

PV Güneş Enerjisi Santralleri için Üretim Tahmin Sistemi Generation Forecast System for PV Plants in Turkey

Yunus Can Ölmez¹, İsmail Elma¹, Ceyhun Cengiz², Osman Tozlu²

¹Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Enerji Teknolojileri
yunus.olmez@tubitak.gov.tr , ismail.elma@tubitak.gov.tr

²Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
ceyhun.cengiz@teias.gov.tr , osman.tozlu@teias.gov.tr

Özet

Ülkemiz elektrik sistemine son 6 yıllık süreçte önemli oranda PV bazlı güneş üretim tesisi eklenmiş ve güneş kaynaklı kurulu güç yaklaşık 8650 MW seviyesine ulaşmıştır. Son 5 yılda PV bazlı kurulu gücün ortalama artış oranının %60 olduğu göz önüne alındığında, artışın önümüzdeki dönemde de devam edeceği öngörülmektedir. Bu durum güvenli ve kararlı bir şebeke işletimi için güneş enerjisi santrallerinin üretim değerlerini izleme ve tahmin etme ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Çalışmada fotovoltaik bazlı güneş santrallerinin bilgileri (konum, eğim, PV teknolojisi vb.) ve meteorolojik veriler (güneş ışınımı, hava sıcaklığı vb.) kullanılarak üretim değerlerinin öngörülebilir hale getirmek için geliştirilen sistem ve yaklaşımdan bahsedilmektedir. Önümüzdeki 72 saat periyodu için periyodik olarak çalışan bu altyapı sayesinde sistem operatörünün gün içi ve gün öncesi işletme planları oluşturulabilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen sistem meteorolojik ölçüm altyapısı bulunan 6 MW Kurulu gücündeki Ceylanpınar MILGES tesisi için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında geliştirilen sistemin güneş enerjisi santralleri üretimini izleme ve planlama noktasında sistem işletmesine önemli bir yardım aracı olarak devreye alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Üretim tahmin, PV, Üretim

Abstract

In Turkey, significant amount of PV-based solar production facilities has installed in the last 6 years, and the installed power for solar resources has reached the level of approximately 8650 MW. Considering that the average increase rate of PV-based installed power has been 60% in the last 5 years, it is predicted that the increase will continue in the coming period. In this regard, it is clear that PV generation forecast will be an inevitable part of grid operations in order to maintain

safe and stable grid operation. In this study, PV generation forecast and monitoring tool developed for Turkish TSO is given. Based on PV physical forecast methodology, the system is fed with locational and structural information of plants (position, slope, PV technology, etc.) and meteorological data (solar radiation, air temperature, etc.). The system works on a daily basis and outputs PV forecast for the next 72-hour period, that is significant for the system operator to plan intraday and day ahead operations. The developed system has been tested for the Ceylanpınar MILGES facility who has 6 MWs of installed power and equipped with meteorological measurement infrastructure. In the light of the results obtained, developed system was approved to be taken into service by Turkish TSO. Additionally, it can be expressed that the developed system can be successfully utilized for PV generation forecast and monitoring tool for grid operation and planning.

Keywords: PV generation forecast, PV, Generation

Terimler

GMT: Ulusal saatin bulunduğu zaman dilimi
lat: Santralin bulunduğu konumun enlem değeri (°)
lon: Santralin bulunduğu konumu boylam değeri (°)
LSTM: Ulusal saatin referans alındığı boylam değeri
LT: Ulusal saatin ondalık karşılığı
d: Yılın günü
 ω : Güneş saati
m: Hava kütlesi
ws: Rüzgâr hızı (m/s)
 ρ : Yüzey yansıtma katsayısı
 γ : Santral panellerinin bakışı $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$
 γ_s : Güneş azimut açısı $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$
 δ : Dünyanın eksen eğikliği (°)
 β : Panelin yatay eksen ile yaptığı açı (°)
 θ : Güneşin panele geliş açısı (°)

θ_s : Zenit açısı, güneşin geldiği yön ile yatay düzlemin normali ile arasındaki açı (°)

