

Rüzgâr Enerji Santralleri Rampa Oranı: Türkiye Örneği

İsrafil KARADÖL^{1,a}, Uğur Serkan BALTACI^{2,b}, Ökkeş Fatih KECEÇİOĞLU^{2,c}

¹Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kilis

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

^aORCID: 0000-0002-9239-0565; ^bORCID: 0000-0002-4835-2879; ^cORCID: 0000-0001-7004-4947

Makale Bilgileri

Geliş : 18.03.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560205

Sorumlu Yazar

İsrafil KARADÖL

israfilkaradol@kilis.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Yenilebilir enerji

Rüzgâr enerji santrali

Rampa oranı

Histogram alanı

Atf şekli: KARADÖL, İ., BALTACI, U.S., KECEÇİOĞLU, Ö.F., (2024). Rüzgâr Enerji Santralleri Rampa Oranı: Türkiye Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 797-811.

ÖZ

Rüzgâr Enerji Santrali (RES) üretimindeki değişkenlik, şebeke esnekliği ve güvenliği açısından teknik ve finansal sorunlara neden olmaktadır. Bu açıdan rüzgâr enerji santrali üretim değişkenliğinin bölgesel ve zamansal olarak önceden bilinmesi veya tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, Türkiye'deki RES üretimlerinin farklı zamansal periyotlardaki rampa olaylarını bölgesel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla ihtiyaç duyulan 2019, 2020 ve 2021 yıllarında Türkiye'deki RES gerçek üretim verileri Türkiye Elektrik İletim AŞ'den temin edilmiştir. Bu üç yılın RES saatlik gerçek üretim verileri kullanılarak farklı zamansal periyotlardaki histogram grafikleri oluşturularak rampa büyüklükleri hesaplanmıştır. Bölgesel olarak belirlenen rampalar; büyüklüğü (%5, %7,5 ve %10 kurulu güce göre), yönü (negatif, pozitif), oluşum yeri (Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu) ve oluşum dönemi (bir, iki, üç, dört, beş ve altı saat) parametreleri göz önüne alınarak detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, kurulu güce göre %5 ve üzeri rampa olaylarında Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin 1 saatlik zamansal periyotta toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 1.91, 2.77, 14.39, 16.02, 35.95, 122.66, 250.85'tir ve 6 saatlik zamansal periyotta toplam kümülatif rampa alanları ise sırasıyla 195.93, 190.60, 280.42, 305.29, 361.14, 528.77, 623'tür. Bu rampa hesaplamaları ışığında kurulu güce göre %5 ve üzeri rampa olaylarında 1 saatlik zamansal periyotta en az rampa olayı Marmara Bölgesinde, 6 saatlik zamansal periyotta ise en az rampa olayı Ege Bölgesinde görülmüştür. 1 ve 6 saatlik zamansal periyotta en fazla rampa olayı Güneydoğu Anadolu Bölgesinde görülmüştür.

Wind Power Plant Ramp Rate: The Case of Turkey

Article Info

Received : 18.03.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560205

Corresponding Author

İsrafil KARADÖL

israfilkaradol@kilis.edu.tr

Keywords

Renewable energy

Wind power plant

Ramp rate

Histogram field

How to cite: KARADÖL, İ., BALTACI, U.S., KECEÇİOĞLU, Ö.F., (2024). Rüzgâr Enerji Santralleri Rampa Oranı: Türkiye Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 797-811.

ABSTRACT

Variability in Wind Power Plant (WPP) generation causes technical and financial problems in terms of grid flexibility and security. In this respect, it is of great importance to know or predict wind power plant generation variability regionally and temporally in advance. This study aims to regionally examine ramp events in different temporal periods of generated WPP in Turkey. For this purpose, the actual generation data WPP in Turkey in 2019, 2020 and 2021 were obtained from Turkey Electricity Transmission Inc. Using the actual WPP hourly generation data of these three years, ramp magnitudes were calculated by creating histogram plots at different temporal periods. Regionally determined ramps; size (5%, 7.5% and 10% based on installed capacity), direction (negative, positive), place of formation (Marmara, Aegean, Central Anatolia, Mediterranean, Black Sea, Eastern Anatolia and Southeastern Anatolia) and formation period (one, two, three, four, five and six hours). It was examined in detail considering the parameters (two, three, four, five and six hours). As a result of the investigations, the total cumulative ramp areas of the Marmara, Aegean, Central Anatolia, Mediterranean, Black Sea, Eastern Anatolia and Southeastern Anatolia regions in a 1-hour temporal period in ramp events of 5% and above compared to the installed capacity are 1.91, 2.77, 14.39, 16.02, 35.95, 122.66, respectively. is 250.85 and the total cumulative ramp areas in the 6-hour temporal period are 195.93, 190.60, 280.42, 305.29, 361.14, 528.77, 623, respectively. In the light of these ramp calculations, in ramp events of 5% and above according to the installed power, the least ramp events were seen in the Marmara Region in a 1-hour temporal period, and the least ramp events were seen in the Aegean Region in a 6-hour temporal period. The highest ramp events in the 1 and 6 hour temporal period were seen in the Southeastern Anatolia Region.

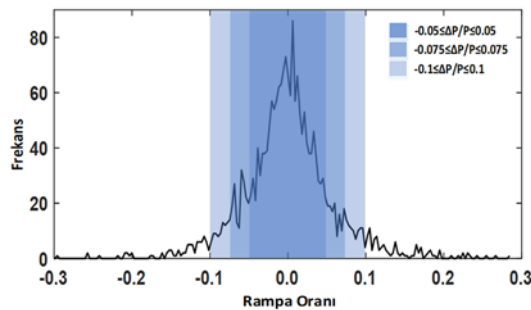
1. GİRİŞ

Elektrik günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır. Bu sebeple dünyadaki birçok ülkenin hedefleri arasında tüketicilere sürekli, güvenli ve kaliteli elektrik enerjisi temin etmek vardır. Bu durumun oluşabilmesi için elektrik arz sisteminin doğru planlanması ve yönetilmesi gerekmektedir. Elektrik arz sisteminin doğru planlanması ve yönetilmesi için etkin modellemeye ihtiyaç duyulmaktadır [1]. 2022 yılı içerisinde Türkiye’de yapılan çalışmalarda mevcut kaynaklara göre toplam kurulu güç dağılımında yenilebilir enerji kaynakları %53’lük bir paya sahiptir. Toplam kurulu güç içerisindeki kaynak dağılımı ise; %30,9’u hidrolik enerji, %24,7’si doğal gaz, %20,6’sı kömür, %10,9’u rüzgâr, %8,8’i güneş, %1,6’sı jeotermal ve %2,4’ü ise diğer kaynaklardır [2].

Günümüzde Rüzgâr Enerji Santrallerinin (RES) yenilebilir enerji kaynakları içinde önemli bir yeri vardır. Ancak RES’ler belirsiz ve değişken üretim karakteristiğine sahiptir. Bu durum elektrik şebeke sistemindeki arz-talep dengesini olumsuz etkilemektedir. RES üretiminde meydana gelen bu değişkenlikler rampa olayı olarak adlandırılmaktadır. Rampa oranlarının şebeke sisteminde oluşturduğu olumsuzluklar sebebiyle RES üretimlerindeki rampa olaylarını incelemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Santral üretiminde meydana gelen değişkenliğin rampa olabilmesi, kurulu güçteki değişkenliğin %5 veya daha fazla olmasına bağlıdır [3].

