Motors. IEEE Industry Applications Magazine, 3: 1997, 22-31.
- [8] <http://www.3eelectrotech.com.tr.html>, 20.12.2019
- [9] Çelik, Ç. Dağıtım Sistemlerinde Enerji Kalitesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [10] <http://www.etmd.org.tr/etmd-arsivsayfasi.html> 20.12.2019.
- [11] IEEE Std 519-1992, (IEEE Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE, ABD, 1992).
- [12] Efe, S.B. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Engellenmesi, EMO Diyarbakır Şube Bülteni, 2010, 19-23.
- [13] Efe, S.B. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bil. Ens., Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 2007.
- [14] Zhang J., Wen H., Tang L., Teng Z., Chen Z., "Frequency Shifting and Filtering Algorithm for Power System Harmonic Estimation", IEEE Int. Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2017 UK, 1-6.
- [15] T.C. Resmi Gazete, Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği. (28504), 21 Aralık 2019,
- [16] Carnovale, D. J. and Eaton, P. E. Power Factor Correction and Harmonic Resonance : A Volatile Mix, Electrical Construction and Maintenance, June .2003.
- [17] İnan, A. Lineer Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinin Harmonik Kayıpların Yapay Sinir Ağları ile Analizi ve Filtre

Halil İbrahim Aydınöz



Halil İbrahim Aydınöz 1987 yılında Diyarbakır'da doğdu. 2009 yılında Dicle Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden lisans derecesi aldı. 2014 yılında Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik ABD. yüksek lisans derecesi aldı. 2014 yılında Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji ABD.'da doktora programına başladı ve tez aşamasında devam etmektedir. 2010-2011 yılları arası Batman Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2011 yılından bu yana TE-İAŞ Batı Akdeniz Yük Tevzi İşletme Müdürlüğünde İşletme Mühendisi daha sonra 2017 yılından itibaren İşletme Baş Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir. Araştırma alanları; yenilenebilir enerji sistemleri, güç kalitesi, facts cihazları ve elektrik şebeke sistemlerinde planlama.

Güneş Enerjisi Santrallerinde Elektromanyetik Alan Seviyeleri ve Mesleki Maruziyet Analizi

Electromagnetic Field Levels and Occupational Exposure Analysis in Solar Power Plants

Merve Bedeloğlu^{1,2}, Niyazi İl¹, Kayhan Ateş¹, Şükrü Özen¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

mrvbedelolu@gmail.com, niyaziil@akdeniz.edu.tr, kayhanates@akdeniz.edu.tr,
sukruozen@akdeniz.edu.tr

²ALTSO Meslek Yüksek Okulu
Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya, Türkiye

merve.bedelolu@alanya.edu.tr

Öz

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın artması, bu alandaki üretim teknolojilerinin gelişmesine ve bu teknolojilerle ilgili hem insan sağlığına hem de çevresel etkilerine yönelik çalışmaların yoğunlaşmasını beraberinde getirmiştir. Yapılan bu çalışmada, yerleşim yerlerinden uzakta yer alan bir güneş enerji santralinde manyetik alan şiddetleri ölçülmüş ve santralde farklı manyetik alan kaynakları yakınlarındaki ölçüm sonuçları sunulmuştur. Ölçümler, Antalya'nın Elmalı ilçesinde bulunan bir güneş enerji santralinde (GES) yük altında gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan ölçümleri trafo köşkü çevresinde, fotovoltaik paneller üzerinde ve invertör (evirici) önünde yapılmıştır. Ölçülen manyetik alan şiddetleri ele alındığında paneller önünde yaklaşık 0.19 μT gözlenmişken, evirici önünde 2.2 μT elde edilmiştir. Trafo köşkü çevresinde ise 7.95 μT 'ya ulaşmıştır. Sonuçlar, uluslararası kuruluşun yayınladığı elektromanyetik alanlara maruziyet limitleri ışığında yorumlanmıştır. Bu sayede güneş panellerinin elektromanyetik risk değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler, Güneş enerji santrali, manyetik alan, maruziyet analizi, biyo elektromanyetik, elektromanyetik radyasyon, elektromanyetik kirlilik, ölçüm, EMU.

Abstract

The increase in the need for electrical energy has led to the development of production technologies in this mentioned field and the condensation of both human health and environmental impacts and studies related to these technologies. In this study, the magnetic field levels were measured in a solar power plant located far from the settlement areas and the measurements of the vicinity of the different magnetic field sources results were presented. The measurements were carried out under load in a

solar power plant in Elmalı, Antalya. Magnetic field measurements were performed around the transformer, on photovoltaic panels and in front of the inverter. When the measured magnetic field levels are examined, approximately 0.19 μT was observed in front of the panels, while 2.2 μT was obtained in front of the inverter. Also it reached 7.95 μT around the transformer kiosk. The results were evaluated in the light of the exposure limits to electromagnetic fields published by international organization. In this way, the electromagnetic risk assessment of the solar panels was carried out.

Keywords, Solar power plant, magnetic field, exposure analysis, bioelectromagnetic, electromagnetic radiation, electromagnetic pollution, measurement, EMC.

1. Giriş

İnsanoğlunun ihtiyaç duyduğu temel unsurlardan biri enerjidir. Şüphesiz ki her geçen gün hızla artan teknoloji ve sanayi beraberinde aynı hızla enerjiye olan ihtiyacı da doğurmaktadır. Var olan tüketilebilir enerji kaynaklarının sonlu olması, toplumları alternatif enerji kaynakları bulmaya yönlendirmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmaktadır. Rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra, özellikle güneş gibi sonsuz enerji kaynağı aracılığıyla elektrik üreten güneş enerji sistemlerinin popüleritesi giderek artmaktadır.

Güneş enerjisinden elektrik üretimi yarı iletken teknolojisine dayanmaktadır. Güneşten yeryüzüne gelen uygun dalga boyları arasındaki ışınımın silisyum hücresinin üzerine düşmesiyle elektron bağları kırılır ve elektrik akımı oluşur [1].

Artan enerji ihtiyacı göze alındığında Türkiye, bulunduğu coğrafi konumu sayesinde güneş ışınımı açısından önemli potansiyele sahiptir. Türkiye Güneş Enerjisi Atlasına (GEPA) göre, Türkiye'nin yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat, yıllık toplam güneş enerjisi 1527 kW/m².yıl olarak belirtilmektedir [2].

Güneş enerji sistemlerine yönelimin artmasının yanında bu sistemlerin çevreye ve canlılara sebep olduğu olumsuz etkileri de araştırmacılar tarafından incelenmektedir. Enerji üretmek için güneş enerjisi sistemi tasarımı yapılırken, çeşitli etmenlere bağlı olan santral bileşenlerinin seçiminin önemli olduğu kadar bu santralin yaydığı çok düşük frekans bölgesindeki elektrik ve manyetik alanların da uluslararası elektromanyetik alan seviyeleri standartlarının altında olması gerekmektedir. Bu sayede, elektrikli ve elektronik cihazların düzgün çalışması sağlanabilir ve insan sağlığı korunabilir. Biyolojik etkiler açısından ele alınan standartlara göre özellikle yerleşim yerlerinde bu değerler büyük öneme sahiptir. Epidemiyolojik çalışmalara göre, çok düşük frekans bölgesindeki manyetik alanlar insan dokusu için ciddi tehlike oluşturabilir. Söz konusu alanlar, genellikle kentsel yerleşim yerlerinin yakınında bulunan yüksek gerilim elemanlarından kaynaklanmaktadır. Çok düşük frekans bölgesindeki manyetik alanlara maruz kalma sonucunda lösemi, beyin kanseri veya hamilelikte düşük yapma gibi bazı durumlar ortaya çıkabilir [3]. Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) tarafından yayınlanan genel halk için güç frekanslı elektrik ve manyetik alanlara maruziyet limitleri şu şekilde belirtilmektedir [4].

- Elektrik alan şiddeti için $E < 5$ kV/m;
- Manyetik alan şiddeti için $B < 200$ μ T.

Güvenli mesleki maruziyet için ise bu seviyeler aşağıdaki gibidir.

- Elektrik alan şiddeti için, $E < 10$ kV/m;
- Manyetik alan şiddeti için $B < 1000$ μ T.

Manyetik alan ve elektrik alan ölçümlerini içeren özellikle de düşük frekanstaki elektrik ve manyetik alanların insan sağlığı üzerine etkilerini inceleyen bazı çalışmalar yapılsa da bunların yeterli olmadığı görülmektedir. Özen tarafından 2008 yılında Antalya ilinde yapılan çalışmada, insan vücudunun biyolojik çalışmalarında önemli rol oynayan 380/154 kV trafo merkezinin yakınında ve trafo istasyonuna bağlanan, büyük bir kısmı yerleşim yerlerinden geçen, güç iletim hatlarının yakınında (380 ve 154 kV) manyetik alan şiddeti ölçümlerini içeren çalışma gerçekleştirilmiştir. Trafo merkezlerinde çalışanlar için mesleki maruziyet çalışmaları ve 380/154 kV elektrik santrallerinden yayılan manyetik alana maruz kalan kişilerin vücudunda indüklenen elektrik alan ve akım yoğunlukları incelenmiştir. Manyetik alan ölçümleri 380 kV bara altında, kontrol ve ölçüm odasında, 154 kV bara altında, 154/31.5 kV kontrol odasında ve transformatörlerin yanında alınmıştır [5]. Safigianni ve Tsompanidou, 2009 yılında Yunanistan'da bulunan bir elektrik santralinde elektrik ve manyetik alan seviyelerini araştırmışlardır. 50 Hz'de çalışan

elektrik güç trafo merkezinde, 300 ölçüm pozisyonunda değişen yatay ve dikey mesafelerde elektrik ve manyetik alan ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, her noktada kafa yüksekliği (1.8 m), bel yüksekliği (1 m) ve zeminde gerçekleştirilmiştir. Trafo merkezinde 24 saat boyunca her 15 dakikada bir akımlar ve manyetik alan şiddeti ölçülmüş ve bunlar arasında doğrusal ilişki olduğu gözlenmiştir [6]. İl, Özen, Carlak ve Çakır tarafından 2015 yılında hazırlanan çalışmada, yer altı enerji kablolarının çevresinde oluşan düşük frekanslı manyetik alanlar, ölçüm ve hesaplamalı yöntemler ile analiz edilmiş ve 50 Hz frekanslı manyetik alanların ekranlama ile kontrolü araştırılmıştır. AG ve YG kablo kanallarında dikey mesafelerde her 10 cm'de bir alan ölçümleri yapılmış ve ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir [7]. Rahman ve diğerlerinin 2011 yılındaki çalışmasında ise bir binanın bodrum katı ve 15. katındaki 1500 kVA, 11/0.4 kV kapasitesindeki iki trafonun neden olduğu manyetik alan maruziyet seviyesi normal çalışma saatlerinde EMDEX meter ve EMCALC yazılımı kullanarak karşılaştırmalı analizi yapılmıştır [8]. Mccallum ve arkadaşlarının 2014 yılında yayınlanan makalelerinde, Kanada'da bulunan bir rüzgâr türbininden 0 ve 500 m arasında değişen farklı noktalarından manyetik alan ölçümleri alınmıştır. Manyetik alan ölçümleri kuvvetli rüzgâr, zayıf rüzgâr ve kapalı olmak üzere türbinin üç farklı çalışma durumu için, 1.8 MW rüzgâr türbini, iki trafo merkezi, çeşitli gömülü ve havai toplayıcı ve iletim hatları yakınında gerçekleştirilmiştir [9]. Safigianni ve Tsimsios'un 2013 yılına ait çalışmalarında, farklı nominal güce ve evirici tiplerine sahip üç farklı konutta bulunan çatı üstü fotovoltaik sistemlerde elektrik ve manyetik alan ölçümleri yapılmıştır. Her biri 230 W çıkış güçlü 35 polikristalin silikon güneş panelinden oluşan 8.05 kW nominal güce sahip, her biri 240 W çıkış güçlü 20 polikristalin silikon güneş panelinden oluşan 4.8 kW nominal güce sahip ve her biri 240W çıkış güçlü 41 polikristalin silikon güneş panelinden oluşan 9.84 kW nominal güce sahip çatı üstü fotovoltaik sistemlerde üç farklı yükseklik için (kafa yüksekliği – 2 m, bel yüksekliği – 1 m, çatı yüzeyi) her 2 metrede (yatay ve dikey) mart ayında 12 °C sıcaklıkta manyetik alan ölçümleri alınmıştır [10]. Helhel ve Özen, mesleki maruziyet değerlendirmesi için Antalya ilindeki 154/31.5 kV trafo merkezlerinde manyetik alan ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı trafo merkezinde yapılan çalışmada 12 katılımcı (8 saatlik her vardiya için 4 katılımcı) yer almıştır. Operatör masaları, minimum yüklü mevsimde 0.3 μ T'lık en düşük manyetik alana ve maksimum yüklü mevsimde 1 μ T'ya ulaşmıştır. Şalter panosunda 23 μ T'dan 70 μ T'ya kadar ulaşmıştır. Devre kesici bölgesinde dış mekân manyetik alan ölçümü, operatör yüksekliklerine göre 62 mT'ya kadar çıkmaktadır [11]. Fotovoltaik panellerden yayılan elektromanyetik emisyonlar Saidi ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. İlk aşamada panel üzerindeki elektromanyetik yakın alan ölçülmüştür. İkinci aşamada fotovoltaik hücreleri modellemek ve yayılan elektromanyetik yakın alanı hesaplamak için bir simülasyon programı kullanılmıştır [12]. Farklı güneşlenme seviyeleri altında 32 kW çatı üstü güneş enerji sisteminden yayılan elektrik ve manyetik alan emisyonları ise Karawia ve Ali tarafından incelenmiştir. Sistem 410 W çıkış güçlü 78 adet mono-kristal silikon güneş panelinden oluşmaktadır. Ölçümler eylül ayında, 12.00-14.00 saatleri arasında, açık gökyüzü koşullarında ve 35 °C ortam

sıcaklığında ve ocak ayında, 12:00-14:00 saatleri arasında, açık gökyüzü koşullarında ve 14 °C ortam sıcaklığında olmak üzere iki farklı mevsimde gerçekleştirilmiştir. Eylül ayında evirici çevresinde manyetik alan ölçüm değerleri 32 µT-48 µT arasındayken, ocak ayında 24.4µT-35µT değerleri arasında görülmüştür [13].

