

Hava Durumuna Bağlı Bölgesel GES Üretimi ve Kısa Süreli Güç Değişimlerinin Analizi

Solar Power Generation and Short-Term Change in Power Generation Analysis Based on Weather Conditions

Caner Kahraman¹, Ezgi Avci¹, R. Şeyma Güneş¹, Onur Enginar¹, Ümit Çetinkaya²

¹Vuca Analytics A.Ş

caner.kahraman00@gmail.com, n.ezgi.avci@gmail.com, rabiaseymayilmaz@gmail.com, onurenginar@gmail.com

²TEİAŞ Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Müdürlüğü
u.cetinkaya28@gmail.com

Özet

Son yıllarda ülkemizde ve Dünya’da olduğu gibi özellikle rüzgar ve güneş kaynaklarının elektrik üretiminde kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır. Ancak bu hızlı artış elektrik şebekelerinin planlanmasında ve işletilmesinde zorluklar meydana getirmektedir. Mikro ve makro ölçekli güneş ve rüzgar üretimlerinin hava durumuna bağlı değişkenliklerinin bölgesel ve ulusal olarak öngörülmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma Türkiye Elektrik İletim A.Ş (TEİAŞ) önderliğinde VUCA Analytics A.Ş tarafından yürütülen proje kapsamında geliştirilen tahmin ve profillemeye yöntemleri ile bölgesel ve ulusal güç değişiklikleri otomatik olarak analizini ve haritalandırmasını sağlayan arayüz uygulaması sunulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Güneş Enerji Santrali, Üretim Tahmini, Üretim Profillemeye

Abstract

In recent years, the use of wind and solar has been increasing rapidly in electricity generation, as in Turkey and the world. However, this rapid increase creates difficulties in the planning and operation of electricity networks. It is of great importance to predict the variability of small and large-scale solar or wind generation depending on meteorological conditions on a regional and national basis. This study presents an application that provides automatic analysis and mapping of regional and national generation changes with the estimation and profiling methods developed within the project carried out by VUCA Analytics Company under the leadership of Turkey Electricity Transmission Company (TEİAŞ).

Keywords: Solar Power Plant, Generation Forecast, Production Profiling.

1. Giriş

Son yıllarda artan enerji talebi ve geleneksel fosil kaynakların çevreye etkileri nedeniyle rüzgar ve güneş

başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı sürekli artmaktadır. Dünya genelinde yenilenebilir enerji kurulu gücü son beş yıllık süreçte 1000 GW’ın üzerinde artmış, bu artışa 2021 yılında güneş enerjisi 133 GW ile 93 GW rüzgar enerjisi öncülük etmiştir. Ayrıca hidroelektrik kapasitesi 19 GW, biyoenerji 10 GW ve jeotermal enerji 1,6 GW artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güce oranı ise %80 civarına ulaşmıştır [1]. Benzer şekilde Türkiye’de son yirmi yıl içerisinde elektrik sistemlerinde büyük bir dönüşüm meydana gelmiştir. Başlangıçta fosil yakıt kaynaklı enerji üretim yatırımları ile barajlı ve akarsu tipi hidroelektrik santralleri ile rüzgar ve güneş enerji santral yatırımlarına büyük destek verilmiştir. Bunun sonucu olarak; toplam elektrik üretimine rüzgâr ve güneş enerjisinin katkısı 2010’da sadece %1,4 iken, 2021’de yaklaşık %13’e yükselmiştir. Bu artış öncelikle son beş yılda gerçekleşen 10 GW’ın üzerinde rüzgâr ve güneş enerjisi yatırımıyla elde edilmiştir [2], [3]. Bu yenilenebilir enerji kaynakları yatırımlarının önümüzde yıllarda ülkemiz adına kabul edilen 2053’te Net Sıfır Emisyon hedefi doğrultusunda daha fazla artması beklenmektedir. Özellikle hidroelektrik kaynakların dışında yenilenebilir enerji kaynakların kurulu güçteki payının 2030’da yüzde 50’ye, 2050’de ise yüzde 75’in üzerine yükseleceği öngörülmektedir [4]. Ancak rüzgar ve güneş gibi değişken yenilenebilir enerji kaynak bazlı bir şebeke yapısında hem enerji hem de yük tahmini güç sistemlerinin planlanması, kontrolü ve işletilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının değişkenliği ve belirsizliği, elektrik şebekesi operasyonları ve planlaması için benzeri görülmemiş zorluklar ortaya çıkarmıştır. Bunun sonucu olarak doğru kaynak potansiyellerinin alan bazlı bilinmesi ve değişkenliklerinin tahmin edilmesi gerekmektedir [5]. Güneş enerjisi santrallerinin (GES) coğrafik ve özellikle bulutluluğa bağlı kısa vadeli değişkenliği ile rüzgar enerjisi santralleri (RES) için rüzgar hız değişimine bağlı güç değişkenliklerinin alansal olarak bilinmesi, buna bağlı olarak kaynakların

alsanal olarak boyutlandırılması önemli hale gelmektedir.