Bazı ülkelerde rampa tanımlaması farklılık gösterdiğinden toplam kurulu gücün %5, %7,5 ve %10 üstündeki değişkenlikler incelenmiştir. Örneğin Puerto Rico Electric Power Authority’de kurulu gücün %10 ve üzerindeki değişiklikler incelenmiştir [4]. Toplam kurulu gücün %5, %7,5 ve %10 üzerindeki değişkenliklere rampa oranı karakteristiği olarak adlandırılmaktadır ve rampa oranı karakteristiğinin görseli Şekil 1’de verilmiştir. Bu şekilde üretimdeki düşüşler negatif yönlü rampalar olarak tanımlanırken üretimdeki artışlar pozitif yönlü rampa olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca şekilde gösterilen koyu lacivert bölge negatif ve pozitif yönlü %5 ve altındaki rampaları tanımlamaktadır. Lacivert bölge %5 ile %7,5 arasındaki negatif ve pozitif yönlü rampaları, açık lacivert bölge ise %7,5 ile %10 arasındaki rampaları göstermektedir. Beyaz bölge %10 ve üzerindeki rampa olaylarını göstermektedir.

Yapılan bu çalışma Türkiye’de bulunan RES’lerin 2019, 2020 ve 2021 yıllarındaki elektrik üretiminde meydana gelen rampa olaylarının bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda bölgesel olarak incelenmesini amaçlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen kümülatif rampa alanları bölgesel olarak karşılaştırılmıştır. RES üretiminde meydana gelen kısıtlamaları ve şebekedeki problemleri çözmek için enerji üretiminde oluşan rampaların yönünü bilmek gerekmektedir. RES üretiminde görülen negatif yönlü rampalardan kaynaklı enerji ihtiyacını karşılamak için; santrallerin şebekede aktif olma süresi, meydana gelen rampa büyüklüğüne göre pasif olan santraller devreye alınmakta veya aktif olan santrallerin üretimi arttırılmaktadır. Şebekede pozitif yönlü rampa oluşması halinde bazı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler; sistemde aktif olan santrallerin üretiminin azaltılması, aktif santralin şebekedeki diğer aktif santrallere yük aktarımı yapılması ya da bazı santralin pasif duruma getirilmesi gerekmektedir. Bu durum şebeke işletmecisi açısından ek maliyetler oluşturmaktadır. Şebeke işletilmesindeki ek maliyetlerin minimize edilmesi amacıyla RES üretimlerindeki rampa olaylarının büyüklüğü, oluşum zamanı ve süre bilgilerine önceden sahip olmak büyük önem arz etmektedir [5].



Şekil 1. Rampa oranı karakteristiği

Bu konu kapsamında literatürde birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalardan bazıları incelenerek özetlenmiştir. Dhiman ve arkadaşlarının çalışmasında, Destek Vektör Regresyonu (DVR) ve

dalgacık dönüşümü değişkenlerini bir araya getirerek hibrit yapıya sahip rüzgâr tahmin modeli önerilmiştir. Önerilen tahmin model ile rüzgâr gücünde oluşan rampa olayları incelenmiş ve performans değerlendirme kriterleri ile karşılaştırma yapılmıştır [6]. Ery ve arkadaşlarının çalışmasında, rüzgâr yönünün doğrusal ve çapraz alan özelliklerine sahip olan santrallerde meydana gelen rampaların mekâna bağlı değişkenlikleri Poisson süreci ile modellenmiştir [7]. Ekström ve arkadaşlarının çalışmasında, bir güç sistemine eklenen yeni RES'lerin rampa özellikleri dikkate alarak coğrafi şartların enerji üretimindeki etkisini göstermek için model önerilmiştir [8]. Zucattelli ve arkadaşlarının çalışmasında, Brezilya ve Uruguay'da da bulunan santrallerde, rüzgâr enerjisi rampa tahmini için dalgacık ayrıştırması ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak tahmin modeli önerilmiştir [9]. Martins ve arkadaşlarının çalışmasında, güneş enerji sisteminde meydana gelen harmoniklerin sebep olduğu güç dengesizliklerini ortadan kaldırmak için rampa hızı kontrol algoritmaları ile koordine edilen Enerji Depolama Sistemleri (EDS)'nin kullanıldığı bir model önerilmiştir [10]. Probst'un çalışmasında, rüzgâr santralleri üretimlerinde meydana gelen ani değişimleri Tahmine Dayalı Azaltma (TDA) metodu kullanılarak tahmine dayalı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Analizler belirli ancak değişken bir eğim sınırına uygun yapılmıştır. Eğimin olmadığı sınırlarda ise TDA'nın maliyet-fayda ilişkileri karşılaştırılmıştır. Çalışmada önerilen yaklaşım ile çıkış gücü değişim dağılımlarının çalışan bir rüzgâr santralinden elde edilen gözlemsel verilerle tutarlı olduğu gösterilmiştir [11]. Li ve arkadaşlarının çalışmasında, rüzgâr enerjisi üretiminde meydana gelen rampa olayları ile atmosferik basınç alanları arasındaki ilişki analiz edilerek gelecekteki rüzgâr rampalarını tahmin eden model önerilmiştir. Tahmin modelinde atmosferik basınç alanlarının analizini, Gabor filtreleme adı verilen bir görüntü dokusu çıkarma tekniği kullanılarak yapılmıştır. Güç tahmininde, Gabor filtrelemeyi kullanmayan sistem ile tahmin modeli karşılaştırıldığında önerilen model bu çalışma için seçilen üç rüzgâr santrallerinden ikisi için daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca sayısal deneyler sonucunda önerilen modelin rampa yakalama oranı ve tahmin doğruluğu açısından diğer modelden daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür [12]. Karadöl ve arkadaşlarının çalışmasında, RES üretimlerinde iklimsel koşullara bağlı olarak görülen rampa olayları analiz edilmiştir ve bölgesel olarak ayrılan mevcut tesislerdeki rampa olayları dikkate alınarak rampa olaylarını azaltmaya yönelik model önerilmiştir. Önerilen modelde Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. Yeni tesis kurulumlarında tavsiye edilen metot ile elde edilen tesislerin bölgelere dağılımının dikkate alınması durumunda oluşacak rampa olaylarının minimize edilebileceği öngörülmüştür [13].

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde rampa olayları üzerine yapılan çalışmaların kısıtlı sayıda olduğu görülmüştür. Çalışmaların çoğunda enerji depolama sistemleri ve rampa tahmin modelleri önerilmiştir. Rampa analizi yapılan bazı çalışmalarda ise 1 yıllık santral üretim değerleri ile tek bir lokasyonda saatlik incelemeler yapılmıştır. Ayrıca yapılan birçok çalışmada kullanılan veriler farklı üretim modellemelerinden elde edilmiştir.

Bu çalışmanın literatüre iki yönlü katkısı olmuştur:

- İlk kez Türkiye için RES üretim değerlerindeki rampa olayları gerçek veriler ile bölgesel olarak incelenmiştir.
- Üç yıllık periyottaki (2019, 2020 ve 2021) RES üretimlerindeki rampa olayları bölgesel olarak farklı zamansal periyotlarda (bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik) hesaplanmıştır. Rampaların yönü, büyüklüğü ve oluşum yeri (bölgesel olarak) farklı zamansal periyotlarda detaylı olarak incelenmiştir.