Yukarıdaki çalışmalardan da görüldüğü gibi literatürde elektrik santrallerinde, rüzgâr türbinlerinde manyetik alan analizi çalışmaları olmasına karşın, güneş enerji santrallerinin yaydığı manyetik alanın etkileri ile ilgili detaylı çalışma yapılmamıştır.

Bu çalışmada, 31.5/0.4 kV enerji nakil hatlarını içeren güneş enerjisi santralinde trafo hücresinde, paneller üzerinde ve evirici önünde gerçek zamanlı manyetik alan ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre santralin belirli noktalarında gözlenen alanların uluslararası standartlara uygunluğu tartışılmıştır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde incelemesi yapılan santralin fiziksel ve elektriksel özellikleri açıklanmıştır. Ardından manyetik alan ölçüm sonuçları verilmiş ve tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

GES'ler (Güneş Enerjisi Santralleri) şebeke bağlantılı (on-grid) ya da şebeke bağlantısız (off-grid) olmak üzere iki farklı şekilde kurulabilmektedir. Bu iki santral türünün farkı, güneş panelleri tarafından üretilen enerji on-grid sistemde enterkonnekte şebekeye çift yönlü sayaç üzerinden doğrudan verilirken off-grid sistemde bu enerji, akülere depolanarak kullanılmaktadır. Bu özellik dışında her iki santral türünün ana bileşenleri genel olarak birbirinin aynısıdır. Bu santralleri oluşturan bileşenlerden;

- Işık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren ve bir panelin en önemli yapıtaşı olan güneş hücresi,
- Güneş panellerinin dc olarak ürettiği gücü ac güce dönüştüren evirici ve
- Enerji iletimini sağlayan ve bileşenler arasında bağlantı sağlayan kablolar elektromanyetik uyumluluk (EMC) açısından gürültü kaynağıdır [14].

Fotovoltaik sistemlerde güneş paneli ile eviriciyi birbirine bağlayan kablolar çok uzun olabilir. Bu nedenle en önemli girişim 30 Hz – 300 kHz ve 300 MHz ile 3000 MHz frekans aralığında olabilir. Frekans tayfı ve temel kullanım alanları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1: Frekans tayfının kullanım alanları [15]

İsim	Frekans	Temel Kullanımı
ELF (Extre. Low Frequency)	3-30 Hz	Enerji nakil hatları
SLF (Super- Low Frequency)	30-300 Hz	şebekesi
ULF (Ultra- Low Frequency)	300-3000 Hz	Denizaltılar
VLF (Very- Low Frequency)	3-30 kHz	Beacon
LF (Low Frequency)	30-300 kHz	AM yayını
MF (Medium Frequency)	300-3000 kHz	Kısa dalga yayını
HF (High Frequency)	3-30 MHz	FM, TV
VHF (Very- High Frequency)	30-300 MHz	

UHF (Ultra- High Frequency)	300-3000 MHz	TV, LAN, hücresel, GPS
SHF (Super- High Frequency)	3-30 GHz	Radar, GSO uyduları, veri
EHF (Extre.- High Frequency)	30-300 GHz	Radar, otomotiv, veri

Çalışmaya konu olan ve ölçümlerin yapıldığı santral, Antalya ili Elmalı İlçesinde bulunmaktadır. Santral, 800 kWp kurulu gücüne sahiptir ve fotovoltaik paneller için geçerli olan IEC 61215 (Kristalin Silikon Karasal Fotovoltaik Modüller-Tasarım Değerlendirmesi ve Tip Kabulü) uluslararası standardına uygun olarak üretilmiştir. Santral, 250 W çıkış gücüne sahip 3200 adet polikristal panel kullanılarak kurulmuştur. Her bir panel 156×156 mm² boyutunda 60 adet polikristal hücrenin seri bağlanması ile oluşturulmuştur ve güneş panelleri zemin ile 25° açı yapacak şekilde konstrüksiyon üzerine yerleştirilmiştir. Kullanılan panellerin teknik özellikleri Çizelge 2'de belirtilmiştir.

Çizelge 2: Panelin teknik özellikleri

Panelin Özelliği	Değeri
P_m (W)	250 W
Güç toleransı (%)	0±3
V_{mpp} (V)	30.6 V
I_{mpp} (A)	8.17 A
V_{oc} (V)	36.3 V
I_{sc} (A)	8.71 A
Maksimum Sistem Gerilimi (V)	1000 V
Modül Boyutu	1640×990×40 mm

P_m : Maksimum güç

V_{mpp} : Maksimum güçteki gerilim

I_{mpp} : Maksimum güçteki akım

V_{oc} : Açık devre gerilimi

I_{sc} : Kısa devre akımı

Santralde ayrıca her biri 27.6 kV gücüne sahip 27 adet evirici vardır. Çizelge 3'te, eviricilerin özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 3: Evirici teknik özellikleri

Özellik	Parametre Adı	Değeri
DC Giriş	V_{dc} max	1000 V
	V_{dc} MPP	200-950 V
	V_{dc} , Full Power	500-800 V
	I_{dc} max	2×32 A
	I_{sc} max	2×40 A
AC Çıkış	V_{acr}	400 V / 3Φ
	fr	50 Hz
	P_{acr} (cosφ =1)	27.6 kW @ 45 °C
	P_{acr} (cosφ ±0.9)	27.6 kW @ 45 °C
	I_{ac} max	45 A



Şekil 1: Ölçümü yapılan güneş enerjisi santrali

Bunun yanında tesiste bulunan 4 adet AG panosunun elektriksel güçleri ise sırasıyla 240 kW, 270 kW, 180 kW ve 110 kW'tır.

Santralde üretilen enerji, 7.30×2.50 m² boyutlarındaki prefabrik beton köşk içinde bulunan 0.4/34.5 kV 1000 kVA gücünde step-up trafo ile ulusal şebeke elektrik değerlerine uygun hale getirildikten sonra enterkonnekte sisteme iletilmektedir. Santralde üretilen ve aynı tesis içerisinde tüketilen enerjinin kontrolü de çift yönlü sayaç vasıtasıyla kayıt edilmektedir.

3. Manyetik Alan Şiddeti Ölçümleri

Manyetik alan şiddeti ve manyetik alana maruziyet seviyesini ölçmek için tasarlanmış ve 100 cm² ve 3 cm² manyetik alan sensörleri içeren, aynı zamanda ICNIRP 2010 ve IEC/EN62233'ye uygunluğunu değerlendirmede kullanılabilen Hioki 3470 magnetic field histester cihazı (Hioki E. E. Corp., Japonya) ile santralde belirlenen noktalarda ölçümler gerçekleştirilmiştir.

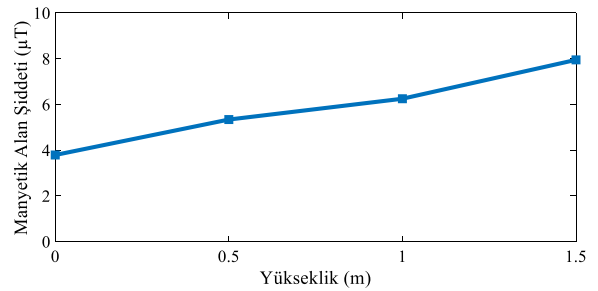
Şekil 1'de görülen santralin manyetik alan ölçümleri, 25 Ağustos 2019'da havanın açık ve güneşli olduğu bir günde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında ara ara bulutlanma olmuştur. Santral sahası içerisinde özellikle çalışanların maruz kalabileceği bölgeler ile elektromanyetik girişime neden olabilecek kaynakların yakınında ölçümler yapılmıştır.

3.1. Santralin Güç Trafosu Çevresindeki Manyetik Alan Şiddeti Ölçümleri

Trafo hücrelerinde yatayda 30 cm uzaklıkta ve yerden 0 m (zemin), 0.5 m, 1 m ve 1.5 m olmak üzere dört ayrı noktadan manyetik alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan şiddetinin yerden yüksekliğe göre değişimi Çizelge 4 ve Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'den de görüldüğü üzere trafo yakınında yer seviyesindeki manyetik alan şiddeti 3.79 µT iken 1.5 m yükseklikte 7.95 µT olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4: Trafo hücresi tarafında gerçekleştirilen manyetik alan şiddeti ölçüm sonuçları

Manyetik Alan Şiddeti (µT)	Yükseklik (m)
3.79	0
5.34	0.5
6.25	1
7.95	1.5

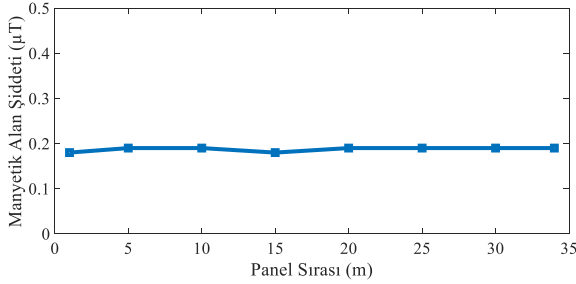


Şekil 2: Trafo hücresi tarafında gerçekleştirilen manyetik alan şiddeti ölçümü

3.2. Fotovoltaik Panellerdeki Manyetik Alan Şiddeti Ölçümleri

Santraldeki 34 panelli bir sistemde her beş panelde bir ve son panel için manyetik alan şiddeti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te panel sırasına göre manyetik alan değişimi belirtilmiştir.

Şekil 3'ten ve Çizelge 5'te verilen ölçüm sonuçlarından da görüleceği üzere panellerden yayılan manyetik alan şiddeti 0.18 - 0.19 µT değerleri arasında bir değişim göstermiştir.



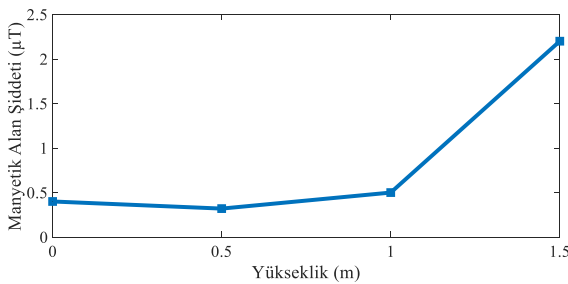
Şekil 3: Panellerin önünde gerçekleştirilen manyetik alan şiddeti ölçümü sonuçları

Çizelge 5: Panellerin önündeki manyetik alan şiddeti ölçüm sonuçları

Manyetik Alan Şiddeti (µT)	Panel Sırası
0.18	1
0.19	5
0.19	10
0.18	15
0.19	20
0.19	25
0.19	30
0.19	34

3.3. Evirici Önündeki Manyetik Alan Şiddeti Ölçümleri

Evirici önünde 0 m, 0.5 m, 1 m ve 1.5 m yüksekliklerinde manyetik alan şiddeti ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4'te verilen grafik yerden yüksekliğe göre manyetik alan değişimini göstermektedir.