Rüzgar ve güneş enerji kaynaklarının bölgesel ve ulusal üretim kapasitelerinin tahmin edilmesi ve güç değişkenliklerinin öngörülmesi amacıyla ülke kapsamında çalışmaları yapılmaktadır. Bölgesel güneş üretim tahmin yöntemlerini ve doğruluğunu test edilmesi amacıyla için İtalya ve Hollanda yer alan farklı bölgeler çalışmalar yapılmış, çalışmada hava durumu verileri ile GES üretim verileri ilişkilendirilerek bölgesel ölçeklendirme uygulanmıştır [6]. Çin’de bulut tabanlı bir güneş radyasyonu tahmin modeli oluşturulmuş, güneş ışınım verisi ile topolojik faktörler dikkate alınarak ülke çapında güneş enerjisinin dağılımı tahmini elde edilmiştir [7]. Bu çalışmada Türkiye genelinde bölgesel ve ulusal olarak GES üretimi profilleri ile hava durumuna bağlı kısa süreli üretim değişimleri analitik yöntemlerle ortaya koyulmuştur. Geliştirilen analitik modeller kullanılarak Türkiye genelinde bölgesel (il, ilçe ya da koordinat bazlı) kurulu güce bağlı üretim tahmini ve hava durumuna bağlı üretim değişkenliklerini otomatik olarak görsel ve rapor sonuçlarını sağlayan arayüz uygulaması gerçekleştirilmiştir.

2. Metodoloji ve Motivasyon

Bu çalışmanın temeli, yüksek çözünürlükte hava durumu verileri ile gerçekleşmiş GES üretim bilgileri esas alınarak geliştirilen tahmin yöntemiyle lokal ve bölgesel GES üretim profillerinin oluşturulması ve 15 dakikalık güç değişimlerinin istatistiksel olarak ortaya konmasıdır..

2.1. Veri Yapısı

Hava durumu parametrelerine bağlı lokal ve bölgesel GES üretim ve kısa süreli güç değişim analizlerinin kapsamlı bir şekilde yapılabilmesi için Türkiye’deki GES’lerin fiziksel teknik tasarım bilgileri ve geçmiş dönem üretim verileri ile hava durumu verileri temin edilmiştir:

- AC/DC Kurulu güç (kW)
- Santral lokasyonu (enlem-boylam)
- 15 dakikalık frekansta 2 yıllık (2019-2020) üretim verileri

Yapılan çalışma kapsamında toplam kurulu gücü 4.552 MW olan 4.256 adet santralin üretim verisi temin edilmiştir. Yapılan çalışmada tüm ülke alanı hedeflenmiş, mevcut durumda GES olmayan alanlar için analizlerin doğruluğunun artırılması amacıyla fazla sayıda santral bulunan bölgelere öncelik vermeden tüm Türkiye’yi eşit temsil edilecek şekilde hava durumu lokasyonları belirlenmiştir. Her bölge maksimum çözünürlükte temsil edilecek şekilde alanlara ayrılmıştır ve bu alanların köşe noktaları hava durumu lokasyonu olarak alınmıştır. Toplamda 1586 lokasyon belirlenmiştir. Nihai durumda yapılan çalışma için hava durumu lokasyonları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Hava Durumu Verisi Temin Edilen Lokasyonlar

Hava durumu kaynakları belirlenirken, çeşitli veri sağlayıcıların belirlenen pilot bölgeler için hava durumu verileri mevcut GES üretimleri ile test edilmiş, test sonucunda göre daha yüksek korelasyona sahip ve modellemede daha yüksek doğruluğa sahip tahmin sonuçları üreten veri kaynağı tercih edilmiştir. Belirlenen 1586 lokasyon için 15 dakikalık frekansta 1 Ocak 2019 ile 31 Aralık 2020 tarihleri arasında aşağıdaki hava durumu verileri temin edilmiştir:

- Işınım (W/m²)
- Global Yatay Işınım (GHI)
- Doğrudan Normal Işınım (DNI)
- Doğrudan Yatay Işınım (EBH)
- Dağınmık Yatay Işınım (DHI)
- Hava Sıcaklığı (oC)
- Bulutluluk Oranı (%)
- Yoğunlaşma Noktası (oC)
- Rüzgâr Hızı (m/s)
- Rüzgâr yönü (°)
- Nem (%)
- Kar Kalınlığı (cm)
- Basınç (hPa)
- Çökelebilen Su (kg/m²)
- Azimuth ve Zenith açıları

2.2. Veri Düzenleme

Bölgesel kurulu güce göre güç değişimlerini analiz etmek amacıyla GES’lerin üretim bilgileri ile anlık güç değişimi arasında ilişki 15 dakikalık üretim bilgileri (kWh) güç (kW) birimine dönüştürülmüştür ve birim değer 1.000 kW olacak şekilde düzenlenmiştir. Denklem 1’de yapılan hesaplama gösterilmektedir.

$$P_{yeni,t} = \frac{P_{i,t}}{C_i} * 1000 * 4 \quad (1)$$

$P_{yeni,t}$: i santralinin t zamanında ayarlanmış güç değeri (kW)

$P_{i,t}$: i santralinin t zamanındaki üretim değeri (kWh)

C_i : i santralinin kurulu gücü (kW)

Üretim verisi temin edilen 4.256 santral arasından verilerin analizlere uygun olması için veri sayısının yeterliliği ve verinin kalitesine göre filtreleme işlemi yapılmıştır. 2019-2020 yılları içinde toplamda 1 yıldan az verisi olan santraller analizlerden çıkarılmıştır. Ayrıca kapasite faktörleri %10’un altında ve %30’un üstünde olan santraller ile kapasite faktörleri bulunduğu il ortalamasının \pm %5 dışında olan santraller analiz dışında

bırakılmıştır. Böylece 4.256 santral içinden verisi analize uygun 2.428 santral seçilmiştir.