M_t : Havanın açıklık endeksi

I_H : Yatay eksene düşen toplam ışınım (W/m^2)

I_{β} : Panel üzerine düşen toplam ışınım (W/m^2)

I_a : Yatay eksene düşen dağılan ışınım (W/m^2)

$I_{a,\beta}$: Panel üzerine düşen dağılan ışınım (W/m^2)

I_b : Yatay eksene düşen direkt ışınım (W/m^2)

$I_{b,\beta}$: Panel üzerine düşen direkt ışınım (W/m^2)

$I_{r,\beta}$: Panel üzerine düşen yansayan ışınım (W/m^2)

I_{sc} : Güneş sabiti ($1367 W/m^2$)

I_o : Atmosfer dışına saatlik düşen ışınım miktarı (W/m^2)

E_o : Dünyanın eksen eğikliğinden kaynaklı düzeltme faktörü

P_{β} : Tahmin edilen PV üretimi (kW)

P_{ins} : Tahmin edilecek PV santralinin kurulu gücü (kW)

T_{amb} : Ortam sıcaklığı (°C)

T_{mod} : Modül sıcaklığı (°C)

U_o, U_1 : Panel sıcaklığının hesaplanmasında kullanılan katsayılar

RR : Yansıtma faktörü

1. Giriş

Türkiye’de kurulan güneş santrallerinin hızla artması ile birlikte 2022 yılının Ağustos ayı itibariyle yaklaşık 8650 MW kurulu gücünde güneş santralinin şebekeye bağlantısı tamamlanmıştır [1]. Hızla artan bu kurulu gücün 1250 MW’lık kısmı lisanslı santrallerden (38 adet) oluşurken 7400 MW’lık kısmı ise şebekede dağıtık halde bulunan lisanssız santrallerden (8844 adet) oluşmaktadır. Son yıllarda teknolojinin gelişimi, yenilenebilir ve yeşil şebeke etkisiyle hızla artan lisanssız güneş enerjisi santrallerinin kurulu gücündeki artışların devam etmesi beklenmektedir. Öte yandan, lisanssız güneş enerjisi santrallerinin toplam kurulu gücündeki hızlı artış, bu santrallerin üretim değerlerini izleme, gün içi ve gün öncesi işletme operasyonlarını planlamak için tahmin etme ihtiyaçlarını da beraberinde getirmektedir.

Ülkemizde büyük çoğunluğunu fotovoltaik güneş santrallerin oluşturduğu (% 91.8) lisanssız santrallerin çoğu dağıtım sistemine gömülü ve dağıtık bir yapıda bulunmaktadır. Bu durum lisanssız santrallerin üretimlerini anlık olarak takip edebilmek için ölçüme dayalı merkezi bir izleme altyapısı oluşturmayı oldukça zorlaştırmaktadır. Nitekim bu dağıtık yapı için izleme altyapısı maliyetli, bakımı ve işletimi zor bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte gün öncesinde sistem işletmesinin güvenli ve ekonomik bir şekilde planlanabilmesi için üretimdeki payı gittikçe artan bu kaynağın tahmini elzem hale gelmiştir.

Bu ihtiyaca binaen TEİAŞ ile TÜBİTAK MAM arasında imzalanan Yük Tevzi Teknik Danışmanlık Projesi kapsamında güneş enerjisi santrallerin üretiminin tahmin edilmesi amacıyla meteorolojik verilere ve fiziksel modellemeye bağlı bir güneş üretim tahmin yazılımı hazırlanmıştır. Geliştirilen yazılım TEİAŞ tarafından kullanılan TEİAŞ Yük Tevzi Bilgi Sistemi (YTBS) üzerinde hizmet vermektedir. Bu uygulama ile sistem

operatörünün sistemin üretim değerlerini daha doğru bir şekilde elde edebilmesi ve gün sonrası üretim tahminini daha tutarlı bir şekilde yapması amaçlanmıştır.