Şekil 4: Evirici tarafındaki manyetik alan şiddetinin yerden yüksekliğe göre değişimi

Çizelge 6: Evirici önünde gerçekleştirilen manyetik alan şiddeti ölçüm sonuçları

Manyetik Alan Şiddeti (µT)	Yükseklik (m)
0.4	0
0.32	0.5
0.5	1
2.2	1.5

Şekil 4 ve Çizelge 6'da verilen ölçüm değerlerinden de görüleceği üzere zeminden itibaren manyetik alan şiddeti 0.32 - 2.2 µT aralığında değişim göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Güneş enerjisi santralinde belirlenen ölçüm noktalarında, çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri olabilen manyetik alanın ölçümleri ve dozimetrik analizleri yapılmıştır. Trafo yakınında ölçüm değerleri yerden yüksekliğe göre Şekil 2'de görüldüğü gibi 3.79 µT ve 7.95 µT arasında artan bir değişime sahiptir.

Santralde toplam 34 panel bulunan birinci sıranın ilk ve son panelleri dâhil olmak üzere her beş panelden birinde alınan manyetik alan ölçümleri Şekil 3'te belirtildiği gibi 0.18 µT ve 0.19 µT değerleri arasında gözlenmiştir.

Evirici önünde ölçüm değerleri yerden yüksekliğe göre 0.32 µT ile 2.2 µT değerleri arasında değişim göstermektedir. Ölçüm sonuçlarına bakıldığında oluşan değişimlerin ölçüm sırasında değişen hava şartlarına (güneşli, bulutlu, gölgeli olma durumuna vb.) bağlı olarak değişim gösterebileceği söylenebilir.

Santral sahası içinde çalışanların maruz kalabileceği yerlerdeki manyetik alan seviyelerinin Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu mesleki maruz kalma limitinin çok çok altında olduğu görülmüştür. Bunun yanında fotovoltaik santrallerine bağlı yerleşim alanlarından geçen enerji nakil hatları çevresindeki manyetik alan seviyelerinin araştırılması ve sonuçlarının genel halk maruziyeti açısından değerlendirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada daha çok fotovoltaik santrallerinde çalışanların manyetik alan maruziyeti açısından sonuçlar sunulmuştur. İlerleyen çalışmalar, yerleşim yerlerinde ve bina üstlerinde bulunan fotovoltaik panellerin evlerde oluşturduğu manyetik alanların incelenmesi planlanmaktadır. Bu sayede söz konusu sistemlerin hem çalışan hem de genel halk için sonuçları detaylı bir şekilde tartışılabilir.

5. Kaynaklar

- [1] Haselhuhn R., Hemmerle C. (Murat Çataklı), Fotovoltaik Sistemler, Çataklı Enerji Eğitim Yayıncılık Danışmanlık ve Tic. Ltd. Şti., 2012
- [2] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Güneş, Link: <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>, Son Erişim Tarihi: 23 Ağustos 2019.
- [3] Ates, K., Carlak, H. F., and Ozen, S., "Magnetic Field Exposures due to Underground Power Cables: A Simulation Study", 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16). 2016.
- [4] International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)", Health Physics, vol.99, no.6, pp.818-836, 2010.

- [5] Ozen, S., "Evaluation and Measurement of Magnetic Field Exposure at a Typical High Voltage Substation and Its Power Lines", *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 128, no. 2, pp.198–205, 2008.
- [6] Safigianni, A. S. and Tsompanidou C. G., "Electric- and Magnetic-Field Measurements in an Outdoor Electric Power Substation", *IEEE Trans. Power Del.*, vol.24, no.1, pp.38–42, 2009.
- [7] İl N., Özen Ş., Carlak H. F., Çakır M., "Yeraltı Enerji Kabloları Çevresinde Oluşan Manyetik Alanların Analizi ve Kontrolü", IV. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, 2015, ss.67–72.
- [8] Rahman, N. A., Rashid, N. A., Mahadi, W. N. L., and Rasol, Z., "Magnetic Field Exposure Assessment of Electric Power Substation in High Rise Building", *Journal of Applied Science*, vol.11, no.6, pp.953–961, 2011.
- [9] L.C. McCallum, M. L. W. Aslund, L.D. Knopper, et al., "Measuring Electromagnetic Fields (EMF) Around Wind Turbines in Canada: Is There a Human Health Concern?", *Environ. Health*, vol.13, no.9, pp.1–8, 2014.
- [10] Safigianni, A. S. and Tsimsios, A. M., "Electric and Magnetic Fields due to the Operation of Roof Mounted Photovoltaic Systems", *PIERS Proceedings*, 2013; pp.1908–1911.
- [11] Helhel, S. and Ozen, S., "Assessment of Occupational Exposure to Magnetic Fields in the High Voltage Substations (154/34.5kV)", *Radiation Protection Dosimetry*, vol.128, no.4, pp.464–470, 2008.
- [12] Saidi S., Bhiri H. and Ben Hadj Slama J., "Study of the Electromagnetic Near Field Radiated by the Photovoltaic Cells", 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), 2016, pp. 374–377.
- [13] Karawia H., Ali M., "ELF Electric and Magnetic Fields Emission due to Rooftop Photovoltaic System", *CIRE2015 23rd International Conference on Electricity Distribution*, 2015.
- [14] Smirnov, Y., "RF Disturbances Produced by High-Power Photovoltaic Solar Plants", MSc Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2011.
- [15] Kraus, J. D. and Marhefka, J. R., *Antennas for All Applications*, McGraw-Hill, New York, 2001

Merve BEDELOĞU



Merve BEDELOĞU, 1988 yılında Antaya'da doğdu. 2013 yılında Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesinden Elektrik Elektronik Mühendisi olarak mezun oldu. Yüksek Lisans Öğrenimini 2016 yılında Akdeniz Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında tamamladı ve 2017 yılında aynı bölümde doktora başladı. 2017-2019 yılları arasında Cw Enerji Müh. Tic. ve San. A.Ş.'de AR-GE mühendisi olarak çalıştı. 2019 yılından itibaren Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma alanları sinyal işleme, görüntü işleme, elektromanyetik alanlar, EM girişim ve uyumluluktur.

Niyazi İL



Niyazi İL, 1983 yılında Adana'da doğdu. 2007 yılında Çukurova Üniversitesi'nden Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak mezun oldu. Yüksek Lisans Öğrenimini 2015 yılında Akdeniz Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında tamamladı. 2009-2012 yılları arasında Serik Tedaş Arıza Onarım ve Bakım servisinde Elektrik Mühendisi olarak görev yaptı. Askerlik hizmeti tamamladıktan sonra, 2013 yılında çalışmaya başladığı TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Antalya Şubesinde halen Teknik Müdür olarak görev yapmaktadır.

2016 yılından bu yana Akdeniz Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü'nde Bahar yarı yıllarında uzman öğretici olarak Enerji ve İletişim dersini vermektedir. Elektromanyetik alanlar, elektromanyetik alanların biyolojik etkileri, elektromanyetik girişim, elektromanyetik ekranlama konularında çalışmalar yapmaktadır. Akdeniz Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında 2017 yılında başladığı Doktora öğrenimine devam eden İl, evli ve bir kız çocuğu babasıdır.

Kayhan ATEŞ



Kayhan ATEŞ, 1994 yılında Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Antalya'da tamamladı. 2016 yılında Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu ve aynı bölümde yüksek lisans eğitimine başladı. Eğitimine 2017-2018 yılları arasında Krakow, Polonya'daki AGH University of Science and Technology'de devam etmiştir. 2019 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamış ve Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nde doktora eğitimine başlamıştır. 2018 yılından itibaren Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma alanları biyoelektromanyetik, malzemelerin elektriksel özellikleri, elektromanyetik uyumluluk, elektromanyetik modelleme ve simülasyon, elektromanyetikte sayısal yöntemler ve mikrodalga mühendisliğidir.

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN



Prof. Dr. Şükrü ÖZEN, 1971 yılında Manavgat'ta doğdu. 1992 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesinden Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. Yüksek Lisans Öğrenimini 2000 yılında SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Bilim Dalında, Doktorasını ise Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Ana Bilim Dalında Mayıs 2003'te tamamladı. 2004 yılında Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümüne öğretim üyesi olarak atanmış ve burada Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünün kuruluş çalışmalarını yürüterek, 2006-2018 yılları arasında bölüm başkanlığı yapmıştır. 2010 yılında doçent, 2016 yılında profesör olmuştur. Elektromanyetik alanların biyolojik etkileri, EM girişim ve uyumluluk, EM alanların tıbbi uygulamaları, nümerik yöntemler, enerji ve elektriksel güvenlik konularında çalışmalar yapmaktadır.

Türkiye Elektrik Enerjisi Görünümü ve Yenilenebilir Enerjinin Global Ölçekte Mevcut Konumu

Turkish Electric Energy Outlook and the Current Position of Renewable Energy on a Global Scale

Ergin Kayar, Niyazi İl, Hamza Feza Carlak*

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

<https://orcid.org/0000-0002-7356-2165> erginkayar07@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-2750-0051> niyazi.il@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-8561-4591> fezacarlak@gmail.com

*: Sorumlu yazar

Öz

Dünyada artan sanayileşme ve şehirleşme sonucunda enerjiye duyulan ihtiyaç da artmaktadır ve enerji kaynaklarının az olması ülkeleri alternatif enerji kaynaklarını araştırmaya yönlendirmiştir. Türkiye'de elektrik tüketimi ile elektrik üretiminde 1960-2019 yılları itibariyle artış meydana gelmiş ve aynı zamanda ekonomik ve teknolojik gelişmişlik seviyesinde de önemli artışlar gözlenmiştir. 2018 yılında puant talep 46.160 MW (01 Ağustos 2018, saat 15:20), minimum yük 18.212 MW (16 Haziran 2018, saat 06:00'da) olarak gerçekleşmiştir. Minimum yükün maksimum yüke oranı %39 olmuştur. 2019 yılında ise puant talep 45.324 MW (26 Ağustos 2019, saat 16:30), minimum yük 18.300 MW (05 Haziran 2019, saat 06:00) olarak gerçekleşmiştir. Minimum yükün maksimum yüke oranı %40 olmuştur. Bu çalışmada; elektrik üretimi ve tüketiminde Türkiye'nin elektrik enerjisi gelişim süreci ve mevcut durumu aktarılmıştır. Türkiye'nin elektrik enerji tüketimi sürekli olarak artış göstermektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre küresel enerji talebi 2035 yılına kadar en az üçte bir oranında yükselecektir. Bu süreçte enerji piyasalarını, yükselen piyasa ekonomilerine sahip gelişmekte olan ülkeler yönlendirecektir. Bu çerçevede enerji faktörü, sürdürülebilir ekonomik büyüme açısından ülkelerin en stratejik üretim faktörleri arasında yer almaktadır. Tüm dünyada enerji alanında yaşanan süreçler, ülke yönetimlerini, enerji üretimini ve verimliliğini artırmaya yönelik kapsamlı, ulusal ve uluslararası programlar, politikalar ve stratejiler yürütmeye yönlendirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, enerji potansiyeli, yenilenebilir enerji kaynakları, Türkiye elektrik üretimi ve tüketimi

Abstract

As a result of the increasing industrialization and urbanization in the world, the need for energy is increasing and the scarcity of energy resources has led countries to search for alternative energy sources. As the years 1960-2018 with an increase in electricity generation, electricity consumption in Turkey have occurred and also economic and technological development level, significant increases were observed. In 2018, peak demand

was 46,160 MW (August,01, 2018, at 03:20 pm) and the minimum load was 18,212 MW (June 16, 2018 at 6:00 am). The ratio of minimum load to maximum load was 39%. In 2019, peak demand was 45.324 MW (August 26, 2019 at 04:30 pm) and the minimum load was 18.300 MW (June 05, 2019 at 06:00 am). The ratio of minimum load to maximum load was 40%. In this study; Turkey's electricity production and consumption of electrical energy development process and current status were transferred. Electricity consumption in Turkey has been increasing continuously. According to the International Energy Agency, global energy demand will increase by at least one third by 2035. In this process, developing countries with emerging market economies will direct the energy markets. Within this framework, energy factor is among the most strategic production factors of countries in terms of sustainable economic growth. The processes in the field of energy all over the world direct the country governments to implement comprehensive, national and international programs, policies and strategies aimed at increasing energy production and efficiency.