2.3. Santrallerin Hava Durumu Lokasyonları ile Eşleştirilmesi

Hava durumu lokasyonları ile santraller eşleştirilirken santrallerin hava durumu lokasyonlarına uzaklıkları hesaplanmıştır ve her santral kendine en yakın hava durumu lokasyonuna atanmıştır. Bazı hava durumu lokasyonlarına çok sayıda santral bağlı olmakta, bazı lokasyonlara ise hiç santral bağlı olmamaktadır. Uzaklık hesabı enlem ve boylam değerleri kullanılarak Denklem 2'deki Öklid uzaklığına göre belirlenmiştir:

$$D_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

$D_{i,j}$: i santrali ile j lokasyonu arasındaki Öklid uzaklığı
 x : Enlem (x_i : santral enlemi, x_j : lokasyon enlemi)
 y : Boylam (y_i : santral enlemi, y_j : lokasyon enlemi)

Tüm santraller, 1.586 lokasyon içerisinde en düşük uzaklık metriğine sahip lokasyon ile eşleştirilmiştir.

2.4. Yakın Çevresinde Santral Bulunan Lokasyonlarda Güç Analizi

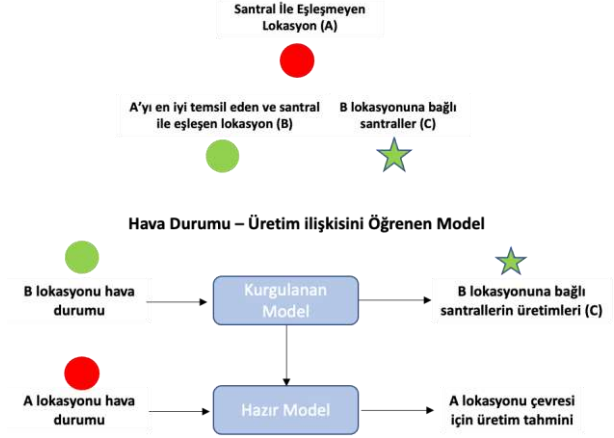
En az 1 santral ile eşleşen lokasyonlar için bağlı bulunan santrallerin gerçek güç değerleri doğrudan güç profilini oluşturmak için kullanılmıştır. Aynı lokasyona bağlı santrallerin üretimleri arasındaki ortalama korelasyonun 0,95'in üstünde olduğu gözükmektedir. Santrallerin 15 dakikalık güç değerlerinin ortalamaları alınarak o lokasyon için 15 dakikalık güç profili oluşturulmuştur. Santral güç değerlerinin ortalaması alındıktan sonra eksik olan veriler için global yatay ışınım verisine göre eksik veri doldurma işlemi yapılmıştır. Eksik veriler doldurulurken Denklem 3 uygulanmıştır:

$$P_t = GHI_t * \frac{P_{ortalama}}{GHI_{ortalama}} \quad (3)$$

P_t : Santralin t zamanındaki güç değeri (kW)
 GHI_t : t zamanındaki global yatay ışınım (W/m^2)

2.5. Yakın Çevresinde Santral Bulunmayan Lokasyonlarda Üretim/Güç Analizi

Üretim verisi analize uygun olan santrallerin olduğu bölgelerde bu veriler doğrudan o bölgenin üretim ve üretim değişimi profilini yansıtmak için kullanılmıştır. Fakat yakın çevresinde düzgün üretim verisine sahip santral bulunmayan bölgelerde o bölgeye ait hava durumuna göre bir üretim tahmini yapılması gerekmektedir. Bunun için hava durumu ile üretimi arasındaki ilişkiyi modelleyen bu çalışmada geliştirilen tahmin algoritmaları kullanılmıştır. Şekil 2'de uygulanan metodoloji gösterilmektedir.



Şekil 2. Yakın Çevresinde Santral Bulunmayan Lokasyonlarda Üretim/Güç Tahmin Metodolojisi

2.5.1. Lokasyonu En İyi Temsil Eden Lokasyonun Bulunması

Çevresinde santral olmayan lokasyonlarda üretim tahmini hava durumu temelli model ile yapılacağı için en benzer hava durumuna sahip lokasyonların en iyi temsil eden lokasyon olarak seçilmesi uygun görülmüştür. İlk olarak sadece global yatay ışınım değerlerine bakılmıştır. Sonrasında diğer hava durumu parametreleri de dahil edilmiştir. İki farklı hava durumunda global yatay ışınım, sıcaklık, rüzgâr hızı ve bulutluluk değerleri arasındaki korelasyonlara bakılarak bir hava durumu benzerlik metriği oluşturulmuştur. Bu metrik hesaplanırken her bir hava durumu değişkenine, üretimi etkileme önemlerine göre toplamları 1 olacak şekilde ayrı ağırlık verilmiştir. Global yatay ışınımına 0.5, rüzgâr hızına 0.2, bulutluluğa 0.2 ve sıcaklığa 0.1 katsayı verilmiştir. İlk duruma göre eşleşen lokasyonların ortalama güç değerinde sadece 3 kW'lık yani %0,3'lük bir değişim meydana gelmiştir.

2.6. Güç Tahmin Modeli

2.6.1. Literatür Araştırması

GES üretim tahmin modellerinin tasarımı ve yöntemlerinde iki ana yaklaşımın olduğu görülmektedir: fiziksel modelleme ve istatistiksel modelleme [8]–[11].

Fiziksel Modeller: Geçmiş üretim verileri kullanılmadan sadece güneş enerjisi santrallerinin teknik verileri kullanılarak geliştirilen modellerdir. Gölgeleme, santralin açısı, santral yüzey ısınma derecesi gibi detaylı verilerin toplanması gerektiği için geniş çaplı projelerde kullanılması pek uygun değildir. Genellikle küçük bir bölgede az sayıda santral için bu yöntem kullanılmıştır.