Geliştirilen tahmin algoritması ile fotovoltaik bazlı güneş enerjisi santrallerinin anlık üretim verilerini uzaktan izlemeli sayaç sistemleri kurulumu gerçekleştirilmeden, santrallerin bilgileri (konum, panel eğimi, panel bakışı, PV teknolojisi vb.) ve meteorolojik tahmin verileri (güneş ışınımı, hava sıcaklığı, vb.) kullanılarak üretim değerlerini öngören sistem geliştirilmiştir. Bu sayede fotovoltaik santrallerin üretime dair verileri tahmin edilerek üretim istatistiklerine lisanssız güneş enerjisi santrallerinin dâhil edilmesi sağlanmıştır. Tahmin edilen lisanssız güneş enerjisi santralleri üretimi ile sistem operatörleri tarafından yürütülen gün sonrası işletme planları için öngörülen üretim tahmini performansının artması beklenmektedir.

Çalışmada öncelikle güneş enerjisi santralleri için üretim hesaplama yöntemleri verilmiş ve bu kapsamda geliştirilen metodoloji ile ilgili bilgiler aktarılmıştır. Sonrasında geliştirilen sistem ile ilgili bilgiler verilerek test ve doğrulama çalışmaları aktarılmıştır.

2. Geliştirilen Algoritma

Fotovoltaik güneş santrallerinin üretimi panel üzerine düşen ışınım ve panel sıcaklığı olmak üzere iki temel parametreye bağlıdır. Meteorolojik tahminler kapsamında sağlanan hava sıcaklığı ve rüzgâr hızı bilgisine istinaden panel sıcaklığı hesaplanabilmektedir.

Meteorolojik tahminlerinden elde edilen verilerde yatay eksene düşen ışınım, hava sıcaklığı ve rüzgâr hızı verileri bulunmaktadır. Dolayısıyla yatay eksene düşen ışınımdan panel üzerine düşen ışınımın hesaplanması gerekmektedir. Bu dönüşümde konum, tarih, saat, panel eğimi, panel bakışı gibi pek çok parametreye ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1. Metodoloji

Güneş enerjisi santrallerinin üretim tahminindeki iki önemli parametre panel üzerine düşen ışınım ve panel sıcaklığıdır. Bu kapsamda üretim tahmin hesaplamasının önemli bir kısmını yatay eksene düşen ışınımın panel üzerine düşen ışınımına çevrilmesi oluşturmaktadır. Bu dönüşümde konum, saat, tarih, vb. birçok parametre önemli rol oynamaktadır.

Bu kapsamda ilk olarak yerel saatin konuma ve tarihe göre güneş saatine çevrilmesi gerekmektedir. Aşağıdaki formüller kullanılarak bu dönüşüm sağlanmıştır [2].

$$LT = \text{Yerel saat} + \text{Yerel dakika} / 60 \quad (1)$$

$$LSTM = GMT \times 15 \quad (2)$$

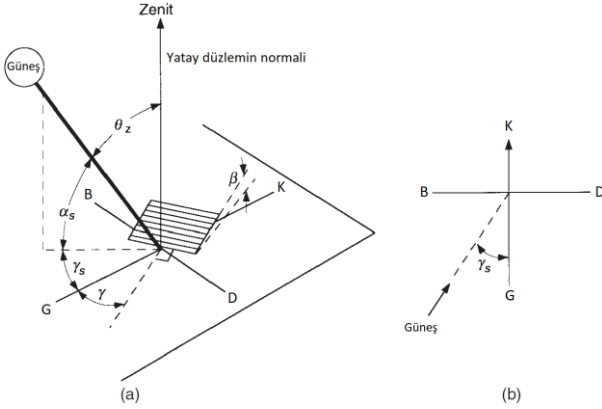
$$EoT = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (3)$$

$$B = \frac{360}{365} (d - 81) \quad (4)$$

$$LST = LT + \frac{4}{60} (lon - LSTM) + \frac{EoT}{60} \quad (5)$$

$$\omega = 15 \times (LST - 12) \quad (6)$$

Yatay eksene düşen ışınımı panel üzerine düşen ışınımına çevirmek için önemli olan bir diğer parametre zenit açısı ve güneşin panele geliş açısıdır. İlgili hesaplamalar süresince kullanılan tüm açılar Şekil 1'de sunulmuştur [3].