Keywords: energy efficiency, Electricity Consumption, potential energy, electrical energy, renewable energy sources, electricity generation and consumption in Turkey,

1. Giriş

Dünyada sanayileşme ve şehirleşmenin de etkisiyle hemen her alanda, her geçen gün enerjiye duyulan ihtiyacın artması ve buna karşılık yeryüzünde bulunan enerji kaynaklarının kıt olması, ülkeleri enerji konusunda yeni tedbirler almaya, politikalar oluşturmaya ve alternatif enerji kaynakları araştırmaya sevk etmiştir. Elektrik enerjisi, sanayiden, aydınlatmaya ve meskene kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektrik enerjisi, aynı zamanda hem sermaye ve işçiliğin hem de diğer üretim faktörlerinin verimliliğini artırarak büyümeyi desteklemekte, sanayi ve altyapı yatırımları ile ihracatın artmasına katkı sağlayarak refah artışına yol açmaktadır [1]. Ekonomik gelişmenin enerji tüketiminden önce geldiği veya tek başına enerjinin ekonomik gelişmenin uyarıcısı olup olmadığı ekonomistler arasında ilgi ve merak uyandırmaktadır. Literatürde elektrik üretim ve tüketimi ekonomik büyüme konusunda çok sayıda çalışmaya rastlanırken; son yıllarda elektrik üretim ve tüketiminin belirleyicilerine yönelik çalışmaların sayısı da artmıştır. Elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki nedensellik ilişkisi dört kategoride ele alınabilir. Birincisi,

elektrik kullanımındaki kısıtlamaların ekonomik büyümeyi olumsuz olarak etkileyeceğini ve diğer taraftan elektrik üretimindeki artışının ekonomik büyümeye olumlu katkı yapacağını ifade etmektedir. Bu görüşe göre, elektrik tüketiminden ekonomik büyümeye doğru tek yönlü bir ilişkinin varlığı söz konusudur [2] [3]. İkincisi, ekonomik büyümeden elektrik tüketimine doğru tek taraflı bir nedensellik ilişkisinin varlığıdır. Bu durumda elektrik tüketimi büyümenin önünde bir engel oluşturmamaktadır. Ayrıca elektrik tüketiminin büyüme önünde bir kısıt oluşturmaması, elektrik tüketimi konusunda koruyucu politikaların uygulanmasına olanak sağlamaktadır [4]. Üçüncü olarak, elektrik tüketimi ve ekonomik büyümenin birbirlerini belirlediği ve aynı zamanda birbirlerini etkilediği ve dolayısıyla değişkenler arasında iki yönlü bir nedensellik ilişkisinin olabileceği ifade edilmektedir [5]. Son olarak, iki değişken arasında bir nedensellik ilişkisinin bulunmaması söz konusu olabilir. Bu durum elektrik tüketimine ilişkin genişleyici ve korumacı politikaların ekonomik büyüme üzerinde etkisinin olmaması anlamına gelmektedir [6]. Türkiye'nin de ekonomik büyümesine bağlı olarak enerji tüketimi sürekli artmaktadır. Enerji faktörü, ülkenin hem dünya ortalaması üzerindeki ekonomik büyümesi hem de petrol ve doğal rezervleri açısından zengin bölgelere coğrafi yakınlığı açısından çift taraflı bir önem arz etmektedir. Bu çerçevede, Türkiye'nin ulusal ve uluslararası enerji politikaları önemli çalışma alanlarının başında gelmiştir. Milli tasarrufu artırmak, yatırımları toplum yararına, gerektirdiği önceliklerle yönlendirmek ve iktisadi, sosyal ve kültürel kalkınmayı demokratik yollarla gerçekleştirmek üzere Türkiye Cumhuriyeti, beşer yıllık kalkınma planı dönemlerine girmiştir. Her kalkınma planı döneminde enerji sektöründeki temel amaç, ekonomik ve sosyal kalkınmanın sağlanabilmesi için bütün kullanıcı kesimlere yerinde, zamanında, güvenilir, ucuz ve kaliteli enerjinin sağlanması olmuştur. Bunu sağlayabilmek için enerji amaçlı yatırımlara ağırlık verilmiş; ülkenin o dönemlerdeki enerji kaynakları ve enerji talebi göz önünde bulundurulmuştur. Birincil enerji kaynakları olarak kömür, petrol ürünleri ve hidrolik gibi enerji kaynakları kullanılmıştır. Kalkınmanın gereksinim duyduğu ölçü ve kalitede enerjinin zamanında sağlanamadığı durumlarda, dünyanın çeşitli ülkelerinde geniş ölçüde kullanılan doğalgaz, nükleer ve jeotermal enerji kullanımı değerlendirilmiştir. Tüm dönemlerde enerji kaynaklarının en uygun yoldan kullanarak üretim maliyeti azaltılmaya çalışılmıştır. Dolayısıyla, uygun enerji politikalarının formüle edilerek uygulamaya konulması, özellikle Türkiye gibi enerjide büyük oranda ithalata bağımlı ülkelerin kalkınmalarının sürdürülebilirliği için hayati öneme sahiptir.

2. Türkiye Elektrik Enerjisi Gelişimi ve Tarihçesi

Türkiye'deki elektrik enerjisinin gelişimi; İmtiyazlar ve dağıtım uygulamalar dönemi (1970'e kadar), Bütünleşme (Yarı Tekel) Dönemi (1970-1982), Kamu Tekeli Dönemi (1982-1983), Özel sektöre açılım dönemi (YİD, Yİ, İHD, Otoproduktör) (1984-2001), Piyasa Dönemi (2001), Serbest (Rekabetçi) Piyasa Dönemi olarak periyotlar halinde incelenmektedir. Birinci (1963-1967) ve İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1968-1972) dönemlerinde, Türkiye'deki elektrik üretim, iletim, dağıtım ve ticaretine ilişkin faaliyetlerin entegre bir sistem içerisinde ve bir kamu kurumu çatısı altında birleştirilmesi Plan hedefi olarak öngörülmüştür. Bu hedef ve strateji doğrultusunda, 15.07.1970 tarih ve 1312 sayılı Kanunla Devletin genel enerji ve ekonomi

politikasına uygun olarak, yurdun ihtiyacı bulunan elektriğin üretim, iletim, dağıtım ve ticaretini yapmak amacıyla, kamu iktisadi kuruluşu statüsünde, Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) kurulmuştur. Beşinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1985-1989) ve Altıncı Beş Yıllık Kalkınma Planı (1990-1994), Ekonomik Önlemler Uygulama Planı ve 1995 yılı geçiş planı ve hükümet programlarında ise TEK'in özelleştirilmesi öngörülmüştür. Kalkınma planı ve Hükümet programlarında öngörülen hedef ve strateji bağlamında elektrik sektöründe başlatılması gündeme getirilen özelleştirme uygulamaları ise şu şekildedir:

- 04.12.1984 tarih ve 3096 sayılı Türkiye Elektrik Kurumu dışındaki kuruluşların elektrik Üretimi, İletimi, Dağıtım ve Ticareti ile görevlendirilmesi hakkında kanun,
- 28.05.1986 tarih ve 3291 sayılı KİT'lerin Özelleştirilmesi Hakkında Kanun,
- 22.02.1994 tarih ve 3974 sayılı TEK'in özelleştirilmesini öngören ve 3291 sayılı kanuna ek maddeler eklenmesine dair kanun,
- 08.06.1994 tarih 3996 sayılı bazı yatırım Hizmetlerinin Yap-İşlet Devret Modeli çerçevesinde yaptırılması hakkında kanun,
- 24.11.1994 tarih ve 4046 sayılı özelleştirme uygulamalarının düzenlenmesine ve bazı kanun KHK'lerde değişiklik yapılmasına dair kanun ile bunu tadil eden 27.04.1995 tarih ve 4105 sayılı kanun,
- 10.07.1997 tarih ve 4283 sayılı Yap-İşlet Modeli ile elektrik enerjisi üretim tesislerinin kurulması ve işletilmesi ile enerji satışının düzenlenmesine dair Kanun'lar yürürlüğe konmuştur.

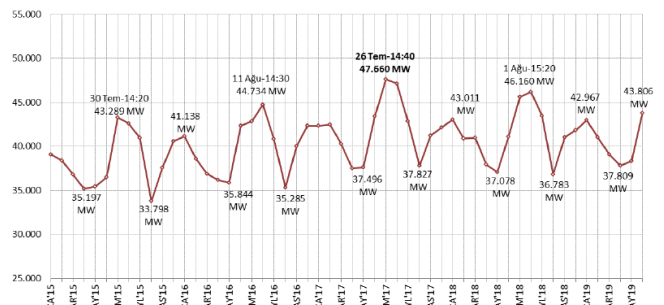
Anayasa Mahkemesinin 10.12.1994 tarihli kararıyla TEK'in mülkiyet satışı yöntemiyle özelleştirilmesini öngören 3974 sayılı Kanunun temel hükümleri iptal edilmiştir. Bu karar doğrultusunda kamu elektrik işletmelerinin mülkiyet devri ile özelleştirilmesi yolu kapatılmış, buna karşılık, 3096 ve 4046 sayılı kanunlara göre işletme hakkı yöntemiyle özelleştirme yolu açılmıştır. TEK'in tekel statüsü kaldırılmış, yerli ve yabancı sermaye şirketlerine üretim tesisi kurmak ya da mevcut üretim ve dağıtım tesislerinin mülkiyeti TEK'te kalmak üzere işletme hakkı devralmak suretiyle faaliyette bulunma imkânı verilmiştir. Bu kapsamda Çayırhan termik santralının işletme hakkı 20 yıllığına (1-2 ünitesi 2000 yılında, 3-4 ünitesi 2001 yılında) özel sektöre devredilmiştir. 233 sayılı kanun hükmünde kararnameye dayanılarak çıkarılan 12.08.1993 tarih ve 93/4789 sayılı Bakanlar Kurulu Kararıyla, bir kamu iktisadi kuruluşu olan TEK, Türkiye Elektrik Üretim İletim AŞ (TEAŞ) ve Türkiye Elektrik Dağıtım AŞ (TEDAŞ) unvanlı iki ayrı iktisadi teşekkülü olarak teşkilatlandırılmıştır. 15.05.1998 tarihinde Dünya Bankası ile akdedilen proje ikraz ve garanti anlaşmasında, elektrik enerjisi sektöründe "Ulusal Bir İletim Şirketinin" kurulması için yasal düzenlemeler yapılması öngörülmüştür. 21.01.2000 tarih ve 4501 sayılı Kanun ile sektörde uluslararası tahkim müessesesi düzenlenmiş, mevcut elektrik mevzuatının Avrupa Birliği (AB) müktesebatına uyumlu hale getirilmesi ve buna göre sektörde yeniden yapılandırma çalışmaları başlatılmıştır. 2001 yılında Hükümet tarafından uygulamaya konulan "Ekonomik İstikrar ve Enflasyonla Mücadele Programı" çerçevesinde, TEAŞ'ın özelleştirilmek üzere yeniden yapılandırılması öngörülmüştür. Bu programın başlıca amacı, elektrik enerjisi sektörünün yeniden yapılandırılması, elektrikte serbest piyasa sistemine geçilmesi, serbest rekabet ortamının sağlanması, elektrikle ilgili, üretim, iletim, toptan satış ve dağıtım için ayrı ayrı kamu şirketi kurulması ve son aşamada iletim dışındaki kamu elektrik

şirketlerinin özelleştirilmesidir. Buna göre, 233 sayılı Kanun Hükmünde Kararnamenin (KHK) 3. maddesine ve 20.02.2001 tarih ve 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'na dayanılarak çıkarılan ve 02.03.2001 tarihinde yürürlüğe giren 05.02.2001 tarih ve 2001/2026 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı uyarınca TEAŞ; Türkiye Elektrik İletim AŞ (TEİAŞ), Elektrik Üretim AŞ (EÜAŞ) ve Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt AŞ (TETAŞ) unvanlarında, anonim şirket statüsünde, üç ayrı iktisadi devlet teşekkülü şeklinde teşkilatlandırılmıştır. Devletin genel enerji politikasına uygun olarak, ülkedeki tüm iletim tesislerini devralmak, elektrik iletimi, yük tevzi ve işletme planlaması hizmetlerini yürütmek üzere 01.10.2001 tarihinde faaliyete geçirilen TEİAŞ, 233 sayılı KHK sistemi içinde, iktisadi devlet teşekkülü olarak ve mevcut mevzuat ve ana statüsü hükümleri çerçevesinde, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumundan (EPDK) 13.03.2003 tarihinde aldığı iletim lisansı çerçevesinde, yeni piyasa yapısına uygun olarak faaliyetlerini yürütmektedir. TEİAŞ'ın ana statüsü, Yüksek Planlama Kurulunun (YPK) 11.06.2001 tarih ve 2001/T-19 sayılı kararı ile onaylanmış, 29.06.2001 tarih ve 24447 sayılı Resmî Gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.