İstatistiksel Modeller: Bu yöntemde santrallerin geçmiş üretim verileri ile hava durumu arasında ilişki kurularak modelleme yapılmaktadır. Böylece santral teknik verisine çok fazla ihtiyaç duyulmamaktadır fakat santrallerin geçmiş üretimlerinin olması gerekmektedir.

Bu çalışmada santral sayısının fazla olması, mevcut veri özellikleri ve bulutlanmanın etkisinin gözlemlenebilmesi için istatistiksel model kullanılmıştır. İstatistiksel modeller için gerekli ana girdiler: ışıma, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı, basınç, güneş açıları (zenith, azimuth), bulutluluk, hava görüşü, geçmiş üretim verileridir. İstatistiksel modellerde başlıca kullanılan algoritmalar [12]–[14]:

- Derin öğrenme temelli modeller:
 - Yapay Sinir Ağları (LSTM, MLP...)
- Makine öğrenmesi temelli modeller:
 - Destek Vektör Makineleri – (SVM)
 - Rastgele Orman-(RF)
 - LightGBM
 - KNN
- ARIMA
- Çoklu Doğrusal Regresyon

2.6.2. Geliştirilen Model

Şekil 2’de gösterilen metodoloji özetinde gösterildiği üzere santral olmayan bölgelere kurulacak santrallerin ne kadar güç sağlayacağı tahmini için hava durumu ile güç arası ilişkiyi kuran modeller geliştirilmiştir. Hava durumu verileri arasından santral gücünü en iyi açıklayan ve modelde kullanılacak değişkenler seçilirken korelasyonlar sonuçlarına bakılmıştır. Işıma verilerinin tüm bileşenleri yani; global yatay ışıma (GHI), doğrudan normal ışıma (GTI), doğrudan yatay ışıma (EBH), dağınık yatay ışıma (DHI) ile güç arasında yüksek korelasyon bulunmaktadır. Fakat ışıma verilerinin kendi arasındaki korelasyon da çok yüksek seviyededir. Çoklu doğrusallık problemi yaşanmaması için ışıma parametrelerinden sadece güç ile en yüksek korelasyona sahip global yatay ışıma verisi kullanılmıştır. Bununla birlikte ışımandan sonra en yüksek pozitif korelasyona sahip sıcaklık, negatif yönde etkileyen nem ve bulutluluk oranı değerleri kullanılmıştır. Ayrıca düşük korelasyona sahip olsa da literatürde genellikle kullanılan rüzgâr hızı verisi de kullanılmıştır.

- Global Yatay Işıma
- Sıcaklık
- Nem
- Rüzgâr Hızı
- Bulutluluk Oranı

Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle yapay sinir ağları temelli derin öğrenme (deep learning) modelleri ve zaman serisi modellemesinde sıklıkla kullanılan LSTM (long short-term memory) modeli ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada hava durumu verileri ile santral üretim verileri arasındaki ilişkinin doğru modellenmesi için Türkiye’de mevcut GES kurulumunun çok ve az olan farklı bölgeler için ön modelleme ve testleri Rastgele Orman, LSTM, LightGBM, KNN, Çoklu Doğrusal Regresyon, Ridge-Lasso Regresyon modelleriyle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre üretim bilgilerine göre zaman serisi yaklaşımlı LSTM modelinin en iyi sonuç verdiği ama sadece hava durumu ile üretim arası ilişki kurulan modellerde Rastgele Orman

modelinin en iyi sonucu verdiği elde edilmiştir. Model seçiminde, Denklem 4’e verilen kurulu güce oranlı mutlak hata ortalaması (MAE%) metriği kullanılmıştır.

$$MAE\% = \frac{\sum_{t=1}^N |P_{tahmin,t} - P_{gercek,t}|}{Kurulu\ Güc} * \frac{1}{N} \quad (4)$$

$t = 15$ dakikalık zaman periyodu

$N =$ Toplam 15 dakikalık zaman periyodu sayısı

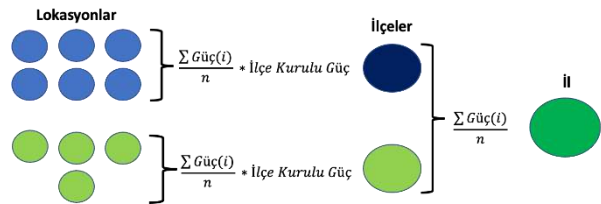
$P_{tahmin,t} = t$ zamanındaki tahmin edilen güç

$P_{gercek,t} = t$ zamanındaki gerçek güç

Konya ilinden seçilen iki farklı alan için Rastgele Orman modeli ile yapılan 15 dakikalık modelin hatası, birinci alanda %3,9 MAE, ikinci alanda %3,1 MAE olarak gözlemlenmiştir. [14] çalışmasındaki saatlik frekansta yapılan modelde %3-%4 MAE% performansı dikkate alındığında modelin başarılı bir sonuç elde ettiği söylenebilir. Konya ilinden seçilen alanlar ile yapılan pilot çalışma neticesinde modelin başarısı doğrulanmış ve proje kapsamında geliştirilen modelin tüm Türkiye için uygulanmasına karar verilmiştir.