Şekil 1. (a) Zenit açısı, panel eğimi, yüzey bakışı ve güneş azimut açısı (b) güneş azimut açısının kuşbakışı görünümü

Zenit açısı ve diğer önemli açıların hesaplamasında kullanılan bir diğer parametre ise dünyanın eksen eğikliğidir. Dünyanın eksen eğikliği, zenit açısı ve güneşin geliş açısı aşağıdaki formüllere göre hesaplanır.

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(360 \frac{d + 284}{365}\right) \quad (7)$$

$$\cos(\theta_z) = \cos(lat) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(lat) \sin(\delta) \quad (8)$$

Yatay eksene düşen ışınımı panel üzerine düşen ışınımına dönüştürmek için literatürde kullanılan farklı yöntemler bulunmaktadır. Geliştirilen algorithmada yatay eksene düşen ışınım ayrıştırılarak dağılan ve direkt ışınımına dönüştürülmekte ardından ayrı ayrı panele düşen ışınımına çevrilmektedir. Ayrıştırma sürecinde “Muneer’s Model” yöntemi kullanılmaktadır [4]. Bu yöntem ile ayrıştırılan ışınım için gerekli parametreler ve hesaplamalar aşağıda yer almaktadır.

$$0 \leq M_t \leq 0.175 \text{ ise } I_d = (0.95) \times I_H \quad (9)$$

$$0.175 < M_t \leq 0.775 \text{ ise} \quad (10)$$

$$I_d = (0.97 + 0.44M_t - 3.45M_t^2 + 2.19M_t^3) \times I_H$$

$$0.775 < M_t \leq 1 \text{ ise } I_d = (0,26) \times I_H \quad (11)$$

$$M_t = I_H / I_0 \quad (12)$$

Yataya düşen dağılan ve direkt ışınımın panele düşen ışınımına çevrilmesi için “Perez Model” yöntemi kullanılmıştır [5]. Panel üzerindeki dağılan, direkt ve yansıyan ışınım için gerekli parametreler ve hesaplamalar aşağıda yer almaktadır.

$$I_{b,\beta} = I_b \times \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (13)$$

$$I_{r,\beta} = I_H \times \rho \times \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (14)$$

$$I_{d,\beta} = I_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} (1 - F_1) + F_1 \frac{a_1}{a_2} + F_2 \sin(\beta) \right) \quad (15)$$

$$a_1 = \max(0, \cos(\theta)) \quad (16)$$

$$a_2 = \max(\cos 85^\circ, \cos(\theta_z)) \quad (17)$$

$$F_1 = \max(0, [F_{11} + F_{12}\Delta + F_{13}\theta_z \frac{\pi}{180}]) \quad (18)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22}\Delta + F_{23}\theta_z \frac{\pi}{180} \quad (19)$$

$$\Delta = m I_d / I_0 \quad (20)$$

$$m = 1 / \cos(\theta_z) \quad (21)$$

$$\varepsilon = 1 / \text{kapalılık} \quad (22)$$

(18) ve (19)'da yer alan katsayılar hava açıklık indeksi olan ε değerine göre değişmektedir

Belirlenen üç ayrı ışınım değerinin toplamı (dağılan, direkt ve yansıyan) panel üzerine düşen toplam ışınım değerini vermektedir.

$$I_\beta = I_{d,\beta} + I_{b,\beta} + I_{r,\beta} \quad (23)$$

Panel üzerine düşen ışınım belirlenmesinin ardından toplam üretimin tahmin edilmesi için aşağıdaki formül kullanılmıştır. Formülde kullanılan panel sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızına göre belirlenmektedir [6].

$$T_{mod} = T_{amb} + \frac{I_\beta}{U_o + U_1 \times ws} \quad (24)$$

$$P_\beta = (1 - RR) \times \frac{I_\beta}{1000} P_{ins} (1 + k_1 A + k_2 A^2 + k_3 T_{mod} + k_4 T_{mod} A + k_5 T_{mod} A^2 + k_6 T_{mod}^2) \quad (25)$$

$$A = \ln\left(\frac{I_\beta}{1000}\right) \quad (26)$$

(25)'de verilen yaklaşım ile PV panellerin toplam DC üretim tahmini invertör verimliliği ve santral iletim kaybı parametreleri ile harmanlanarak santral AC üretim tahmini elde edilir.