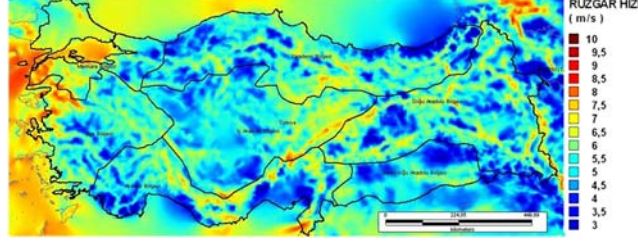
Bu makale dört başlıktan oluşmaktadır. İlk kısımda Türkiye'nin rüzgâr enerji potansiyeli anlatılmış, RES enerji üretimlerinde meydana gelen rampa olayından bahsedilmiş, çalışma ile ilgili literatür özeti ve çalışmanın literatüre katkısına değinilmiştir. İkinci kısımda verilerin elde edildiği santrallerin üretim bilgileri, Türkiye bölgesel rüzgâr enerjisi potansiyel atlası, Türkiye'nin 2019, 2020 ve 2021 yıllarını kapsayan RES bölgesel teknik verileri 3 yıllık zaman aralığında bölgesel olarak saatlik ortalama güç üretim değerleri yer almıştır ve rampa hesaplanmasında kullanılan yamuk kuralı açıklanmıştır. Çalışma sonunda elde edilen bulgular üçüncü kısımda yer almıştır. Bulgular doğrultusunda elde edilen sonuçlar son kısımda verilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Türkiye'de RES

Günümüzde fosil yakıt kaynaklarının hızla azalması sebebiyle yenilenebilir enerjinin ehemmiyeti anlaşılmaktadır. Genel olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal

ve biyokütle enerjisidir. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde en çok gelişen rüzgâr enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeylerini farklı değerlerde ısıtması ile meydana gelmektedir. Yeryüzünün farklı ısınması ile meydana gelen basınç ve nem farkından kaynaklı havanın yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan hareket etmesiyle rüzgâr oluşmaktadır [14]. Türkiye’de bölgesel rüzgâr enerjisi potansiyel atlası Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Türkiye bölgesel rüzgâr enerjisi potansiyel atlası (50 m) [15]

Rüzgâr hızları 7 m/s’den fazla olan yerler belirlenerek Türkiye’nin rüzgâr enerji kapasitesi 47,849 MW olarak hesaplanmıştır. Atlasa bakılarak Marmara Bölgesi’nin ve Ege Bölgesi’nin kuzeyinin rüzgâr enerji potansiyeli diğer bölgelerden daha çok olduğu anlaşılmaktadır. Böylece Marmara Bölgesi ve Ege Bölgesi’ne kurulması planlanan RES’lerin üreteceği rüzgâr enerjisi daha verimli olacaktır [16].

2.2. Türkiye’deki RES’lerin Teknik Verileri

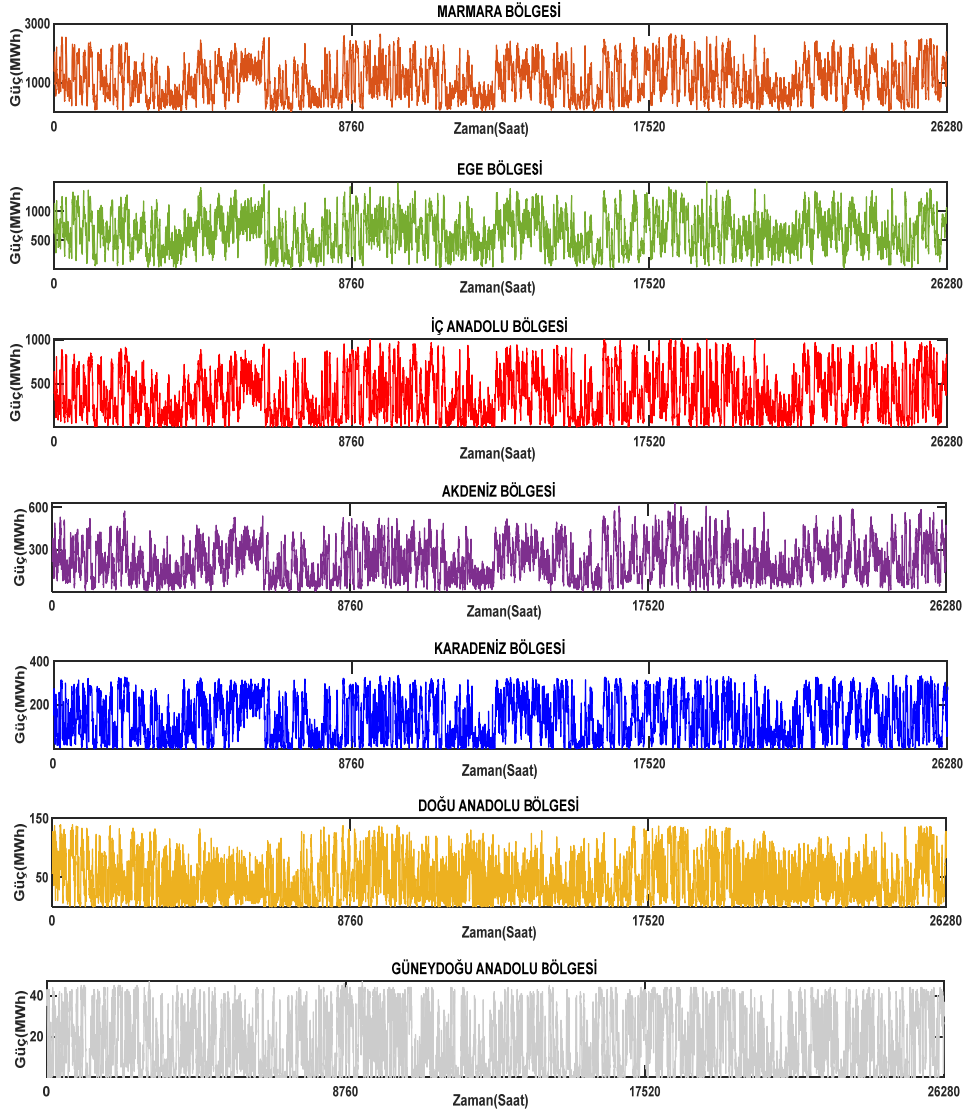
Rüzgâr enerjisinin Dünya çapında ve ülkemizde süratle gelişmesinde bu kaynak türünün yenilenebilir olması, taşıma rahatlığı ve enerji üretiminde çağın teknolojisine gereksinim duyulmaması gibi avantajları yer almaktadır [14]. Rüzgâr enerjisi kullanımındaki artışlar beraberinde bazı problemlere neden olmuştur. Rüzgâr enerjisi üretimi yapılırken ortaya çıkan rampa olayları bu problemlerin başında gelmektedir [13]. Çalışmada rampa olaylarını bölgesel olarak incelemek ve azaltmak için tüm bölgelerin birer saatlik zaman aralıklarında 2019, 2020 ve 2021 yıllarındaki üç yıllık RES üretim verileri incelemeye alınmıştır. Türkiye’de aktif olarak faaliyet gösteren Marmara Bölgesi’nde 70, Ege Bölgesi’nde 49, İç Anadolu Bölgesi’nde 19, Akdeniz Bölgesi’nde 13, Karadeniz Bölgesi’nde 10, Doğu Anadolu Bölgesi’nde 3 ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde 1 tesis bulunmaktadır. Tesislere ait üretim verileri TEİAŞ’tan elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan verilerin genel özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir. Bu veriler ışığında, Marmara Bölgesinin en çok ortalama üretim ve standart sapmaya sahip olduğu, Güneydoğu Anadolu Bölgesinin ise en az ortalama üretim ve standart sapmaya sahip olduğu görülmüştür.

Marmara Bölgesi’ndeki standart sapma, diğer tüm bölgeler arasında en yüksek olanıdır. Bu da üretimdeki en yüksek değişkenliğin Marmara Bölgesi’nde meydana geldiğini kanıtlamaktadır. Bölgelerin her birinde maksimum ve minimum değerleri arasındaki farklar dikkate alındığında Marmara Bölgesi’nde 639,24 MW, Ege Bölgesi’nde 1508,36 MW, İç Anadolu Bölgesi’nde 1014,17 MW, Akdeniz Bölgesi’nde 626,33 MW, Karadeniz Bölgesi’nde 39,01 MW, Doğu Anadolu Bölgesi’nde 39,23 MW ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde 47,00 MW olduğu anlaşılmaktadır. Meydana gelen tüm değişimler şebekede aktif olan RES’lerin işletme kısmında güçlükler neden olmaktadır.