2.6.3. İl Bazlı Sonuçların Elde Edilmesi

Öncelikle bölgesel analiz için ilçeler belirlenmiş ve ilçeler için kurulu güç verileri temin edilmiştir. İlçeler belirlendikten sonra hava durumu lokasyonları kendilerine en yakın ilçe ile eşleştirilmektedir. Her bir lokasyon için hali hazırda yapılan güç analiz sonuçları ve bu lokasyonların hangi ilçeye bağlı oldukları bilgisi kullanılarak ilçe bazlı güç analizleri oluşturulmaktadır. İlçe bazlı analizler sonrasında ise il bazlı analizlere geçilmektedir. İlçe bazlı güç profili oluşturulurken o ilçeye bağlı lokasyonlardaki güç profillerinin ortalaması alınmakta ve o ilçedeki toplam kurulu güç ile çarpılmaktadır. İl bazlı güç profili oluştururken ise o ile bağlı ilçelerdeki güç profillerinin ortalaması alınmaktadır. Ulusal ve bölgesel sonuçlar ise aynı ilçe verilerinden il bazında sonuçların elde edilmesi gibi, illerdeki üretimlerin toplanması ile elde edilmiştir. Şekil 3’te alansal güç profili oluşturma hesabı gösterilmektedir.



Şekil 3. Alansal güç profili hesabı özet gösterimi

3. Web Arayüzü

Hava durumuna bağlı bölgesel GES üretimi ve kısa süreli üretim değişimlerinin analizi sonuçlarının koordinat bazlı olarak noktasal, il/ilçe kırılımından bölgesel ve ulusal olarak otomatik görüntüleme ve raporlama yapabilecek web arayüz uygulaması geliştirilmiştir. Bu kapsamda geliştirilmiş olan harita sayfasında hem verisi

alınmış hava durumu lokasyonlarının hem de bölge, il ve ilçe seviyesindeki hava durumuna bağlı üretim analizleri görüntülenmektedir.



Şekil 4. Türkiye Haritası üzerinde GES Üretim Potansiyelleri

Aylık ve saatlik üretim profilleri baz alınarak, harita üzerinde mevsimsel olarak 15 dakikalık üretim değişimleri harita üzerinde belirlenen renk skalası ile izlenebilmektedir. Haritanın renklendirilmesi seçili 15 dakika, ay ve bölgelerin üretim potansiyellerine göre yapılmaktadır. En yüksek üretim potansiyeli kırmızı ile gösterilirken, mor renge gidildikçe potansiyelin azaldığı bölgeler gösterilmektedir. Şekil 4'te örnek olarak ağustos ayı, saat 12:15 verisine göre oluşturulmuş harita görüntüsü verilmiştir. Geliştirilen arayüz uygulaması analiz yapılması istenilen sahalar için koordinat bilgileri, ilçe, il olarak baz alınarak hava durumu değişkenliklerini, GES üretimlerinde meydana gelebilecek minimum/maksimum üretim değişimlerini, bulutluluk değişiminin GES üretimine olan etkisinin olasılıksal sonuçlarını grafik, görüntüleme ve raporlama imkanlarıyla sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde kullanıcılara mevcut ve gelecek dönem GES kapasiteleri açısından analiz ve ön değerlendirme imkanı sunmaktadır.

4. Analiz Sonuçları

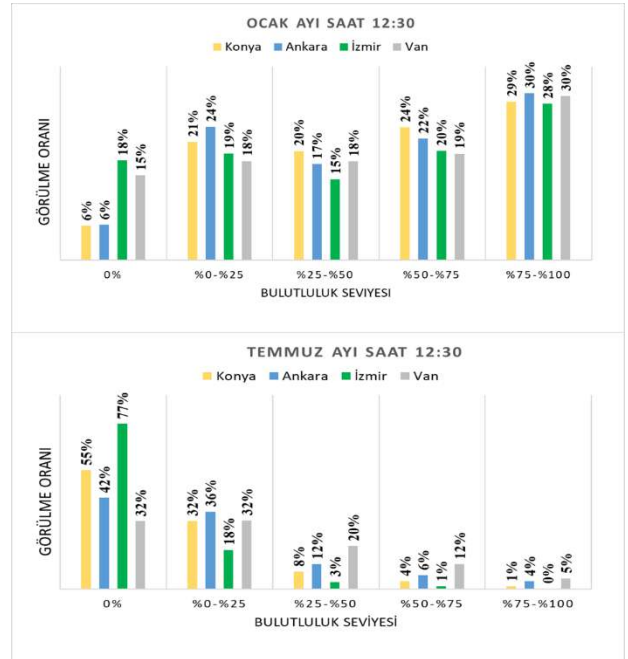
Türkiye'de belirlenen tüm lokasyonlar için bulutluluk seviyelerine bağlı güç profili, lokal noktalardan ilçe, il, bölgesel ve ulusal hesaplamalar yapılmıştır. Bu bölümde yapılan analizlere göre ait farklı bölgelerde yer alan illere ait sonuçlar ile bölgesel ve ulusal sonuçlar örnek olarak sunulmaktadır.

4.1.1. İl Bazlı Analiz Sonuçları

İl bazlı elde edilen sonuçlar farklı bölgelerde yer alan Konya, Ankara, İzmir ve Van illeri için sonuçlar bu bölümde sunulmaktadır. İlk olarak bulutluluk seviyeleri ile bu seviyelerin görülme sıklıklarına göre oluşan güç değişimleri ocak ve temmuz aylarında saat 12:30 için Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmektedir. Ocak ve temmuz aylarında saat 12:30 için bulutluluk seviyelerinin görülme sıklıkları ve 1.000 kW'lık bir GES santralinin farklı bulutluluk seviyelerindeki ortalama güç değerleri aşağıdaki grafiklerde paylaşılmıştır. Bulutluluk oranlarının güneş santrallerindeki güç değişimlerine büyük etkisi olduğu açık bir şekilde gözükmektedir.