3. Doğrulama Çalışması

Geliştirilen modelin doğruluğunu saptayabilmek adına güneş ışınım ölçümü bulunan ve santral teknik

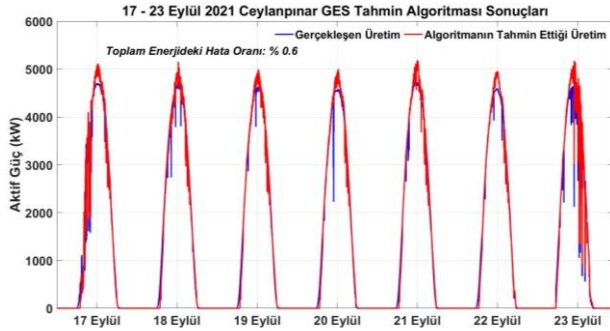
parametrelerinin sağlıklı bir şekilde elde edilebildiği MİL-GES Ceylanpınar santrali seçilmiştir [7]. MİL-GES Ceylanpınar santrali Şanlıurfa'da kurulan 6 MW'lık bir santraldir ve santralin teknik parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Ceylanpınar Güneş Enerjisi Santralinin Özellikleri

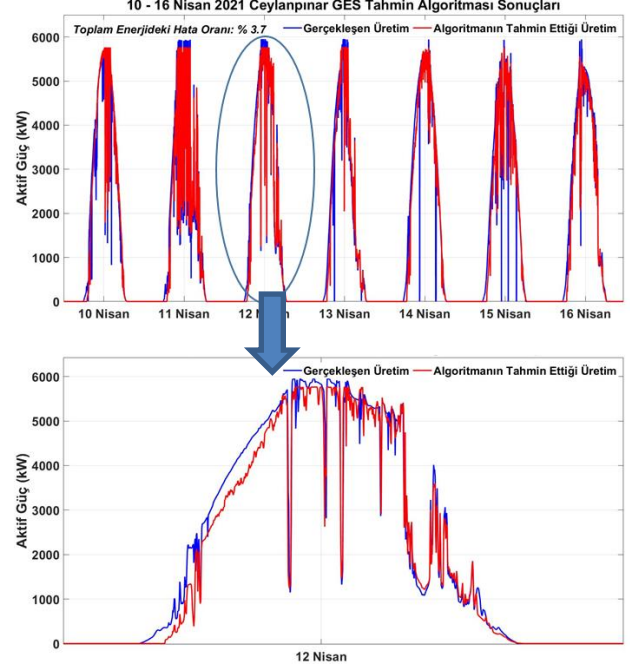
| | |
|-----------------------------|-------------------|
| Enlem | 36.810 |
| Boylam | 39.634 |
| Panel Bakışı | Güney |
| Panel Eğimi | 25° |
| İnvertör Verimliliği | % 98 |
| Sistem Kaybı | % 2 |
| Panel Türü | Sabit Panel |
| Panel Teknolojisi | Cadmium Telluride |
| Santral DC Gücü | 6000 kW |
| Santral AC Gücü | 6000 kW |

Tablo 1'de belirtilen santral özellikleri ve santral alanından elde edilen yatay eksene düşen güneş ışınımı, sıcaklık ve rüzgâr hızı parametreleri ile güneş üretim tahmin algoritması çalıştırılmıştır.