Çizelge 1. Türkiye bölgesel RES üretimlerinin istatistiksel ve genel özellikleri

| Özellikler | Marmara | Ege | İç Anadolu | Akdeniz | Karadeniz | Doğu Anadolu | Güneydoğu Anadolu |
|------------------------|-------------------------|---------|------------|---------|-----------|--------------|-------------------|
| Santral Sayısı | 70 | 49 | 19 | 13 | 10 | 3 | 1 |
| Toplam Veri Sayısı | 26304 | 26304 | 26304 | 26304 | 26304 | 26304 | 26304 |
| Veri Zaman Aralığı | 01.01.2019 - 31.12.2021 | | | | | | |
| Standart Sapma (MW) | 621,68 | 307,90 | 262,54 | 127,90 | 101,43 | 35,13 | 14,97 |
| Ortalama Üretim (MW) | 1065,83 | 634,95 | 365,30 | 213,43 | 134,67 | 44,61 | 15,84 |
| Maximum Üretim (MW) | 663,33 | 1514,59 | 1014,27 | 628,32 | 39,01 | 39,23 | 47,00 |
| Minimum Üretim (MW) | 24,09 | 6,23 | 0,10 | 1,99 | 0 | 0 | 0 |
| Toplam Kurulu Güç (MW) | 3139,27 | 1779,82 | 1077,65 | 664,77 | 348,75 | 138,70 | 43,90 |

Ayrıca çalışmada kullanılan, Marmara Bölgesi'nde 70, Ege Bölgesi'nde 49, İç Anadolu Bölgesi'nde 19, Akdeniz Bölgesi'nde 13, Karadeniz Bölgesi'nde 10, Doğu Anadolu Bölgesi'nde 3 ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde 1 kurulu santrale ilişkin saatlik toplam üretimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Türkiye'deki RES'lerin bölgesel olarak saatlik toplam üretimleri

RES üretimlerinin zaman bazında kararsız yapıya sahip olduğu Şekil 3'ten çıkarılmaktadır. Santral üretiminde meydana gelen değişkenliğin rampa olabilmesi, kurulu güçteki değişkenliğin %5 veya daha fazla olmasına bağlıdır [3]. Üretimdeki rampa olaylarını göstermek için toplam kurulu gücün %5, %7,5 ve %10 üzerindeki değişkenlikler hesaplanmıştır. Çizelge 2'de bölgesel saatlik toplam tesis üretimleri (MW) veri seti verilmiştir.

Çizelge 2. Veri seti

| Veri Numara | Tarih | Marmara | Ege | İç Anadolu | Akdeniz | Karadeniz | Doğu Anadolu | Güneydoğu Anadolu |
|-------------|----------------|---------|-----|------------|---------|-----------|--------------|-------------------|
| 1 | 01.01.19 01:00 | 20 | 13 | 21 | 16 | 15 | 19 | 35 |
| 2 | 01.01.19 02:00 | 20 | 14 | 20 | 18 | 17 | 19 | 38 |
| 3 | 01.01.19 03:00 | 22 | 14 | 23 | 17 | 19 | 19 | 41 |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| 26304 | 31.12.21 24:00 | 8 | 6 | 11 | 11 | 5 | 3 | 2 |

2.3. Rampa Hesaplamaları

Herhangi bir zamanki üretimde meydana gelen rampanın büyüklüğünü hesaplamak için Eşitlik 1'deki formüller kullanılmıştır [3].

$$\Delta P_i = p(i) - p(i+t) \quad (1)$$

$$\Delta P = \{\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n\}$$

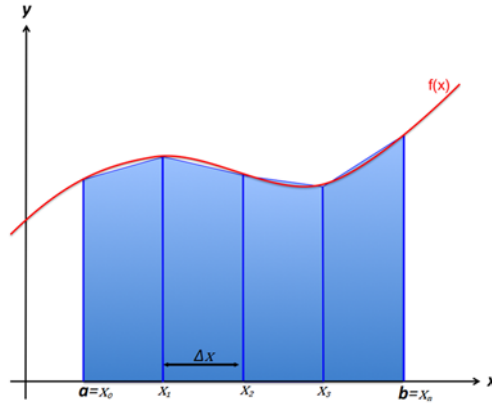
$$i = (1, 2, \dots, n)$$

$$t = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

$$n \in \mathcal{N}$$

Denklemden verilen ΔP_i , i zamandaki rampa büyüklüğünü, $p(i)$ ise i saatindeki santraldeki üretimi göstermektedir. t zamansal periyodu ve n ise santralin saatlik çözünürlük zamanını göstermektedir. Eşitlik 1'de verilen ΔP , tüm zamansal periyotlardaki üretim miktarı için rampa setini ifade etmektedir.

Bu çalışmada, santralin üretimindeki değişkenliklerini hesaplayabilmek için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarındaki fonksiyonlarının, yamuk kuralı kullanılarak histogram grafik alanını hesaplanmıştır. Matematiksel bir yöntem olan yamuk kuralı alan hesaplamaları için kullanılmaktadır. Bu metod, ilgili fonksiyon ile x-ekseni arasında kalan alanı daha küçük yamuklara bölerek gerçek değere yaklaştırmaktadır. Şekil 4'te yamuk kuralı görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4. Yamuk kuralı [17]

Yamuk kuralının formülü Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'te verilmiştir [18]. Eşitlik 2'de, $f(x)$ fonksiyonun a ve b değerleri integral alan sınırlarıdır. a ve b değerleri Eşitlik 4'te detaylı biçimde verilmiştir [18].

$$\int_a^b f(x) dx \quad (2)$$

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{2} \{f(a) + f(b)\} \quad (3)$$

Eşitlik 5'te verilen Δx_i değeri, bölünerek oluşturulan her bir yamuk parçasının taban uzunluğunu göstermektedir. Bir yamuğun alanını hesaplayabilmek için Eşitlik 3'te verilen matematiksel ifade, birden çok yamuk alanı hesabı için Eşitlik 6'daki formül kullanılmaktadır [18]. Eşitlik 6'daki formülle farklı zamansal periyotlardaki saatlik RES üretim değişimlerinin histogram grafik alanlarının hesabı yapılmıştır [18].

$$[a, b] = \{a = x_0 < x_1 < \dots < x_{N-1} < x_N = b\} \quad (4)$$

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1} \quad (5)$$

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=1}^N \frac{f(x_{i-1}) + f(x_i)}{2} \Delta x_i \quad (6)$$

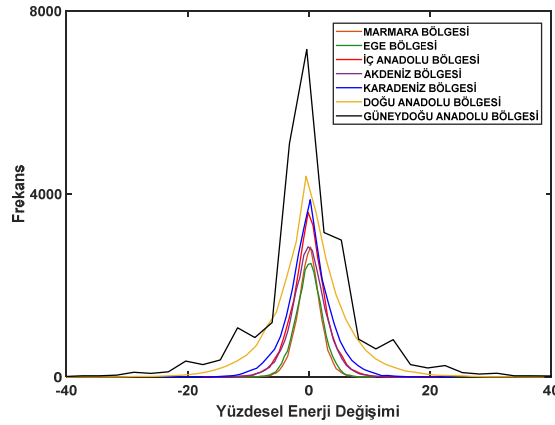
$$= \frac{\Delta x}{2} (f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{N-1}) + f(x_N))$$

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

İki zaman aralığında meydana gelen RES üretimindeki güç değişkenlikleri rampa olayı olarak ifade edilmektedir. RES üretiminde saniyelik ve dakikalık zamansal periyotlarda meydana gelen yüksek rampa olayları şebekede önemli bir zarar meydana getirmemektedir. Ama bir saat ve daha büyük zaman dilimlerinde oluşan rampa olaylarının şebekede dengelenmesi ek maliyetler gerektirmekte ve şebekenin güvenliğini olumsuz etkilemektedir [19-21].