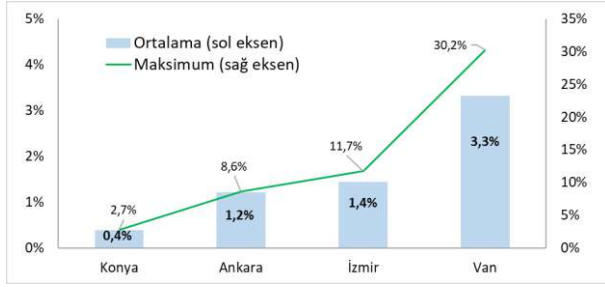
Şekil 5. Bulutluluk seviyesine göre ortalama güç değerleri



Şekil 6. Bulutluluk Seviyelerinin Görülme Oranları

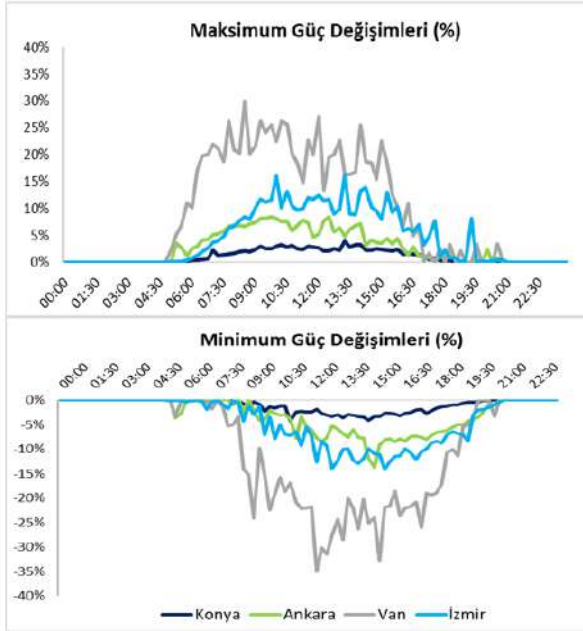
Örneğin temmuz ayında Ankara'da öğle vaktinde bulutun olmadığı açık hava (clear sky) olarak bilinen durumlarda ortalama güç 864 kW iken bulutluluk seviyesinin çok yüksek olduğu %75-%100 seviyesinde ise ortalama güç 260 kW'a kadar düşmektedir. Bulutluluk seviyesi görülme ihtimalleri incelendiğinde ise ocak ile temmuz arasında önem bir fark gözlemlenmektedir. Ankara'da temmuz ayı için bulutun hiç olmadığı durumlar %42 oranında görülürken, bulutluluk seviyesinin %75'in üstünde olma sıklığı

sadece %4'tür. İl bazlı 15 dakikalık güç değişimi seviyeleri incelendiğinde, il bazlı kurulu güç arttıkça değişim seviyesinin büyüklüğünün azaldığı görülmektedir. Şekil 7'de saat 12:15-12:30 arasında güç değişiminin kurulu güce oranları gösterilmektedir.



Şekil 7. Seçili iller için GES güç değişim seviyelerinin il kapasitelerine oranlarının ortalama ve maksimum değerleri

Konya ilinde tüm yıl boyunca 12:15-12:30 arasındaki kurulu güce göre maksimum güç değişimi %2,7'si ortalama güç değişimi ise %0,4'üdür. Diğer illere göre kurulu gücü ve santral sayısı en düşük olan Van ilinde ortalama değişim %3,3, maksimum güç değişimi %30,2'dir. Bunun temel sebebi bir bölgede yer alan santral sayısı fazla oldukça eş zamanlı 15 dakikalık değişimlerin birbirini sönmülemesidir. 15 dakikalık güç değişiminde şebeke için problem yaratabilecek büyüklükteki noktaları görebilmek için tüm 15 dakikalık periyotlarda maksimum ve minimum değişimlerin kurulu güce oranları Şekil 8'de gösterilmektedir.

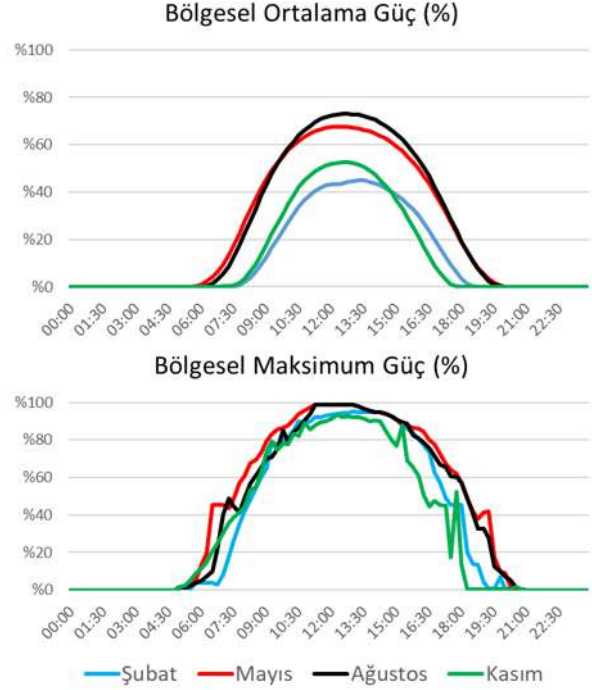


Şekil 8. Seçilen illerde her 15 dakikalık periyot için maksimum ve minimum güç değişimleri