3. Türkiye Elektrik Enerjisi İstatistikleri

Enerji Bakanlığı (2014) istatistiklerine göre Türkiye'de brüt elektrik enerjisi tüketimi 2012 yılında 242,4 milyar kWh iken, 2013 yılında %1,3 artarak 245,5 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. 2013 yılı elektrik üretimi 239,3 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. Üretimin %43,8'i doğal gazdan, %25,4'ü kömürden, %24,8'i hidrolikten, %2'si sıvı yakıtlardan ve %4'ü yenilenebilir kaynaklardan elde edilmiştir. Yapılan tahminlere göre Türkiye'de elektrik tüketiminin 2020 yılında yıllık yaklaşık yüzde 5,5-6,9 arasında artacağı beklenmektedir [9]. Türkiye elektrik enerjisi brüt tüketimi (Türkiye brüt üretimi + dış alım – dış satım) 2016 yılında %5,1 artarak 279,3 Milyar kWh, 2017 yılında ise %5,6 artış ile 294,9 Milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. 2016 yılında puant talep 44.734 MW (11 Ağustos 2016, saat 14:30), minimum yük 17.448 MW (13 Eylül 2016, saat:07:00) olarak gerçekleşmiştir. Minimum yükün maksimum yüke oranı %39 olmuştur. 2017 yılında ise puant talep 47.660 MW (26 Temmuz 2017, saat 14:40), minimum yük 18.336 MW (26 Haziran 2017, saat 06:00) olarak gerçekleşmiştir. Minimum yükün maksimum yüke oranı %38 olmuştur. 2018 yılında ise puant talep 46.160 MW (01 Ağustos 2018, saat 15:20), minimum yük 18.212 MW (16 Haziran 2018, saat 06:00) olarak gerçekleşmiştir. Minimum yükün maksimum yüke oranı %39 olmuştur. 2019 yılında ise puant talep 45.324 MW (26 Ağustos 2019, saat 16:30), minimum yük 18.300 MW (05 Haziran 2019, saat 06:00) olarak gerçekleşmiştir. 2017 yılı sonu itibariyle, 46.926,3 MW'ı termik, 1.063,7 MW'ı jeotermal, 27.273,1 MW'ı hidrolik, 6.516,2 MW'ı rüzgâr ve 3.420,7 MW'ı güneş olmak üzere 2017 yılı sonunda Türkiye Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü bir önceki yıla göre %8,5 artışla 85.200,0 MW brüt elektrik enerjisi talebi 294,9 milyar kWh, puant güç talebi ise 47.660 MW olarak gerçekleşmiştir. Toplam 295,5 Milyar kWh üretim gerçekleştirilirken 2,7 Milyar kWh ithalat yapılmış, arz edilen toplam elektrik enerjisinden 3,3 Milyar kWh ihracat gerçekleştirilmiştir. 2017 yılında, termik santrallerden 210,5 milyar kWh, hidrolik santrallerden 58,4milyar kWh, rüzgâr santrallerinden 17,9 milyar kWh, jeotermal santrallerden 6,0 milyar kWh ile güneş santrallerinden 2,7 milyar kWh olmak üzere toplam 295,5 milyar kWh üretim gerçekleştirmiştir. 2018

yılında ise elektrik enerjisi talebinin bir önceki yıla göre yaklaşık %6,0'lık artışla 311,6milyar kWh olmuştur. Mevcut sistem 2018 yılında, termik santrallerden 227,0 milyar kWh, hidrolik santrallerden 70,7 milyar kWh, rüzgâr santrallerinden 20,9 milyar kWh, jeotermal santrallerden 7,7 milyar kWh ve güneş santrallerinden 2,9 milyar kWh olmak üzere toplam 329,3 milyar kWh üretim imkanına sahiptir [10]. Dünya birincil enerji üretimi 2015 yılında toplam 13.790 milyon TEP (milyon ton eşdeğer petrol) olarak hesaplanmıştır. 2014 yılına kıyasla %0,6 oranında bir artış göstermiştir [11]. 2015 yılı dünya geneli kaynak bazında birincil enerji üretim miktarları Şekil 2'de belirtilmiştir. Birincil enerji üretiminin büyük payı fosil kaynaklı yakıtlardan petrol (4416,26 milyon TEP), kömür (3871,53 milyon TEP), doğalgaz (2975,71 milyon TEP) oluşturmaktadır [12]. Fosil kaynaklı yakıtlardan nükleer ise %1,4 oranla payını artırarak 670 milyon ton eşdeğer petrol miktarına ulaşmıştır. Rüzgâr, güneş ısısı, hidrolik, jeotermal gibi diğer yenilenebilir kaynaklar da önceki yıllara oranla ivmelenen bir artış göstermiştir [11]. Enerji kaynaklarına bakıldığında, 2016 yılı sonu itibari ile küresel enerji kullanım miktarı 13,147 Milyar TEP olarak hesaplanmıştır. Türkiye 126,9 milyon TEP miktarı ile dünya enerji tüketiminin %1'lik dilimini kapsamaktadır [13]. 2016 yılı itibariyle dünyada çeşitli enerji kaynakları kullanılırken, bu kaynakları %85,5 oranı ile doğalgaz, petrol ve kömür vb. fosil kaynaklar kapsamaktadır. 2016 yılında elde edilen bilgilere göre; petrol, dünya çapında enerji tüketiminde %33,3'ü ile en yüksek miktarda olmaktadır. Petrolü takip ederek, dünya genelinde enerji tüketiminde ikinci sırada kömür %28,1'ini, doğalgaz ise %24,1'ini hidrolik enerji %6,9'unu, nükleer enerji %4,5'ini ve son olarak yenilenebilir enerji kaynaklarından %3,2'sini tüketilmektedir [14]. Türkiye birincil enerji üretiminin yerli kaynaklar bazındaki dağılımında en yüksek payı linyit %39 oranla ardından hidrolik %27, rüzgâr %8 ile takip etmektedir. 2016 yılı hidrolik %27 ve rüzgâr %8 ile büyük artış payı göstermiş olup linyit %39 ve taş kömürü %2 oranı ile kayda değer düşüş gerçekleşmiştir [15]. 2016 yılı itibari Türkiye'de yerli birincil enerji üretimi 35.374 bin ton eşdeğer petrol olarak hesaplanırken, ithal edilen birincil enerji 113.117 bin ton eşdeğer petroldür. 2018 yılı Haziran ve öncesindeki son 365 gün içerisinde Türkiye genelinde birincil kaynaklardan elektrik enerjisi üretimimiz toplam 292.702,9 GWh olarak hesaplanmıştır. Bu üretimin en büyük payı %71,2'i termik santrallerden elde edilmekte olup en fazla elektrik üretimi 104.665 GWh ile doğal gazdan sağlanmıştır. Bu elektrik üretimine takiben hidroelektrik santrallerden %17'i üretilmiş olup, diğer yenilenebilir enerji kaynakları tarafından %11'i üretilmiştir [16]. 2014 yılı ile 2018 yıl ortası rüzgâr santrallerinde üretilen elektriğin karşılaştırmasında ise 2014 yılında toplam üretimdeki pay %3,4 iken 2018 yıl ortasında bu payın %7'ye yükselmiş olması kayda değer bir durumdur [17].

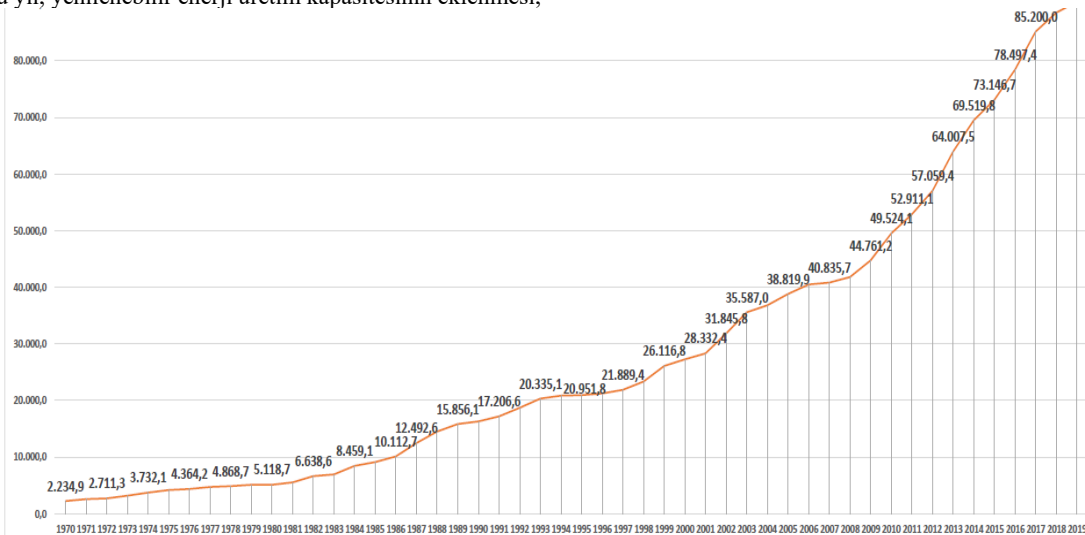


Şekil 1: Yıllara göre aylık maksimum puant eğrisi (MW) [8]

4. Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerjinin Güncel Konumu

Dünyada elektrik ihtiyacı, enerji ihtiyacından iki kat fazla artış gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, enerjide ülke bazında ciddi bir değişim söz konusudur. Küresel arenada tüketim, Batı’dan Doğu’ya kaymakta, hali hazırda en çok enerji tüketimi ABD’de gerçekleşirken, 2030’da ilk sırada Çin yer alacaktır. Sadece 11 yıl sonraki projeksiyonlara göre enerji tüketiminde sıralamanın Çin, ABD, Hindistan, Afrika ve Avrupa şeklinde olacağına görülmektedir [18]. 2018 yılı, yenilenebilir enerji teknolojileri için 2017’ye kıyasla, toplam 181 GW yenilenebilir enerji eklendi ve değişken yenilenebilir enerji yüksek paylarını birleştiren ülke sayısı artmaya devam etmektedir. Yenilenebilir enerji, geleneksel termik enerji üretim ile karşılaştırıldığında giderek daha uygun maliyetli hale gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları, yıl sonuna kadar küresel elektrik üretiminin tahminen %26’sından fazlasını sağlamıştır. Yenilenebilir kaynakların kurumsal olarak tedarik edilmesi 2018 yılında iki katından fazla artmıştır ve yenilenebilir enerji dünya genelinde önemli miktarlarda yayılmıştır. Yenilenebilir enerjilere yapılan küresel yatırımlar bir önceki yıla göre düşerken, gelişen ve gelişmekte olan ekonomiler, 2018’deki tüm yatırımların yarısından fazlasını ve yenilenebilir enerji sektörü genel olarak 2018’de dünya genelinde 11 milyon civarında (doğrudan ve dolaylı) istihdam sağlamıştır. 2017 itibarıyla, yenilenebilir enerji toplam nihai enerji tüketiminin (TFEC) %18,1’ini oluşturmaktadır. Modern yenilenebilir enerji kaynakları, TFEC’in %10,6’sını sağlamıştır ve 2016’ya kıyasla talepte %4,4’lük bir büyüme gerçekleşmiştir. Sektör entegrasyonu, politika yapımcıların dikkatini çekti ve teknolojilerin (pil depolama, ısı pompaları ve elektrikli araçlar gibi) etkinleştirilmesine yönelik pazarlar büyümektedir. Yenilenebilir enerji alımlarında, enerji verimliliğinde ve enerjiye erişimdeki ilerlemeye rağmen, dünya, Paris Anlaşması veya Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 7’nin hedeflerine ulaşma yolunda değil. Küresel enerji kaynaklı karbondioksit (CO2) emisyonları, fosil yakıt tüketimindeki artış nedeniyle 2018’de %1,7 oranında artmıştır. Fosil yakıt kullanımı için küresel sübvansiyonlar 2017’den bu yana %11 artmıştır. Yenilenebilir enerji, 2018 yılında yeni kurulan 181 GW ile elektrik sektöründe genişliyor ancak, yeni kapasite ilavelerinin oranı, yıllarca süren büyümenin ardından yükselişe geçmiştir. Küresel yenilenebilir enerji kapasitesi 2018’de yaklaşık 2.378 GW’a yükselmiş, üst üste dördüncü yıl, yenilenebilir enerji üretim kapasitesinin eklenmesi,