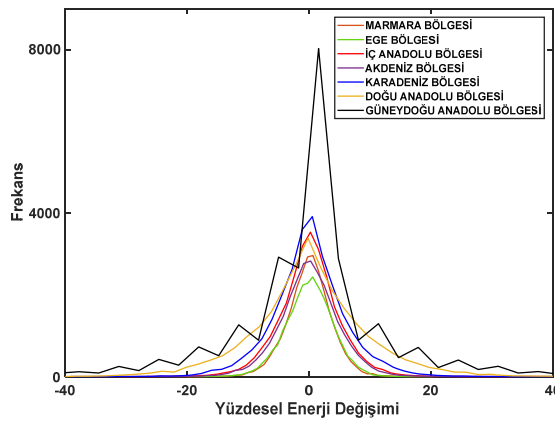
Yapılan çalışmada oluşan rampaların zamansal olarak büyüklüğünü belirlemek amacıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saatlik periyotlardaki rampa olayları incelenmiştir. Çünkü rampa olayları (üretim değişimleri) 1 saat sürerken bazı rampalar daha uzun periyotlarda gerçekleşmektedir. Tüm rampa olaylarının detaylı olarak belirleyebilmek amacıyla yapılan çalışmada 1-6 saatlik zamansal periyotlar incelenmiştir. Türkiye'deki 2019, 2020 ve 2021 yıllarına ait RES üretimindeki rampa olaylarının farklı zamansal periyotlarda bölgesel olarak saatlik değişimleri incelenmiştir. Bu değişiklikler per unit olarak histogram grafiklerinde Şekil 5, 6, 7, 8, 9 ve 10'da verilmiştir.

Bir saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 111, 116, 182, 164, 223, 365 ve 603'tür.



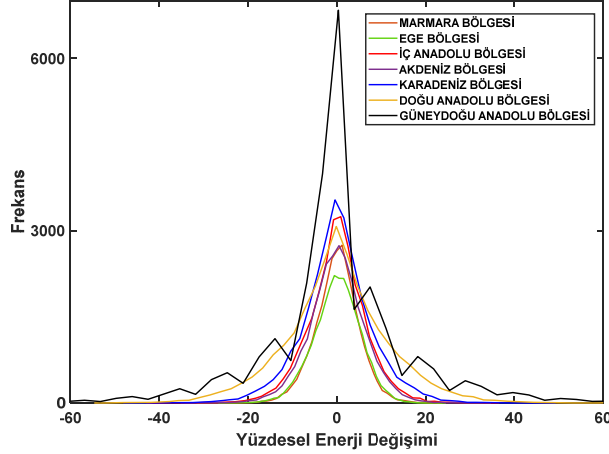
Şekil 5. 1 saatlik periyottaki rampa olayları

Bir saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Ege ve Marmara bölgesidir. Fakat rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5 ve üzerinde en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiştir. Aynı zamanda İç Anadolu bölgesi için toplam kümülatif rampa alanı Akdeniz bölgesinden daha fazla olmasına rağmen kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında daha az olduğu görülmüştür.



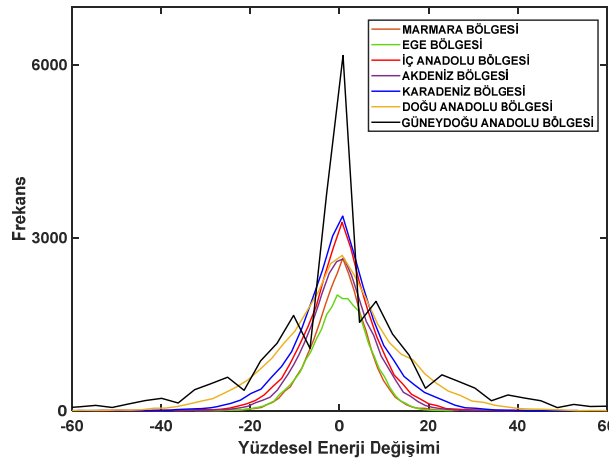
Şekil 6. 2 saatlik periyottaki rampa olayları

İki saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 208, 197, 302, 263, 373, 464 ve 687'dir. İki saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5, %7,5 ve üzerinde en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiş, %10 ve üzerindeki en düşük rampa olayları ise Ege bölgesinde görülmüştür.



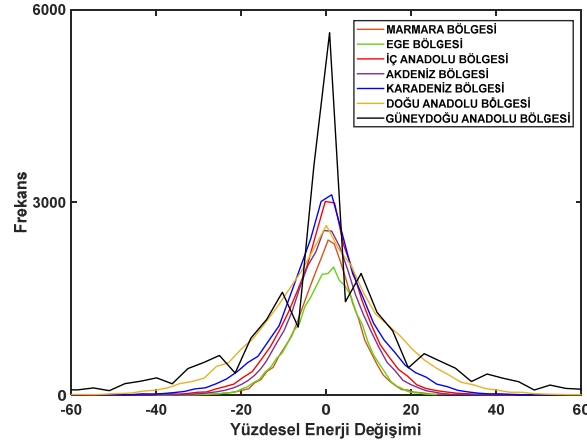
Şekil 7. 3 saatlik periyottaki rampa olayları

Üç saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 268, 252, 375, 338, 456, 556 ve 747'dir. Üç saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5, %7,5 ve üzerinde en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiş, %10 ve üzerindeki en düşük rampa olayları ise Ege bölgesinde görülmüştür. Aynı zamanda İç Anadolu bölgesi için toplam kümülatif rampa alanı Akdeniz bölgesinden daha fazla olmasına rağmen kurulu güce göre %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında daha az olduğu görülmüştür.



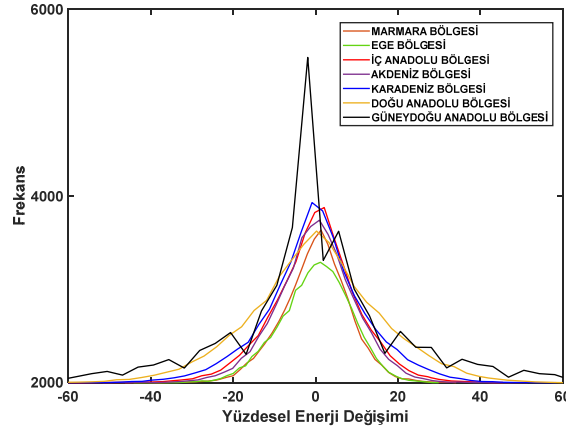
Şekil 8. 4 saatlik periyottaki rampa olayları

Dört saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 311, 288, 452, 394, 530, 626 ve 790'dır. Dört saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiştir.



Şekil 9. 5 saatlik periyottaki rampa olayları

Beş saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 345, 329, 501, 442, 574, 685 ve 803'tür. Beş saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiştir.



Şekil 10. 6 saatlik periyottaki rampa olayları

Altı saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 392, 368, 537, 500, 605, 727 ve 850'dir. Altı saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %7,5 ve %10 üzerinde en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiştir. Aynı zamanda İç Anadolu bölgesi için toplam kümülatif rampa alanı Akdeniz bölgesinden daha fazla olmasına rağmen kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında daha az olduğu görülmüştür.

Rampa olaylarında hesaplanan minimum değişim negatif rampayı, maksimum değişim ise pozitif rampayı ifade etmektedir. Tesislerde; geçmişteki üretimlere göre gerçekleşen üretimdeki azalış negatif değişimi, artış ise pozitif değişimi göstermektedir.

Marmara Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif yönlü kümülatif rampa alanları Çizelge 3'te verilmiştir. Rampa olayları kümülatif rampa alanlarına göre incelendiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 üzerindeki rampa olaylarında gözlemlenmiştir. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında görülmüştür. Oluşma şekline göre rampaları

incelediğinde, kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında iki saatlik zamansal periyot hariç tüm zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında bir, üç ve dört saatlik zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı iki, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda ise negatif rampa alanı daha fazla olduğu gözlenmiştir. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında ise tüm zamansal periyotlarda pozitif kümülatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve %10 üzerindeki rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyotta toplam rampa alanı 0'a yakındır ve bu değer Marmara Bölgesi için %7,5 ve %10 üzeri rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyotta rampa olayı gerçekleşmediğini göstermektedir.