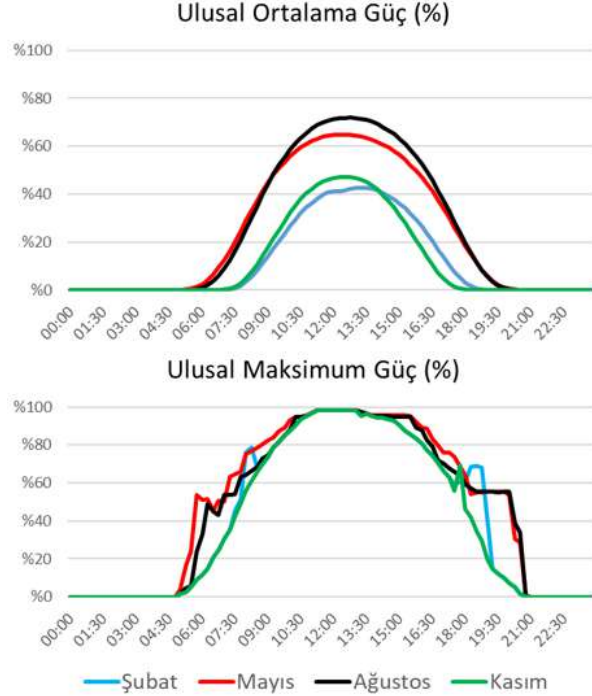
4.1.2. Bölgesel ve Ulusal Analiz Sonuçları

Türkiye genelinde tahsis edilen GES kurulu güç kapasiteleri baz alınarak hava durumuna bağlı bölgesel

ve ulusal GES üretim profilleri farklı mevsimlere ait ortalama ve maksimum güç değişimleri oransal olarak bu bölümde sunulmaktadır.



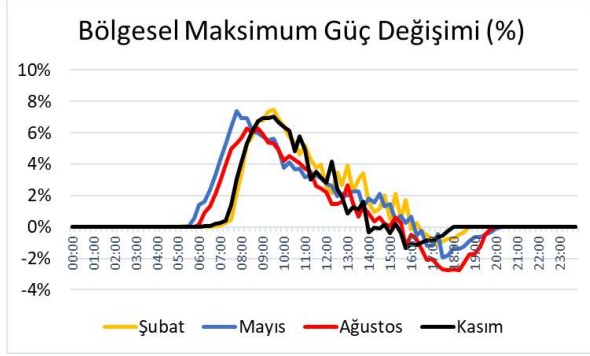
Şekil 8. Bölgesel Ortalama ve Maksimum Güç Profilleri



Şekil 9. Bölgesel Ortalama ve Maksimum Güç Profilleri

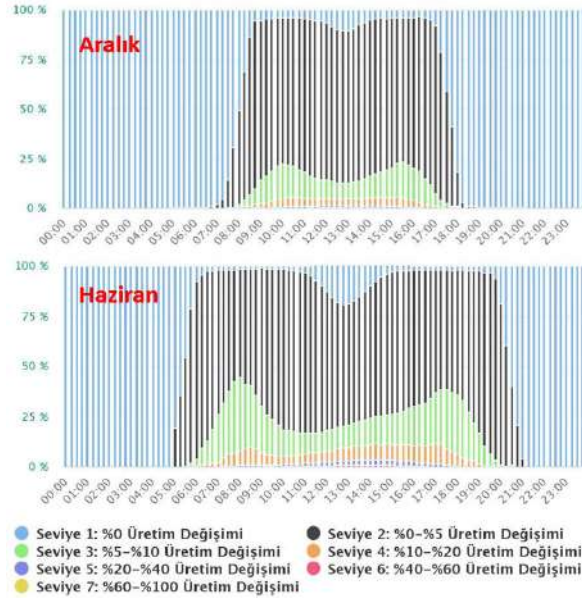
Afyon, Aksaray, Isparta, Karaman Konya, Mersin, Nevşehir ve Niğde illerini kapsayan bölge için elde edilen sonuçlar Şekil 8, de, ulusal olarak elde edilen

sonuçlar Şekil 9'da gösterilmektedir. Dört farklı aya ait 15 dakikalık profilleri incelendiğinde bölgesel ve ulusal ortalama güç profili birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Sonbahar ve kış aylarında GES üretim aralığı güneşlenme süresine bağlı olarak bahar ve yaz aylarına göre daha kısadır.



Şekil 10 Bölgesel Maksimum Güç Değişimleri

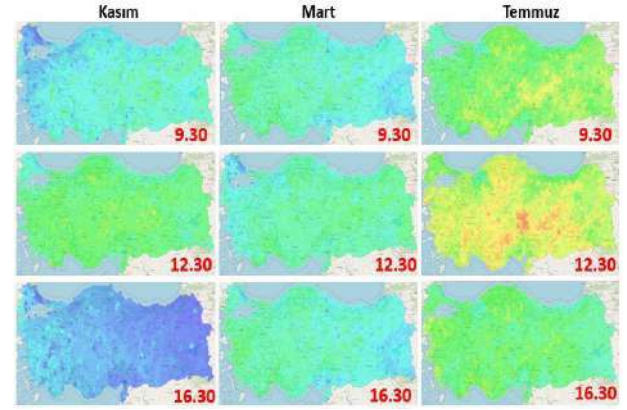
Maksimum üretim seviyeleri incelendiğinde, ulusal ve bölgesel olarak maksimum güç öğle saatlerinde her mevsimde gerçekleşebildiği görülmektedir. Ancak güneşin doğuşu ve batış saatlerine bağlı olarak bahar ve yaz aylarına güç değişiminin hızlı olarak değişmektedir. Bölgesel olarak GES güç profilinde meydana gelebilecek pozitif ve negatif yönlü maksimum güç değişimi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 11. Bulutluluğa Bağlı Güç Değişimi Seviyeleri ve Olasılığı