Ceylanpınar GES'te 17-23 Eylül 2021 ve 10-16 Nisan 2021 tarihleri arasında gerçekleşen üretim ve geliştirilen algoritmanın tahmin ettiği üretimler sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir



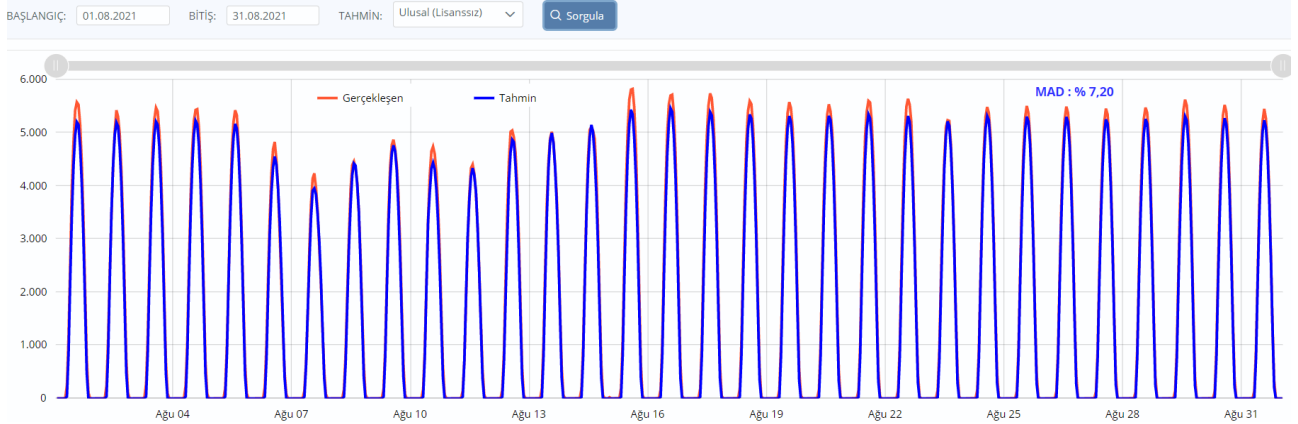
Şekil 3. 17-23 Eylül 2021 Ceylanpınar GES Gerçekleşen Üretim ile Tahmin Algoritması Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 4. 10-16 Nisan 2021 Ceylanpınar GES Gerçekleşen Üretim ile Tahmin Algoritması Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tahmin algoritmasının gerçekleşen üretim değerlerine oldukça yakın olduğu Şekil 3'den görülebilmektedir. Sabah ve akşam saatlerindeki aktif güç artış ve azalış hızlarının sağlıklı bir şekilde yakalandığı ve tepe değerine de oldukça yakın olduğu görülmüştür. 2021 yılı 17-23 Eylül haftasındaki toplam enerjideki hata oranının % 0.6 olduğu görülmüştür. Benzer şekilde Şekil 4 incelendiğinde bulutlu olan bir haftada da algoritmanın güzel sonuçlar verdiği ve 2021 yılı 10-16 Nisan haftasındaki toplam enerjideki hata oranının da % 3.7 olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen doğrulama çalışmasının sonuçları incelendiğinde gerçekleşen üretim profiline olan benzerlik, tepe noktaları, aktif güç artış/azalış hızları ve toplam hata oranları açısından değerlendirildiğinde geliştirilen algoritmanın başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 2. Geliştirilen Algoritma Son Kullanıcı Ara Yüzü Örneği

PV-GES Üretim Tahmin Sistemi kapsamında Türkiye elektrik sisteminde mevcut 38'i lisanslı 8844'i lisanssız olmak üzere toplam 8882 güneş enerjisi santraline dair üretim tahminleri oluşturulmaktadır. Bu kapsamda, söz konusu santrallere ait verilerin dağıtım şirketleri aracılığıyla TEİAŞ tarafından derlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu süreç sonunda santral verileri büyük oranda kayıt altına alınmış olmakla birlikte santral verisi eksik olan santraller de bulunmaktadır.