Ege Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif yönlü kümülatif rampa alanları Çizelge 4'te verilmiştir. Rampa olayları kümülatif rampa alanlarına göre incelendiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana geldiği görülmüştür. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif yönlü kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında gözlenmiştir. Oluşma şekline göre rampaları incelediğinde, kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında bir ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise tüm zamansal periyotlarda pozitif kümülatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında bir, dört ve altı saatlik zamansal periyotlarda negatif ve pozitif rampa alanları yaklaşık olarak aynı hesaplanmıştır. İki, üç ve beş saatlik zamansal periyotlarda ise pozitif rampa alanı daha fazla olduğu gözlenmiştir. %7,5 ve %10 üzerindeki rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyotta toplam rampa alanı 0'a yakındır ve bu değer Ege Bölgesi için %7,5 ve %10 üzeri rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyotta rampa olayı gerçekleşmediğini göstermektedir.

Çizelge 3. Marmara Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

| | %5 + | | | %7,5 + | | | %10 + | | |
|---------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam |
| 1 saat | 1,02 | 0,90 | 1,91 | 0,13 | 0,08 | 0,21 | 0,02 | 0,01 | 0,03 |
| 2 saat | 14,90 | 17,11 | 32,01 | 3,91 | 4,10 | 8,01 | 1,49 | 1,03 | 2,53 |
| 3 saat | 36,87 | 34,28 | 71,15 | 18,02 | 15,14 | 33,15 | 8,14 | 6,30 | 14,45 |
| 4 saat | 56,55 | 52,83 | 109,37 | 30,81 | 25,61 | 56,42 | 15,54 | 11,51 | 27,06 |
| 5 saat | 81,61 | 69,43 | 151,04 | 48,43 | 50,69 | 99,12 | 26,59 | 25,28 | 51,87 |
| 6 saat | 104,64 | 91,29 | 195,93 | 63,26 | 66,82 | 130,08 | 47,87 | 33,74 | 81,61 |

Çizelge 4. Ege Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

| | %5 + | | | %7,5 + | | | %10 + | | |
|---------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam |
| 1 saat | 1,35 | 1,43 | 2,77 | 0,16 | 0,12 | 0,28 | 0,01 | 0,01 | 0,03 |
| 2 saat | 20,00 | 15,53 | 35,53 | 6,35 | 4,12 | 10,46 | 1,72 | 0,76 | 2,48 |
| 3 saat | 37,41 | 36,73 | 74,14 | 20,32 | 17,63 | 37,95 | 6,58 | 4,72 | 11,30 |
| 4 saat | 63,38 | 62,30 | 125,69 | 38,81 | 34,44 | 73,25 | 16,54 | 16,83 | 33,37 |
| 5 saat | 86,42 | 80,32 | 166,74 | 55,58 | 45,47 | 101,05 | 33,58 | 22,87 | 56,45 |
| 6 saat | 88,06 | 102,53 | 190,60 | 71,21 | 59,98 | 131,18 | 44,19 | 43,77 | 87,96 |

İç Anadolu Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif yönlü kümülatif rampa alanları Çizelge 5'te verilmiştir. Kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları değerlendirildiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında oluşmuştur. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana gelmiştir. Meydana geliş şekline göre rampalar değerlendirildiğinde kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında bir, beş ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise iki ve üç saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında dört, beş ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür.

Akdeniz Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif kümülatif rampa alanları Çizelge 6'da verilmiştir. Kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları değerlendirildiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında oluşmuştur. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana gelmiştir. Oluşum şekline göre rampalar incelendiğinde, kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise iki ve beş saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında dört saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Karadeniz Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif kümülatif rampa alanları Çizelge 7'de verilmiştir. Kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları incelendiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana gelmiştir. Aynı zamansal periyotta en küçük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında oluşmuştur. Oluşma şekline göre rampaları değerlendirildiğinde kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında beş ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. Beş saatlik zamansal periyotta negatif ve pozitif rampa alanları birbirine çok yakın değerlerdedir. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise 3, 4 ve 5 saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu gözlenmiştir. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında 1, 2 ve 5 saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu, 5 saatlik zamansal periyotta negatif ve pozitif rampa alanları birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

Çizelge 5. İç Anadolu Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

| | %5 + | | | %7,5 + | | | %10 + | | |
|---------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam |
| 1 saat | 6,67 | 7,72 | 14,39 | 1,78 | 1,89 | 3,67 | 0,53 | 0,44 | 0,97 |
| 2 saat | 47,72 | 40,66 | 88,38 | 21,01 | 17,07 | 38,08 | 8,45 | 6,94 | 15,38 |
| 3 saat | 75,33 | 72,28 | 147,61 | 36,68 | 33,08 | 69,77 | 24,49 | 21,85 | 46,34 |
| 4 saat | 117,47 | 96,78 | 214,25 | 61,11 | 67,54 | 128,65 | 42,31 | 45,97 | 88,28 |
| 5 saat | 120,51 | 130,15 | 250,66 | 88,96 | 93,48 | 182,44 | 64,16 | 65,81 | 129,97 |
| 6 saat | 136,46 | 143,96 | 280,42 | 102,80 | 105,64 | 208,44 | 75,72 | 76,53 | 152,25 |

Çizelge 6. Akdeniz Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

| | %5 + | | | %7,5 + | | | %10 + | | |
|---------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam |
| 1 saat | 9,18 | 6,84 | 16,02 | 1,88 | 1,99 | 3,86 | 0,31 | 0,38 | 0,69 |
| 2 saat | 35,90 | 30,75 | 66,65 | 16,96 | 13,81 | 30,77 | 5,22 | 5,60 | 10,82 |
| 3 saat | 68,78 | 56,82 | 125,60 | 35,09 | 39,80 | 74,89 | 16,28 | 18,24 | 34,52 |
| 4 saat | 91,98 | 87,08 | 179,06 | 48,69 | 63,36 | 112,05 | 34,16 | 30,61 | 64,77 |
| 5 saat | 107,35 | 98,44 | 205,79 | 79,66 | 72,23 | 151,89 | 41,53 | 51,41 | 92,93 |
| 6 saat | 148,24 | 157,05 | 305,29 | 82,96 | 86,37 | 169,34 | 59,82 | 61,33 | 121,15 |

Çizelge 7. Karadeniz Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

| | %5 + | | | %7,5 + | | | %10 + | | |
|---------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam |
| 1 saat | 16,05 | 19,90 | 35,95 | 7,07 | 5,90 | 12,97 | 1,78 | 2,44 | 4,21 |
| 2 saat | 57,99 | 66,53 | 124,52 | 38,76 | 30,07 | 68,83 | 16,62 | 20,16 | 36,78 |
| 3 saat | 93,34 | 108,63 | 201,97 | 65,74 | 76,86 | 142,60 | 45,66 | 36,78 | 82,44 |
| 4 saat | 136,98 | 152,88 | 289,86 | 98,55 | 110,22 | 208,77 | 70,42 | 56,18 | 126,59 |
| 5 saat | 164,40 | 164,27 | 328,67 | 121,24 | 122,26 | 243,50 | 89,17 | 89,81 | 178,98 |
| 6 saat | 188,41 | 172,73 | 361,14 | 143,19 | 131,76 | 274,95 | 107,70 | 99,49 | 207,19 |

Doğu Anadolu Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki negatif ve pozitif kümülatif rampa alanları Çizelge 8'de verilmiştir. Kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları değerlendirildiğinde en büyük rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında oluşmuştur. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana gelmiştir. Meydana geliş şekline göre rampalar değerlendirdiğinde kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında iki, üç ve dört saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha büyük olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise beş ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında bir, iki ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu, beş saatlik zamansal periyotta negatif ve pozitif rampa alanları birbirine yaklaşık olarak eşit değerlerde olduğu görülmüştür.