Bu çalışmada referans alınan bölgenin kurulu gücüne göre güneşlenme süresi ve günün saatine bağlı olarak öğle saati öncesi %8'e yakın pozitif güç değişimlerinin olduğu, öğle saatinden itibaren pozitif güç değişimlerinin genliğinin azaldığı, güneşlenmenin azaldığı saatlerden itibaren ise negatif güç değişimleri görülebilmektedir. Bu

değişim oranları beklenildiği üzere mevsimsel olarak farklıdır. Geliştirilen arayüzde istenilen zaman ve alana ait istatistiksel sonuçların incelenmesi amacıyla özet grafikler oluşturulmaktadır. Bu bilgilerden Şekil 11'de aynı bölgeye ait bulutluluk seviyeleri ile bu seviyelerdeki GES üretim değişimi yer almaktadır. Benzer olarak Şekil 12'de günlük hava durumu koşullarına göre ulusal olarak GES üretim değişimlerini ve saatlik değişimlerini gösteren haritalandırma imkanı gösterilmiştir. Alansal olarak yapılan üretim profillemesi ve değişkenlik koşullarına bağlı olarak hem istatistiksel hem de görsel olarak GES üretim koşulları hakkında bilgi sağlanabilmektedir.



Şekil 12. Mevsimsel GES Üretim Değişimlerinin Haritalandırılması

5. Sonuçlar

Gerçekleştirilen proje kapsamında geliştirilen analitik model ve arayüz uygulamasıyla;

- Hava durumu değişikliklerine bağlı GES üretim değişkenlikleri 15 dakika zaman çözünürlüğünde kurulu güce bağlı olarak lokal, bölgesel ve ulusal bazlı olarak hesaplanabilmektedir. Buna göre istatistiksel olarak bölgesel GES planlamalarında üretim değişiklikleri öngörülebilmektedir.
- Alansal olarak GES üretimlerinde bulutlanma etkisinin olasılıksal etkisi elde edilmektedir.
- Geliştirilen arayüz uygulamasıyla otomatik olarak görüntüleme, raporlama ve haritalandırma servisleri kurumsal olarak kullanılabilir.

• Yapılan bu çalışma haliyle sadece geçmiş üretim ve hava durumu verileri baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Ancak gelecek yıllarda güvenilir şekilde kullanılabilmesi için gerçekleşen GES üretim verileriyle yapılan modellemelerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

6. Kaynaklar

- [1] "Renewable Capacity Statistics 2022." <https://irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022> (accessed Sep. 08, 2022).

- [2] “Kurulu Güç Raporları.” *Solar Energy*, vol. 158, pp. 1026–1038, Dec. 2017, doi: <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari> (accessed Aug. 24, 2022).
- [3] SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi, “Türkiye Elektrik Sistemine Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Entegrasyonu.” Accessed: Jun. 04, 2022. [Online]. Available: <https://shura.org.tr/turkiye-elektrik-sistemine-yenilenebilir-enerji-kaynaklarinin-entegrasyonu/>
- [4] Ü. Şahin, O. Bülent Tör, B. Kat, and S. Teimourzadeh, “TÜRKİYE’NİN KARBONSUZLAŞMA YOL HARITASI 2050’DE NET SIFIR YÖNETİCİ ÖZETİ”, Accessed: Aug. 24, 2022. [Online]. Available: www.ipc.sabanciuniv.edu
- [5] H. Sangrody, M. Sarailoo, N. Zhou, N. Tran, M. Motalleb, and E. Foruzan, “Weather forecasting error in solar energy forecasting,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 10, 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.1043.
- [6] I. Pvp et al., *Regional solar power forecasting*. 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.27318.93760.
- [7] S.; Zhang et al., “Estimation of Photovoltaic Energy in China Based on Global Land High-Resolution Cloud Climatology,” *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 2084*, vol. 14, no. 9, p. 2084, Apr. 2022, doi: 10.3390/RS14092084.
- [8] C. Wan, J. Zhao, Y. Song, Z. Xu, J. Lin, and Z. Hu, “Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 38–46, Jan. 2016, doi: 10.17775/CSEEJPES.2015.00046.
- [9] “California renewable energy forecasting, resource data, and mapping: final project report /,” *Library of Congress, Washington, D.C. 20540 USA*, Accessed: Aug. 31, 2022. [Online]. Available: <https://lccn.loc.gov/2014496186>
- [10] S. Sobri, S. Koochi-Kamali, and N. A. Rahim, “Solar photovoltaic generation forecasting methods: A review,” *Energy Convers Manag*, vol. 156, pp. 459–497, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2017.11.019.
- [11] B. Espinar et al., “Photovoltaic Forecasting: A state of the art,” p. Pages 250-255-ISBN 978-3-941785-15-1, Apr. 2010, Accessed: Aug. 31, 2022. [Online]. Available: <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00771465>
- [12] M. P. Almeida, O. Perpiñán, and L. Narvarte, “PV power forecast using a nonparametric PV model,” *Solar Energy*, vol. 115, pp. 354–368, May 2015, doi: 10.1016/J.SOLENER.2015.03.006.
- [13] A. Gensler, J. Henze, B. Sick, and N. Raabe, “Deep Learning for solar power forecasting - An approach using AutoEncoder and LSTM Neural Networks,” *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2016 - Conference Proceedings*, pp. 2858–2865, Feb. 2017, doi: 10.1109/SMC.2016.7844673.
- [14] M. Pierro et al., “Data-driven upscaling methods for regional photovoltaic power estimation and forecast using satellite and numerical weather prediction data,”