fosil yakıt ve nükleer enerjinin net kurulumlarını geride bırakmıştır. Yaklaşık 100 GW solar enerji santrali (PV) kurulmuş; yenilenebilir kapasite ilavelerinin %55’ini oluşturmuştur. Güneş enerjisi ardından rüzgâr enerjisi (%28) ve hidroelektrik (%11) izlemiştir. Genel olarak, yenilenebilir enerji, dünyadaki toplam kurulu enerji üretim kapasitesinin %33’ünden fazlasını oluşturmuş ve yenilenebilir enerji küresel ölçekte kendini kanıtlamıştır. 2018’de en az 30 ülke 10 GW kapasiteyi aşarken, 90’dan fazla ülke en az 1 GW üretim kapasitesi kurmuştur. Rüzgâr enerjisi ve güneş PV, bazı lokasyonlardaki paylarını daha da artırıp, giderek artan sayıdaki ülkeler, elektrik karışımlarında %20’den fazla değişken yenilenebilir enerjiye sahiptir. Politika yapımcılar kendi yetki alanlarına göre uyarlanmıştık etkili bir destek politikası karışımı tasarlama fırsatına sahiptir. Yenilenebilir teknolojilerin maliyetleri düştükçe, bu önlemler gelişmeye ve uyum sağlamaya devam edecektir. Yenilenebilir enerjinin farklı faydaları (örneğin kirliliğin azaltılması yoluyla halk sağlığının iyileştirilmesi, güvenilirliğin ve esnekliğin artırılması ve iş yaratma gibi) dünya çapında politika hareketini tetiklemektedir. Ancak, yenilenebilir enerji politikası çerçeveleri kapsamlılık bakımından büyük farklılıklar göstermektedir ve çoğu, uluslararası iklim hedeflerine ulaşmak için gereken iddialı seviyeden uzak durmaktadır [19]. Dünya genelinde hala enerjinin çok büyük bir bölümü kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan elde edilse de yenilenebilir enerji kaynakları bunlara olan bağımlılığı azaltmada kritik rol üstleniyor. Bu kaynaklardan enerji elde edilmesine yönelik dünya genelinde ciddi teşvikler bulunuyor. Ülkemizde de yenilenebilir kaynakların kurulu güç kapasitesi içindeki payı son 10 yılda ciddi biçimde artmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın Şubat 2019 başında yayınladığı verilere göre, geçen yıl ocakta hidrolikten üretilen elektriğin payı yüzde 17,03 olarak hesaplanırken bu yıl yüzde 30’a yükselmiştir. Rüzgârın elektrik üretimindeki payı yüzde 7,21’den yüzde 8,40’a, güneşin payı yüzde 0,99’dan yüzde 1,52’ye çıkmıştır. Jeotermal kaynaklardan gerçekleştirilen elektrik üretiminin payı da yüzde 2,48’den yüzde 2,96’ya yükselmiştir. Buna karşın üretimdeki payları, örneğin doğal gazın aksine kapasitedeki payının altında, yüzde 32,4 seviyesinde seyretmektedir. Bunda iklim ve hava koşullarının yanında, tesislerin mevcut elektrik fiyatları seviyesinde çalışmasının ekonomik olarak rasyonel (verimli) olmaması gibi bir etken de bulunmaktadır [18].



Şekil 2: Yıllara göre kurulu güç gelişimi [8]

Tablo 1. Yıllar İtibariyle Türkiye Kurulu Gücünün Üretici Kuruluşlara Dağılımı [20]

YILLAR İTİBARIYLA TÜRKİYE KURULU GÜCÜNÜN ÜRETİCİ KURULUŞLARA DAĞILIMI							
Birim: MW							
KURULUŞLAR		2013	2014	2015	2016	2017	2018
EÜAŞ	TERMİK	8.148,9	7.849,9	7.274,9	6.938,9	7.017,3	5.662,3
	HİDROLİK+JEOTERMA L+RÜZGAR	12.917,8	12.995,2	13.003,6	13.166,0	12.882,5	12.826,6
	TOPLAM	21.066,7	20.845,2	20.278,6	20.105,0	19.899,8	18.488,9
EÜAŞ'IN BAĞLI ORTAKLIKLARI	TERMİK	2.714,0	1.034,0	44,0	0,0	0,0	0,0
MOBİL SANTRALLAR	TERMİK	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ÜRETİM ŞİRKETLERİ	TERMİK	24.293,1	32.258,3	33.881,2	36.770,5	39.087,9	38.970,8
	HİDROLİK+ JEOTERMAL+RÜZGAR	11.574,0	14.356,2	17.659,8	19.226,7	20.746,1	22.335,0
	TOPLAM	35.867,1	46.614,5	51.540,9	55.997,2	59.834,0	61.305,8
OTOPRODÜKTÖR+ İŞLETME HAKKI DEVİR	TERMİK	3.492,0	647,2	646,4	620,0	620,0	1.975,0
	HİDROLİK+ JEOTERMAL+RÜZGAR+ GÜNEŞ	867,7	326,2	326,2	857,5	1.200,9	1.411,7
	TOPLAM	4.359,7	973,3	972,5	1.477,5	1.820,9	3.386,7
LİSANSIZ	TERMİK	0,0	12,4	56,5	82,1	201,1	300,5
	HİDROLİK+ RÜZGAR+GÜNEŞ	0,0	40,4	254,1	835,5	3.444,2	5.051,9
	TOPLAM	0,0	52,8	310,7	917,6	3.645,3	5.352,4
TÜRKİYE TOPLAMI	TERMİK	38.648,0	41.801,8	41.903,0	44.411,6	46.926,3	46.908,6
	HİDROLİK+JEOTERMA L+ RÜZGAR+GÜNEŞ	25.359,5	27.718,0	31.243,7	34.085,8	38.273,7	41.642,1
	TOPLAM	64.007,5	69.519,8	73.146,7	78.497,4	85.200,0	88.550,8

Tablo 2. Türkiye ve Kişi Başına Kurulu Güç- Brüt Üretim- Arz- Net Tüketiminin Yıllar İtibariyle Gelişimi [20]

TÜRKİYE VE KİŞİ BAŞINA KURULU GÜÇ - BRÜT ÜRETİM - ARZ - NET TÜKETİMİNİN YILLAR İTİBARIYLA GELİŞİMİ (2010 - 2018)											
YILLAR	NÜFUS (x1000)	KURULU GÜÇ (MW)	BRÜT ÜRETİM (GWh)	ARZ (GWh)	BRÜT TALEP (GWh)	NET TÜKETİM	KİŞİ BAŞINA				
							KURULU GÜÇ (Watt)	BRÜT ÜRETİM (kWh)	ARZ (kWh)	BRÜT TALEP	NET
2010	73723	49524,1	211207,7	202272,3	210434,0	172050,6	672	2865	2744	2854	2334
2011	74724	52911,1	229395,1	218468,9	230306,3	186099,5	708	3070	2924	3082	2490
2012	75627	57059,4	239496,8	230580,4	242369,9	194923,4	754	3167	3049	3205	2577
2013	76668	64007,5	240154,0	235179,7	246356,6	198045,2	835	3132	3068	3213	2583
2014	77696	69519,8	251962,8	244706,1	257220,1	207375,1	895	3243	3150	3311	2669
2015	78741	73146,7	261783,3	253840,6	265724,4	217312,2	929	3325	3224	3375	2760
2016	79814	78497,4	274407,7	266829,5	279286,4	231203,7	984	3438	3343	3499	2897
2017	80811	85200,0	297277,5	283682,1	296702,1	249022,7	1054	3679	3510	3672	3082
2018	82004	88500,8	304801,9	289867,2	304166,9	258232,2	1079	3717	3535	3709	3149

Tablo 3. Yenilenebilir Kaynaklı Elektrik Enerjisi Üretiminin Türkiye Toplam Üretimi İçindeki Payının Yıllar İtibariyle Gelişimi [20]

YENİLENEBİLİR KAYNAKLI KURULU GÜCÜN TÜRKİYE TOPLAM KURULU GÜCÜ İÇİNDEKİ PAYININ YILLAR İTİBARIYLA GELİŞİMİ (2010-2018)								
Birim: MW								
YILLAR	HİDROLİK	JEOTERMAL	RÜZGAR	GÜNEŞ	BİYOKÜTLE	YENİLENEBİLİR KURULU GÜCÜ	TÜRKİYE TOPLAM KURULU GÜCÜ	YENİLENEBİLİRİN PAYI %
2010	15.831,2	94,2	1.320,2		85,7	17.331,3	49.524,1	35,0
2011	17.137,1	114,2	1.728,7		104,2	19.084,2	52.911,1	36,1
2012	19.609,4	162,2	2.260,6		147,3	22.179,5	57.059,4	38,9
2013	22.289,0	310,8	2.759,7		178,0	25.537,5	64.007,5	39,9
2014	23.643,2	404,9	3.629,7	40,2	227,0	27.945,0	69.519,8	40,2
2015	25.867,8	623,9	4.503,2	248,8	277,1	31.520,8	73.146,7	43,1
2016	26.681,1	820,9	5.751,3	832,5	363,8	34.449,6	78.497,4	43,9
2017	27.273,1	1.063,7	6.516,2	3.420,7	477,4	38.751,1	85.200,0	45,5
2018	28.291,4	1.282,5	7.005,4	5.062,8	621,9	42.264,0	88.550,8	47,7

Tablo 4. Yerli Kaynaklardan Elektrik Enerjisi Üretim Toplam Türkiye Üretimi İçindeki Payının Yıllar İtibariyle Gelişimi [20]

YERLİ ENERJİ KAYNAKLARINA AİT KURULU GÜCÜN TÜRKİYE TOPLAM KURULU GÜCÜ İÇİNDEKİ PAYININ YILLAR İTİBARIYLA GELİŞİMİ (2010-2018)										
										Birim: MW
YILLAR	HİDROLİK	JEOTERMAL	RÜZGAR	GÜNEŞ	ATIK ISI	LİNYİT	TAŞ KÖMÜRÜ+ ASFALTİT	YERLİ KAYNAK KURULU GÜCÜ	TÜRKİYE TOPLAM KURULU GÜCÜ	YERLİ KAYNAK PAYI %
2010	15.831,2	94,2	1.320,2		107,2	8.199,3	470,0	26.022,1	49.524,1	52,5
2011	17.137,1	114,2	1.728,7		125,7	8.199,3	470,0	27.775,0	52.911,1	52,5
2012	19.609,4	162,2	2.260,6		168,8	8.193,3	470,0	30.864,3	57.059,4	54,1
2013	22.289,0	310,8	2.759,7		235,0	8.223,2	470,0	34.287,7	64.007,5	53,6
2014	23.643,2	404,9	3.629,7	40,2	299,1	8.281,3	470,0	36.768,4	69.519,8	52,9
2015	25.867,8	623,9	4.503,2	248,8	370,1	8.663,4	755,0	41.032,2	73.146,7	56,1
2016	26.681,1	820,9	5.751,3	832,5	496,4	9.126,5	755,0	44.463,7	78.497,4	56,6
2017	27.273,1	1.063,7	6.516,2	3.420,7	641,9	9.129,1	782,5	48.827,2	85.200,0	57,3
2018	28.291,4	1.282,5	7.005,4	5.062,8	818,9	9.456,1	782,5	52.699,6	88.550,8	59,5

Tablo 5. Birincil Kaynaklara Göre Santral Adetleri ve Kurulu Güç

BİRİNCİL KAYNAK	SANTRAL ADEDİ	KURULU GÜÇ (MW)
Akarsu	543	7.842,1
Asfaltit Kömür	1	405
Atık Isı	75	339,2
Barajlı	122	20.582,2
Biyokütle	157	698,5
Doğalgaz	326	26.163,1
Fuel Oil	15	487,2
Güneş	6.410	5.513,3
İthal Kömür	14	8.938,9
Jeotermal	48	1.335,5
Linyit	48	10.097
LNG	1	2,0
Motorin	1	1,0
Nafta	1	4,7
Rüzgar	257	7.228
Taş Kömür	4	810,8
TOPLAM	8.023	90.448,7