Güneydoğu Anadolu Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif kümülatif rampa alanları Çizelge 9'da verilmiştir. Rampa olayları kümülatif rampa alanlarına göre analiz edildiğinde en yüksek rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında gözlenmiştir. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında gözlenmiştir. Oluşum şekline göre rampalar incelendiğinde kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise dört ve beş saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu, bir saatlik zamansal periyotta negatif ve pozitif rampa alanları birbirine yaklaşık olarak eşit olduğu görülmüştür. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında bir ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha büyük olduğu görülmüştür.

Çizelge 8. Doğu Anadolu Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

| | %5 + | | | %7,5 + | | | %10 + | | |
|---------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam |
| 1 saat | 66,53 | 56,12 | 122,66 | 31,50 | 38,65 | 70,16 | 21,92 | 18,68 | 40,60 |
| 2 saat | 112,80 | 118,75 | 231,55 | 84,78 | 89,34 | 174,13 | 62,84 | 49,49 | 112,33 |
| 3 saat | 145,00 | 148,79 | 293,80 | 111,09 | 114,53 | 225,63 | 84,70 | 87,18 | 171,88 |
| 4 saat | 184,25 | 206,90 | 391,15 | 143,07 | 161,22 | 304,29 | 109,44 | 125,72 | 235,16 |
| 5 saat | 246,99 | 245,10 | 492,09 | 195,34 | 192,99 | 388,33 | 151,73 | 151,85 | 303,58 |
| 6 saat | 270,40 | 258,37 | 528,77 | 214,72 | 205,79 | 420,51 | 168,86 | 162,70 | 331,56 |

Çizelge 9. Güneydoğu Anadolu Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

| | %5 + | | | %7,5 + | | | %10 + | | |
|---------------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam | Pozitif | Negatif | Toplam |
| 1 saat | 112,97 | 137,88 | 250,85 | 83,72 | 83,45 | 167,17 | 56,12 | 62,91 | 119,03 |
| 2 saat | 146,99 | 145,53 | 292,52 | 146,99 | 145,53 | 292,52 | 111,67 | 109,80 | 221,47 |
| 3 saat | 212,63 | 208,80 | 421,43 | 162,16 | 149,56 | 311,71 | 162,16 | 149,56 | 311,71 |
| 4 saat | 257,89 | 237,03 | 494,92 | 207,32 | 237,03 | 444,35 | 207,32 | 177,29 | 384,61 |
| 5 saat | 271,94 | 252,47 | 524,41 | 222,83 | 252,47 | 475,30 | 222,83 | 193,66 | 416,49 |
| 6 saat | 313,32 | 309,69 | 623,00 | 237,32 | 235,91 | 473,23 | 186,41 | 187,59 | 374,00 |

Tüm bölgeler için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki negatif ve pozitif kümülatif rampa alanı toplamaları Çizelge 10,11 ve 12'de verilmiştir. Tüm bölgelerde aynı zamansal dönemde toplam kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları analiz edildiğinde en yüksek rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında görülmüştür. En düşük toplam kümülatif rampa alanı ise %10 ve üzerindeki rampa olaylarında gözlenmiştir. %5 ve üzerindeki rampa olaylarında altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda en düşük toplam kümülatif rampa alanı Marmara Bölgesi'ne, altı saatlik zamansal periyotta ise en az kümülatif rampa alanı Ege Bölgesi'ne aittir. Ayrıca tüm zamansal periyotlarda en yüksek toplam kümülatif rampa alanı Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ne aittir. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında, bir saatlik zamansal periyotta Marmara Bölgesi ve Ege Bölgesi toplam kümülatif rampa alanları 0 olduğu görülmüş olup bu iki bölgede

rampa olayı gerçekleşmediği anlaşılmıştır. Diğer zamansal periyotlarda en düşük kümülatif rampa alanı Marmara Bölgesi'ne aittir. Buna ek olarak, %7,5 ve üzerindeki rampa olayları için tüm zamansal periyotlarda en yüksek kümülatif rampa alanı Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ne aittir. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında, bir saatlik zamansal periyotta Marmara Bölgesi ve Ege Bölgesi toplam kümülatif rampa alanları 0 olduğu görülmüş olup bu iki bölgede rampa olayı meydana gelmediği anlaşılmıştır. Ayrıca iki ve üç saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda en küçük toplam kümülatif rampa alanı Marmara Bölgesi'ne aittir. Buna ek olarak, %10 ve üzerindeki rampa olayları için tüm zamansal periyotlarda en yüksek toplam kümülatif rampa alanı Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ne aittir.

Çizelge 10. Tüm bölgelerin %5 ve üzeri toplam kümülatif rampa alanları

| | Marmara | Ege | İç Anadolu | Akdeniz | Karadeniz | Doğu Anadolu | Güneydoğu Anadolu |
|--------|---------|-----|------------|---------|-----------|--------------|-------------------|
| 1 saat | 2 | 3 | 14 | 16 | 36 | 123 | 251 |
| 2 saat | 32 | 36 | 88 | 67 | 125 | 232 | 293 |
| 3 saat | 71 | 74 | 148 | 126 | 202 | 294 | 421 |
| 4 saat | 109 | 126 | 214 | 179 | 290 | 391 | 495 |
| 5 saat | 151 | 167 | 251 | 206 | 329 | 492 | 524 |
| 6 saat | 196 | 191 | 280 | 305 | 361 | 529 | 623 |

Çizelge 11. Tüm bölgelerin %7,5 ve üzeri toplam kümülatif rampa alanları

| | Marmara | Ege | İç Anadolu | Akdeniz | Karadeniz | Doğu Anadolu | Güneydoğu Anadolu |
|--------|---------|-----|------------|---------|-----------|--------------|-------------------|
| 1 saat | 0 | 0 | 4 | 4 | 13 | 70 | 167 |
| 2 saat | 8 | 10 | 38 | 31 | 69 | 174 | 293 |
| 3 saat | 33 | 38 | 70 | 75 | 143 | 226 | 312 |
| 4 saat | 56 | 73 | 129 | 112 | 209 | 304 | 444 |
| 5 saat | 99 | 101 | 182 | 152 | 244 | 388 | 475 |
| 6 saat | 130 | 131 | 208 | 169 | 275 | 421 | 473 |

Çizelge 12. Tüm bölgelerin %10 ve üzeri toplam kümülatif rampa alanları

| | Marmara | Ege | İç Anadolu | Akdeniz | Karadeniz | Doğu Anadolu | Güneydoğu Anadolu |
|--------|---------|-----|------------|---------|-----------|--------------|-------------------|
| 1 saat | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 | 41 | 119 |
| 2 saat | 3 | 2 | 15 | 11 | 37 | 112 | 221 |
| 3 saat | 14 | 11 | 46 | 35 | 82 | 172 | 312 |
| 4 saat | 27 | 33 | 88 | 65 | 127 | 235 | 385 |
| 5 saat | 52 | 56 | 130 | 93 | 179 | 304 | 416 |
| 6 saat | 82 | 88 | 152 | 121 | 207 | 332 | 374 |