Santral verisi eksik olan santrallerde de üretim tahmininin gerçekleştirilmesi ve sistemin tam anlamıyla çalışabilmesi amacıyla her bir santral parametresinin varsayılan değerlerinin belirlenmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda toplam güneş kurulu gücünün yaklaşık %35'ine ait parametreler için santraller tarafından gönderilen veriler kullanılmıştır. Diğer santral parametreleri için ise varsayılan değerler kullanılmıştır. Bu doğrultuda sistemin çalıştırılmasının ardından lisanssız güneş enerjisi santrallerinin 2021 yılındaki Ağustos ayındaki saatlik üretimi % 7.2 hata oranı ile tahmin edilmiş olup tahmin edilen üretim Şekil 4'de gösterilmektedir.

4. Sonuçlar

Lisanssız güneş enerjisi santrallerin kurulu gücünün şebekede hızlı bir şekilde artması bu santrallerin üretimini izleme ve tahmin etme ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Bu santrallerin her birine izleme sistemi kurmak ekonomik açıdan uygun olmayacağı için bu santrallerinin üretimlerinin tahmin edilmesinin daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda Türkiye elektrik sistemi operatörü olan TEİAŞ'ın ihtiyaçları doğrultusunda güneş enerjisi santrallerin üretimlerini tahmin eden algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma ile Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen yatay eksene düşen güneş ışınımı, sıcaklık ve rüzgâr hızı tahmin verileri ile fotovoltaik güneş santrallerinden elde edilen santrale özgü parametreler kullanılarak gün sonrası için bu santrallerin üretimleri tahmin edilmektedir.

6 MW kurulu güce sahip bir güneş enerjisi santralinde meteorolojik ölçümler ve santral parametreleri kullanılarak algoritma doğruluk çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, bulutluluğun yoğun olduğu 10-16 Nisan 2021 dönemi için enerjideki toplam hata oranı %3.7, bulutsuz bir dönem olarak gözlemlenen 17-23 Eylül 2021 dönemi için enerjideki toplam hata oranının %0.7 olduğu gözlemlenmiştir.

Geliştirilen sistem ile üretim istatistikleri daha doğru bir şekilde tahmin edilmekte ve gün sonrası üretim planı sistem operatörü için daha öngörülebilir olmaktadır. Bununla birlikte sistemdeki lisanslı PV üretim santrallerinin sayısı arttıkça ve bu santrallere yönelik izleme altyapıları ile bağlantı sağlandıkça alınan geri

beslemeler doğrultusunda algoritmanın hata payı düşürülebileceği açıktır.

5. Teşekkür

Bu çalışmada ele alınan güneş üretim tahmin sistemi TÜBİTAK MAM ile TEİAŞ arasında yürütülen "Yük Tevzi Teknik Danışmanlık" projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olup, yazarlar projedeki desteklerinden ötürü TEİAŞ'a teşekkürlerini sunar.

6. Kaynaklar

- [1] Yük Tevzi Bilgi Sistemi, <https://ytbs.teias.gov.tr/>, (Son erişim: 14 Ağustos 2022)
- [2] Çalık, K. ve Fırat, Ç., "Optical Performance Investigation of a CLRF for the purpose of Utilizing Solar Energy in Turkey", *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 3, 21-26, 2016
- [3] Duffie, J. ve Beckmann, W., *Solar Engineering of Thermal Processes*, WILEY, Hoboken, New Jersey, 2013
- [4] Muneer, T., "Solar Radiation model for Europe", *Building Serv. Eng. Res. Technol.*, 11(4), 153-163, 1990
- [5] Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R. ve Menicucci, D., "A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces", *Solar Energy*, 39, 221-231, 1987
- [6] Huld, T., Friesen, G., Skoczek, A., Kenny, R., Sample, T., Field, M. ve Dunlop, E., "A power-rating model for crystalline silicon PV modules", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95, 3359-3369, 2011
- [7] Sönmez, E., Temiz, A., Buhan, S., Bestil, A. ve Nadar, A., "Solar Photovoltaic Power Plant Design Approach Based on Computer Software and Grid Connection Analysis", *Solar Conference & Exhibition*, 178-185, 2016