Tablo 6. Yenilenebilir Enerji Kurulu Güç Payları

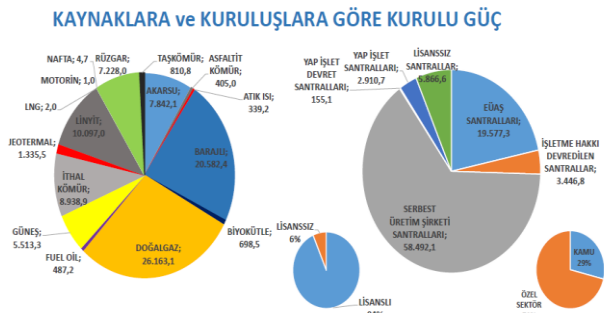
YIL	HİDROLİK	JEOTERMAL	RÜZGAR	GÜNEŞ	BIYOKÜTLE	TOPLAM
2001	11.673	18	19		10	11.719
2002	12.241	18	19		14	12.291
2003	12.579	15	19		14	12.626
2004	12.645	15	19		14	12.693
2005	12.906	15	20		14	12.955
2006	13.063	23	59		20	13.164
2007	13.395	23	148		21	13.587
2008	13.829	30	364		38	14.260
2009	14.553	77	792		65	15.487
2010	15.831	94	1.320		86	17.331
2011	17.137	114	1.729		104	19.084
2012	19.609	162	2.261		147	22.180
2013	22.289	311	2.760		178	25.945
2014	23.643	405	3.630	40	227	27.945
2015	25.868	624	4.503	249	277	31.521
2016	26.681	821	5.751	833	364	34.450
2017	27.273	1.064	6.516	3.421	477	38.751
2018	28.291	1.283	7.005	5.063	739	42.381

Tablo 7. Birincil Kaynaklara ve Kuruluşlara Göre Kurulu Güç (MW)

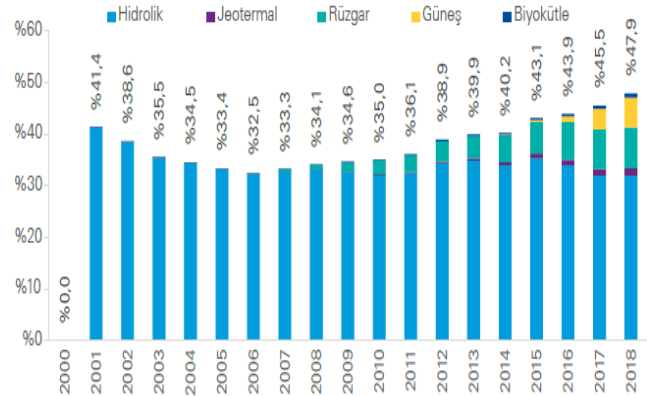
BİRİNCİL KAYNAK	EÜAŞ SANTRALLARI	İŞLETME HAKKI DEVREDİLEN SANTRALLAR	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETİ SANTRALLARI	YAP İŞLET DEVRET SANTRALLAR	YAP İŞLET SANTRALLAR	LİSANSIZ SANTRALLAR	TOPLAM
Akarsu	157,3	543,7	7.087,6	44,9	0,0	8,7	7.842,1
Asfaltit Kömür	0,0	0,0	405,0	0,0	0,0	0,0	405,0
Atık Isı	0,0	0,0	147,1	0,0	0,0	192,1	339,2
Barajlı	12.614,5	913,1	6.954,8	100	0,0	0,0	20.582,4
Biyokütle	0,0	0,0	626	0,0	0,0	72,5	698,5
Doğalgaz	4.933,3	0,0	19.476,1	0,0	1.590,7	102,9	26.163,1
Fuel Oil	0,0	0,0	487,2	0,0	0,0	0,0	487,2
Güneş	0,0	0,0	91,6	0,0	0,0	5.421,7	5.513,2
İthal Kömür	0,0	0,0	7.618,9	0,0	1.320,0	0,0	8.938,9
Jeotermal	0,0	15,0	1.320,5	0,0	0,0	0,0	1.335,5
Linyit	1.804,0	1.975,0	6.318,0	0,0	0,0	0,0	10.097,0
LNG	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	2,0
Motorin	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Nafta	0,0	0,0	4,7	0,0	0,0	0,0	4,7
Rüzgar	7,2	0,0	7.141,8	10,2	0,0	68,8	7.228,0
Taşkömür	0,0	0,0	810,8	0,0	0,0	0,0	810,8
TOPLAM	19.577,3	3.446,8	58.492,1	155,1	2.910,7	5.886,6	90.448,7

Tablo 8. Birincil Kaynaklara ve Kuruluşlara Göre Santral Adedi

BİRİNCİL KAYNAK	EÜAŞ SANTRALLARI	İŞLETME HAKKI DEVREDİLEN SANTRALLAR	SERBEST ÜRETİM ŞİRKETİ SANTRALLARI	YAP İŞLET DEVRET SANTRALLAR	YAP İŞLET SANTRALLAR	LİSANSIZ SANTRALLAR	TOPLAM
Akarsu	9	65	450	6	0	13	543
Asfaltit Kömür	0	0	1	0	0	0	1
Atık Isı	0	0	14	0	0	61	75
Barajlı	37	23	61	1	0	0	122
Biyokütle	0	0	117	0	0	40	157
Doğalgaz	7	0	287	0	1	31	326
Fuel Oil	0	0	15	0	0	0	15
Güneş	0	0	10	0	0	6.400	6.410
İthal Kömür	0	0	13	0	0	0	14
Jeotermal	0	1	47	0	0	0	48
Linyit	3	2	43	0	0	0	48
LNG	0	0	1	0	0	0	1
Motorin	1	0	0	0	0	0	1
Nafta	0	0	1	0	0	0	1
Rüzgar	1	0	177	1	0	78	257
Taşkömür	0	0	4	0	0	0	4
TOPLAM	58	91	1.241	8	2	6.623	8.023



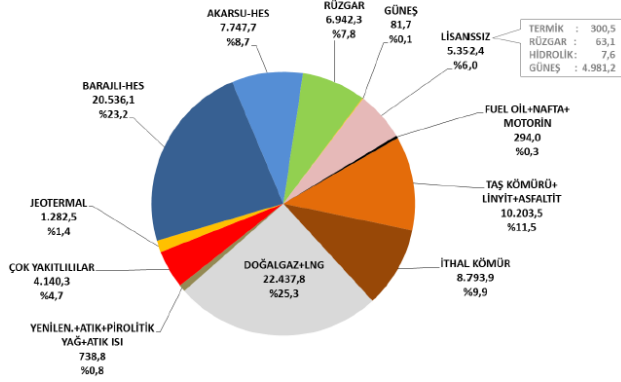
Şekil 3: Kaynaklara ve Kuruluşlara Göre Kurulu Güçler [8]



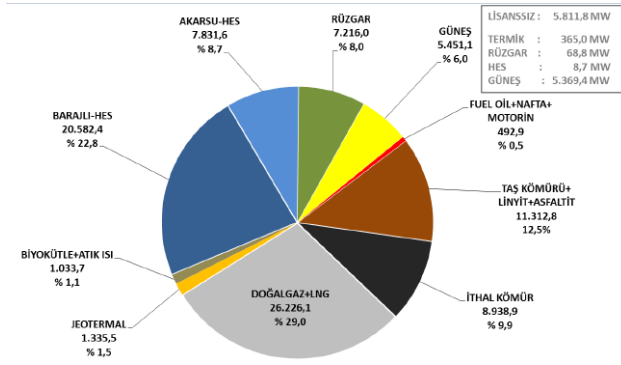
Şekil 4: Yenilenebilir Enerjinin Toplam Kurulu Güç İçindeki Payı [8]

Türk enerji sisteminin en önemli sorunu, ithal enerji kaynaklarına bağımlı olması, enerji tüketiminin fosil yakıt ağırlıklı olması ve diğer ülkelerle kıyaslandığında daha düşük enerji verimliliğine sahip olmasıdır. Enerjide dışa bağımlılığı azaltmak için yapılan planlı çalışmalar doğrultusunda 2017 yılı içerisinde yakıt türü olarak dışa bağımlılığı artıran doğal gaz ve kömür yakıtlı santrallerin kurulu güç içerisindeki payının 2016 yılına göre düştüğü yerli kaynaklara dayalı ve yenilenebilir enerji kaynaklı üretim kapasitesi arttırıldığı görülmüştür. Doğal gaz ve kömür kaynaklı santrallerin üretim kapasitesi geçmiş yıllara göre artıyor olsa da kurulu güç içerisindeki payları azalmaktadır. Fakat enerjideki yüksek talep artışlarına rağmen, 2018 yılı kurulu güç yaklaşık olarak 88.550 MW, 2019 yılı kurulu güç yaklaşık olarak

90.420 MW, aynı dönemdeki birincil enerji üretim artışları sadece %2,11 olarak gerçekleşmiştir (Şekil-5,6) Bu durum enerjide dışa bağımlılığı ülkenin sürdürülebilir kalkınmasını tehlikeye sokacak şekilde ekonominin en önemli sorunlarından biri haline getirecektir. Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli bakımından şanslı ülkeler arasında bulunduğu bilinmektedir [22]. Fakat, son zamanlarda konuyla ilgili birçok gelişme kaydedilmiş olmasına rağmen, yenilenebilir kaynakların ülke enerji karışımındaki payı birçok nedenden ötürü arzu edilen düzeye hâlâ erişememiştir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı gerek enerji arz sorunu gerekse çevresel kaygılar nedeniyle yenilenebilir enerjilerin payının artırılması konusunda oldukça kararlıdır.



Şekil 5: 2018 Yılı Kurulu Güç Toplam [8]



Şekil 6: 2019 Yılı Kurulu Güç Toplam [8]

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için öncelikle enerji arz güvenliği sağlanmalı ve etkin bir elektrik enerji üretim sistemi planlaması yapılmalıdır. Elektrik enerji üretim sistem planlamasının amacı kullanıcıların elektrik enerji tüketim taleplerini en ekonomik, güvenilir ve kaliteli bir şekilde karşılamaktır. Bundan ötürü doğru elektrik talep tahmini etkin bir elektrik enerji üretim sistem planlaması için önemli rol oynamaktadır. Elektrik enerjisi talep tahminlerinin doğru yapılabilmesi durumunda, elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemlerine yönelik hangi yatırımların ne şekilde ve ne zaman yapılması gerektiği belirlenebilmekte, elektrik enerjisi arz güvenliği için doğru yatırım kararları ve stratejiler geliştirebilmek mümkün olabilmektedir. Lineer/parametrik ve sezgisel (yapay zekâ algoritmaları) yöntemler olarak sınıflandırılan metotlar kullanılarak elektrik enerjisi talep tahminleri ve güç sistemi parametrelerinin optimum değerleri belirlenerek enerji şebekeleri en ekonomik ve kararlı şekilde sürdürülebilmektedir. Güç sistemlerinin optimizasyonunda özellikle lineer tanjant vektör yöntemi ve sezgisel yöntem olarak da Genetik algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemleri başarılı sonuçlar vermektedir [23,24,25].