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç yıllık zaman aralığında Türkiye'deki rüzgâr enerji santral üretimlerinde oluşan rampa olaylarının farklı zamansal periyotlar da ve bölgesel olarak incelemesini amaçlanmıştır. Rüzgâr enerji tesislerinde oluşan rampaların büyüklüğünün ve oluşma zamanının bilinmesi şebeke işletmeleri için büyük önem arz etmektedir. Çünkü üretimdeki azalmalarda şebeke işletmeleri emre amade üretimi (anlık kullanım için hazır enerji) kullanmaktadır. Üretimlerdeki artış durumunda ise şebeke yük atmaktadır. Bu iki senaryoda şebeke işletmeleri için büyük maliyetler oluşturmaktadır. Bu amaçla çalışmada Türkiye'deki Marmara Bölgesi'nde 70, Ege Bölgesi'nde 49, İç Anadolu Bölgesi'nde 19, Akdeniz Bölgesi'nde 13, Karadeniz Bölgesi'nde 10, Doğu Anadolu Bölgesi'nde 3, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bir rüzgâr

enerji santralinin 2019, 2020 ve 2021 yıllarını kapsayan üç yıllık ortalama saatlik üretimleri kullanılmıştır. Bu tesislerin saatlik enerji üretimlerine göre bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda oluşan rampa büyüklükleri, standart sapmaları ve yönü hesaplanmıştır. Kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10'un üzerindeki rampalar incelenmiştir. İnceleme bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda bölgesel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda;

- Kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olayları altı saatlik zamansal periyot hariç tüm zamansal periyotlarda en az Marmara Bölgesi'nde görülmüştür. Altı saatlik zamansal periyotta %5 ve üzeri için toplam kümülatif rampa alanı Marmara Bölgesi için 196, Ege Bölgesi için ise 191'dir ve bu zamansal periyotta en az rampa olayları Ege Bölgesi'nde görülmüştür.
- Kurulu güce göre %7,5 ve üzerindeki rampa olayları bir saatlik zamansal periyot hariç tüm zamansal periyotlarda en az Marmara Bölgesi'nde meydana gelmiştir. Bir saatlik zamansal periyotta Marmara ve Ege Bölgesi için toplam kümülatif rampa alanı 0'dır ve bu zamansal periyotta en az rampa olayları Marmara ve Ege Bölgesi'nde meydana gelmiştir.
- Kurulu güce göre %10 ve üzerindeki rampa olayları bir, iki ve üç saatlik zamansal periyotlar hariç en az Marmara Bölgesi'nde meydana gelmiştir. İki ve üç saatlik zamansal periyotlarda toplam kümülatif rampa alanları Marmara Bölgesi için sırasıyla; 3 ve 14, Ege Bölgesi için ise sırasıyla; 2 ve 11'dir.

Bu sonuçlara göre iki ve üç saatlik zamansal periyotlarda en az rampa olayları Ege Bölgesi'nde görülmüştür. Kurulu güce göre %10 ve üzeri için bir saatlik zamansal periyotta ise Marmara ve Ege Bölgesi için toplam kümülatif rampa alanları 0'dır. Ayrıca kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki rampa olayları tüm zamansal periyotlarda tüm bölgeler içerisinde en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde meydana gelmiştir. Sonuç olarak, elde edilen tüm veriler değerlendirildiğinde Marmara ve Ege Bölgesi'nde diğer bölgelere göre RES üretiminin çok fazla değişken olmadığı ve bu bölgelerde rampa olaylarının bozucu etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Aksine Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde diğer bölgelere göre RES üretimindeki değişkenliğin ve şebekedeki bozucu etkinin çok fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde bu çalışma, Türkiye'de kurulması planlanan yeni tesislere bulunduğu bölge açısından ışık tutacak niteliktedir. Aynı zamanda, mevcut kurulu tesisler için ise gerçekleşecek olan rampa olayları için önlem almalarına fayda sağlayabilecek ve Türkiye ölçeğinde rampa olaylarının tahmini üzerine yapılan çalışmalara girdi niteliği taşıyabilecektir.

Bu makale çalışması Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında 2022 yılında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilen "Türkiye'de RES üretimi rampa olaylarının farklı zamansal periyotlarda bölgesel olarak incelenmesi" adlı yüksek lisans tezinden türetilmiştir (Danışman: Doç. Dr. Ö. Fatih KEÇECİOĞLU, Dr. Öğr. Üyesi İsrail KARADÖL).

5. KAYNAKLAR

1. Aydın, M., 2016. Enerji verimliliğinin sürdürülebilir kalkınmadaki rolü: Türkiye değerlendirmesi. Yönetim Bilimleri Dergisi / Journal of Administrative Sciences, 14(28), 409-441.
2. Ersöz, A., 2022., Dünya ve Türkiye enerji görünümü gelecek yaklaşımları. Temiz Enerji Haber Portalı.
3. Frate, G.F., Cherubini, P., Tacconelli, C., Micangeli, A., Ferrari, L., Desideri, U., 2019. Ramp rate abatement for wind power plants: a techno-economic analysis. Applied Energy, 254-255, Science Direct.
4. Gevorgian, V., Booth, S., 2013. Review of PREPA technical requirements for interconnecting wind and solar generation. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 72, United States: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information.
5. Ela, E., Kemper, J., 2009. Wind plant ramping behavior. Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, 38.
6. Dhiman, H., Deb, D., Guerrero, J., 2019. Hybrid machine intelligent SVR variants for wind forecasting and ramp events.
7. Ery, A. C., Jan, K., Matthew, L., 2014. A poisson model for anisotropic solar ramp rate correlations.
8. Ekström, J., Koivisto, M., Mellin, I., Millar, R.J., Lehtonen, M., 2018. A statistical modeling methodology for long-term wind generation and power ramp simulations in new generation locations. Energies 2018, 11(9), 2442

9. Zucатели, P., Nascimento, E., Santos, A., Arce, A., Moreira, D., 2021. An investigation on deep learning and wavelet transform to nowcast wind power and wind power ramp: A case study in Brazil and Uruguay. *Energy*, 230, 120842.
10. Martins, J., Spataru, S., Sera, D., Stroe, D.-l., Lashab, A., 2019. Comparative study of ramp-rate control algorithms for PV with energy storage systems. *Energies*, 12(7), 1342.
11. Probst, O., 2020. A new strategy for short-term ramp rate control in wind farms. *Electrical Power and Energy Systems*, 120, 105969.
12. Li, Y., Musilek, P., Lozowski, E., 2017. Improving the prediction of wind power ramps using texture extraction techniques applied to atmospheric pressure fields. *International Journal of Data Science and Analytics*, 237-250.
13. Karadöl, İ., Yıldız, C., Şekkeli, M., 2020. Spatial distribution optimization of wind power plants to be installed in Turkey to minimize wind power ramp events. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 959-971.
14. Şenel, M. C., Koç, E., 2015. Dünyada ve Türkiye’de rüzgâr enerjisi durumu genel değerlendirme, *Mühendis ve Makina*, 56(663), 46-56.
15. Rüzgâr Enerjisi Hakkında Doğru Bilinen Yanlışlar. Ekoyapı: <https://124.im/39uXHA5> Erişim Tarihi: 12.12.2020.
16. Behçet, R., Gül, H., Oral, H., Oral, F., 2014. Rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından Malatya ilinin Doğu Anadolu bölgesindeki yeri. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 65-73
17. Integration Using the Trapezoidal Method. Calvin Üniversitesi. <https://cs.calvin.edu/courses/cs/374/exercises/05/lab/>, Erişim Tarihi: 12.08.2021
18. Karadöl, İ., Şekkeli, M., 2021. Nehir tipi hidroelektrik santrallerinde rampa olayları: Türkiye örneği. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 361-375.
19. Couto, A., Costa, P., Rodrigues, L., Lopes, V., 2015. Impact of weather regimes on the wind power ramp forecast in Portugal. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 6(3), 934-942, IEE Xplore.
20. Lia, H., Wang, J., Lu, H., Guo, Z., 2018. Research and application of a combined model based on variable weight for short term wind speed forecasting. *Renewable Energy*, 116, 669-684.
21. Radu, D., Berger, M., Raphael, F., Hardy, S., Fettweis, X., Du, M.L., Ernst, D., 2019. Complementarity assessment of south greenland katabatic flows and west Europe wind regimes. *Energy*, 175, 393-401.