5. Sonuç ve Tartışma

Dünyada ve Türkiye’de günümüzde kullanılmakta olan enerjinin çoğu birincil enerji kaynaklarından elde edilmektedir. Her ülkenin enerjiye olan talebi farklı oranlarda olsa da küresel ölçekte düşünüldüğünde bu oran sürekli artma eğilimindedir. Fosil yakıt rezervleri de bu talep karşısında hızla azalmaktadır. Bu talep artışını karşılamak için enerji yatırımlarının da hızla artış göstermesi gerekmektedir. Yatırımlardaki bu artış planlanırken de karbon salınımını en aza indiren yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilmelidir. Fosil yakıtlardan kaynaklanan küresel karbondioksit emisyonlarındaki artış 2000’li yıllarda %3’ün üzerinde iken, 2010’lardan itibaren yavaşlamış ve 2014-2016 arasındaki hafif bir artış dışında sabit kalmıştır. 2000-2017 yılları arasında ülkemizde kömür kaynaklı emisyon ortalama %5,4 oranında, petrolde ise %6,2 oranında büyüme kaydetmiştir. Dünya genelinde 2019 yılı toplam nüfus 7600 milyonu aşmaktadır. Bununla birlikte dünyada enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretim miktarı 25.000 TWh civarındadır. En fazla elektrik enerjisi tüketimi gerçekleştiren ülkeler olarak sırasıyla Çin, ABD, Japonya, Rusya gelmektedir. Türkiye 2019-2028 yılları arasında brüt elektrik tüketim tahmini ve yıllara göre artışları Tablo-5’de, senaryo bazlı talep gelişimi Şekil-7’de verilmektedir. Bu dönem için yük eğrisi karakteristiğinin değişmeyeceği kabulü ile puant yük serileri TEİAŞ tarafından hesaplanmış olup Türkiye puant tahmini Tablo 10’da verilmektedir. Tablo 9 incelendiğinde elektrik enerjisi talebinin, 2028 yılında düşük senaryo için ortalama %3,6 artış ile elektrik talebinin yaklaşık 428 milyar kWh’i aşması; baz senaryo için ortalama %4,2 artış ile elektrik talebinin yaklaşık 451 milyar kWh’i aşması; yüksek senaryo için ortalama %4,8 artış ile elektrik talebinin yaklaşık 477 milyar kWh’i aşması beklenmektedir. Belirli bir anda talep edilen en yüksek elektrik enerjisi talebi (puant talep) 2017 yılında 47.660 MW olarak gerçekleşmiş olup Tablo 6 incelendiğinde; 2028 yılında düşük senaryo için 67.984 MW; baz senaryo için 71.621 MW; yüksek senaryo için 75.716 MW olacağı öngörülmektedir. Türkiye’nin yıllık enerji gelişiminde artış gösterdiği grafiklerden görülmektedir. Bu durum, uygulanan enerji politikasının yükselen ivmeli olduğunun belirtisidir. Ancak aynı zamanda, şu anki enerji üretim potansiyelinin çok büyük bir yüzdesinin fosil kaynaklı yakıtlara dayalı olduğu düşünüldüğünde ise enerjide dışa bağımlılığın arttığı da göstergesidir. Fosil yakıtı dayalı olan enerji kullanımının; çevre kirliliği, rezervlerdeki azalış, atmosferde oluşan sera etkisi, doğal bitki örtüsü ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri gibi önemli nedenlerle, hızla yeni enerji kaynakları bulunması zorunluluğu doğmaktadır. Günümüzde toplam enerji kullanımında %5 gibi düşük seviyelerde kalan güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Ülkeler özellikle sıfır salınımı olan yenilenebilir enerji kaynaklarını, güvenilir, ekonomik, kaliteli ve serbest piyasa mekanizması ile ekonomiyeye kazandırılmasına, enerji üretim teknolojilerini bu yönde geliştirmeye, üretim ile tüketimini teşvik edici çeşitli politikaların oluşturulmasına hız vermişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynak potansiyeli açısından Türkiye’nin bu kapasitesini değerlendirebilmesi için mevcut teşvik sistemi ve hukuki yapı çerçevesinde var olan düzenlemeleri genişleterek devam ettirmesi gerekmektedir. Ekonominin önümüzdeki on yıl içerisinde hızlı bir şekilde büyümesi durumunda mevcut üretimin yetersiz olacağı ve enerji üretimindeki birim maliyeti artıracığı ön görülmektedir.

Tablo 9: 2019-2028 Yılları Brüt Elektrik Tüketim Tahmini

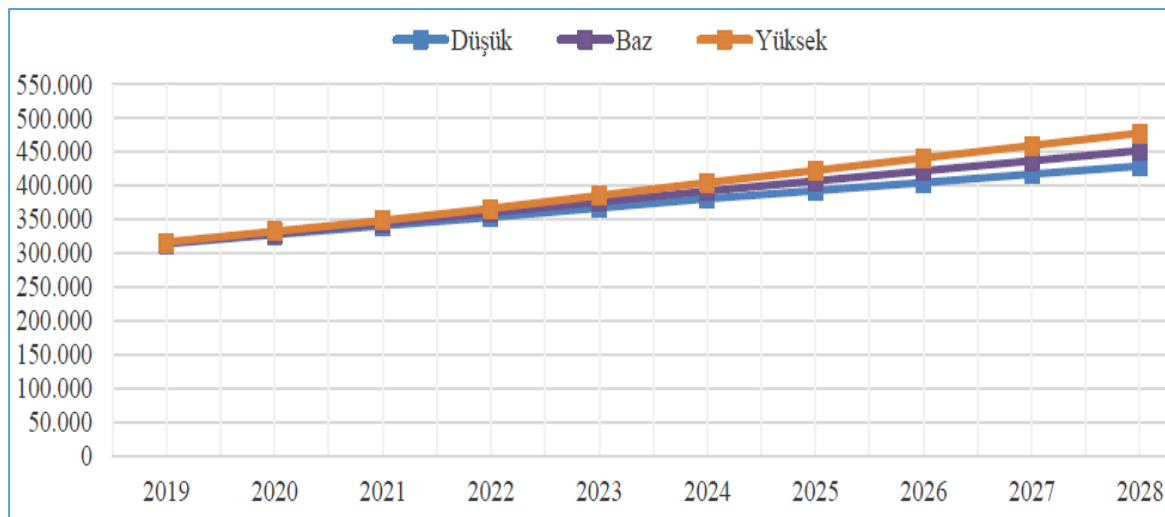
YIL	DÜŞÜK	ARTIŞ (%)	BAZ	ARTIŞ (%)	YÜKSEK	ARTIŞ (%)
2019	313.832	4,6	315.182	5,0	316.503	5,5
2020	327.285	4,3	329.603	4,6	332.057	4,9
2021	340.511	4,0	344.407	4,5	348.662	5,0
2022	353.200	3,7	359.593	4,4	366.385	5,1
2023	366.767	3,8	375.821	4,5	385.177	5,1
2024	380.401	3,7	392.105	4,3	404.287	5,0
2025	392.610	3,2	406.939	3,8	422.303	4,5
2026	404.628	3,1	421.754	3,6	440.654	4,3
2027	416.619	3,0	436.632	3,5	458.917	4,1
2028	428.791	2,9	451.729	3,5	477.553	4,1

Tablo 10: 2019-2028 Yılları Türkiye Puant Tahmini (MW)

YIL	DÜŞÜK	ARTIŞ (%)	BAZ	ARTIŞ (%)	YÜKSEK	ARTIŞ (%)
2019	49.758	4,6	49.972	5,0	50.181	5,5
2020	51.891	4,3	52.258	4,6	52.647	4,9
2021	53.988	4,0	54.605	4,5	55.280	5,0
2022	56.000	3,7	57.013	4,4	58.090	5,1
2023	58.150	3,8	59.586	4,5	61.069	5,1
2024	60.312	3,7	62.168	4,3	64.099	5,0
2025	62.248	3,2	64.520	3,8	66.956	4,5
2026	64.153	3,1	66.869	3,6	69.865	4,3
2027	66.055	3,0	69.228	3,5	72.761	4,1
2028	67.984	2,9	71.621	3,5	75.716	4,1

Türkiye'nin gelecekteki enerji talebinde diğer gelişmiş ülkelere benzer bir şekilde büyük bir artış olabileceği tespit edilmiştir. Ancak petrol ve doğal gaz gibi birincil kaynaklara dayalı enerji talebinde çok ciddi bir değişme olmayacağı sonucuna varılmıştır. Özellikle enerji üretim yelpazesinin değişmesi, yenilenebilir enerjilere dayalı enerji üretiminin artması, düşük karbon yoğunluklu enerji üretimine geçilmek istenmesi, enerji güvenliği konusundaki endişeler ve çevresel duyarlılıkların artması birincil enerji arzına dayalı olarak beklenen talebin artış göstermemesinin sebepleri arasında gösterilebilir.

Türkiye'nin enerji üretiminde birim maliyetini büyük oranlarda düşürecek ve enerjide dışa bağımlılığı azaltacak en önemli çözüm olarak yerli kaynak kullanımı ve yenilenebilir enerjiye yönelik yatırımların artırılması gerekmektedir. Bu yatırımlar, enerji arz güvenliği, kesintisiz ve kaliteli enerji gibi birçok alanda da son derece önemli katkılar sağlayacaktır. Böylece Türkiye enerjide kendi kendine yetebilen ve dışa bağımsız bir ülke konumuna gelecek enerji ticaretinde merkez ve köprü olma yolunda yol alabilecektir.



Şekil 7: 2019 – 2028 Yılları Senaryo Bazlı Türkiye Talep Tahmini (GWh) [21]

6. Kaynaklar

- [1] S. Yapraklı, ve Ç. Yurttañıkıma "Elektrik Tüketimi ile Ekonomik Büyüme Arasındaki Nedensellik: Türkiye Üzerine Ekonometrik Bir Analiz", C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 13 (2), 195-215, 2012.
- [2] G. Altınay, ve E. Karagöl "Electricity Consumption and Economic Growth: Evidence from Turkey", Energy Economics, 27, 849-856, 2005.
- [3] A. Shiu, and P.L. Lam "Electricity Consumption and Economic Growth in China", Energy Policy, 32, pp47-54, 2004.
- [4] S. Ghosh, "Electricity Consumption and Economic Growth in India", Energy Policy, 30, pp125-129, 2002.
- [5] C.B.L. Jumbe, "Cointegration and Causality Between Electricity Consumption and GDP: Empirical Evidence from Malawi", Energy Economics 26, pp61-68, 2004.
- [6] S.T. Chen, H. Kuo, and C.C. Chen "The Relationship between GDP and Electricity Consumption in 10 Asian Countries", Energy Policy, 35, pp2611-2621, 2007.
- [7] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı İşletme Faaliyetleri Raporu, 2017.
- [8] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı Kurulu Güç Raporu, 2019.
- [9] Enerji Bakanlığı İstatistikleri, 2014.
- [10] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi sektör raporu, 2019.
- [11] International Energy Agency IEA statistics: World energy balances overview, 2017.
- [12] International Energy Agency IEA statistics: Key World Energy Statistics freepublications, 2017.
- [13] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığı ile Bağlı, Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü raporu, 2017.
- [14] Türkiye Petrolleri Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu, Mayıs 2017.
- [15] Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı, "Enerji Dengesi," Denge-Tabloları, 2016.
- [16] Türkiye Elektrik İletim A.Ş., Elektrik İstatistikleri, Türkiye Aylık Elektrik Enerjisi İstatistik Raporu, 2018.
- [17] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Bağlı, ilgili ve ilişkili Kuruluşlarının Amaç ve Faaliyetleri, 2016.
- [18] KPMG Sektörel Bakış Enerji raporu, 2019.
- [19] Dünya Enerji Konseyi Türkiye REN21 Yenilenebilir Küresel Durum Raporu, 2019.
- [20] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi şeffaflık platformu Web Sayfası <https://www.teias.gov.tr/>, 2019.
- [21] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi 10 Yıllık Talep Tahminleri Raporu, 2019-2028.
- [22] V.Ş.Ediger, and E. Kentel, "Renewable energy potential as an alternative to fossil fuels in Turkey", Energy Conversion and Management, 40 (7) : pp743-55, 1999.
- [23] Bakır, "Güç Sistemlerinde FACTS Cihazlarının Optimal Yerleşim Noktalarının Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [24] R. Idris, A. Khairuddin and M. Mustafa, "A multi-objective Bees Algorithm for optimum allocation of FACTS devices for restructured power system," TENCON IEEE Region 10 Conference, Singapore, pp1-6, 2009.
- [25] H. Shaheen, G. Rashed and S. Cheng, "Optimal location and parameters setting of unified power flow controller based on evolutionary optimization techniques," Power Engineering Society General Meeting IEEE, Tampa, USA, pp1-8, 2007.

Hamza Feza CARLAK



2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde lisans derecesini ve 2012 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Bütünleşik Doktora derecelerini almıştır. 2003-2013 yılları arasında Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2017 yılından bu yana Akdeniz Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. 40'dan fazla makalenin yazarı olup, tıbbi görüntüleme üzerine bir buluşa sahiptir. Araştırma alanları arasında güç sistemleri, tıbbi görüntüleme, termal görüntüleme, görüntü işleme, yenilenebilir enerji ve yapay sinir ağları bulunmaktadır.

Ergin KAYAR



2017 yılında, Akdeniz Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans derecesini almış olup 2020 yılında Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans derecesini almıştır. Türkiye Elektrik Enerjisi İletim Kurumu'nda (TEİAŞ) Elektrik Mühendisi olarak 10 yıldır görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında enerji sistemleri, yenilenebilir enerji ve enerji iletim sistemleri bulunmaktadır.

Niyazi İL



2007 yılında Çukurova Üniversitesi'nden Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak mezun oldu. Yüksek Lisans Öğrenimini 2015 yılında Akdeniz Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında tamamladı. 2013 yılından bu yana TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Antalya Şubesinde Teknik Müdür olarak görev yapmaktadır. 2016 yılından bu yana Akdeniz Üniversitesi Mimarlık Fakültesi'nde Enerji ve İletişim dersini vermektedir. 2017 yılından bu yana Akdeniz Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora öğrenimine devam etmektedir. Elektromanyetik alanlar, elektromanyetik alanların biyolojik etkileri, elektromanyetik girişim ve ekranlama konularında çalışmalar yapmaktadır.

