

ÜRETİLEN RÜZGAR ENERJİSİ TAHMİNİNDE HAVA KOŞULU VERİLERİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ VE MODELLENMESİ

Ege ERGİNEL¹, Çisil TİMURALP^{2*}

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Eskişehir ORCID No:

<http://orcid.org/0009-0004-3155-3617>

^{2*} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-2894-3575>

Anahtar Kelimeler	Öz
Yenilenebilir Enerji Rüzgar Türbini Rüzgar Hızı Hava Koşulları İstatistiksel Analiz Regresyon Analizi	<i>Dünya çapında ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi Türkiye'nin enerji ihtiyacının %10,6'sını karşılamaktadır. Rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Rüzgâr türbinin tasarımı ve doğal faktörler üretim kapasitesini doğrudan ve dolaylı olarak etkilemektedir. Doğal faktörlerin içerisinde rüzgâr santralinin kurulduğu konum ve konumdaki hâkim hava olayları yer almaktadır. Rüzgârdan üretilen enerjinin hava sıcaklığı, nemlilik, anlık esinti ve rüzgâr hızı gibi değişkenler ile ilişkisinin olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada, bahsedilen hâkim hava olayları verilerinin üretilen enerji ile arasındaki ilişkinin istatistiksel analizi yapılmış ve yorumlanmıştır. Araştırma için Eskişehir bölgesinde kurulu, Kartal Res rüzgar enerji santrali seçilmiştir. İlgili rüzgar türbininden Ekim-2023 ayı için toplanan veriler ile hava koşulları verileri arasındaki ilişkiler pearson-korelasyon analizi ile belirlenmiş, üretilen enerjiye etki eden değişkenlerin belirlenmesi için ise regresyon analizi yapılmıştır. Üretilen enerjinin tahmininde rüzgar hızına bağlı olarak kübik matematiksel modelin daha iyi olduğu ortaya konmuştur. Bahsedilen kübik matematiksel modelin üretilen enerjideki değişkenliği $R^2(adj)=\%65,39$ ile iyi derecede açıkladığı tespit edilmiştir.</i>

STATISTICAL ANALYSIS AND MODELING OF WEATHER CONDITION DATA IN ESTIMATE OF PRODUCED WIND ENERGY

Key Words	Abstract
Renewable energy Wind turbine Wind speed Weather conditions Statistical analysis Regression Analysis	<i>Wind energy, a widely utilized renewable energy source both globally and in our country, accounts for 10.6% of our nation's energy demand. A wind turbine is a system that converts the kinetic energy from wind into electrical energy. The design of wind turbines and natural factors directly and indirectly affect their production capacity. Among these natural factors are the geographical location of the wind farm and prevalent weather phenomena in the area. It is believed that wind energy production correlates with variables such as air temperature, humidity, instantaneous breeze, and wind speed. This research conducts a statistical analysis and interpretation of the relationship between the mentioned dominant weather conditions data and the energy produced. The Kartal Res wind energy plant, situated in the Eskisehir region, was selected for this study. Pearson correlation analysis was employed to determine the relationships between the collected data for October 2023 from the relevant wind turbine and the weather conditions data. Regression analysis was conducted to identify the variables affecting the energy produced. It was found that a cubic mathematical model based on wind speed performs better in predicting the generated energy. The mentioned cubic mathematical model adequately explains the variability in the produced energy, with an $R^2(adj)$ of 65.39%.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 03.04.2024

Kabul Tarihi : 15.08.2024

Research Article

Submission Date : 03.04.2024

Accepted Date : 15.08.2024

* Sorumlu yazar: cisil@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1460119>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Günümüzde enerji talepleri hızla artarken, dünya kaynaklarını koruma ve çevresel sürdürülebilirliği sağlama ihtiyacı da bir o kadar önem kazanmıştır. Bu kaynaklar, endüstriyel devrimden bu yana ekonomik büyümeyi desteklemiş ve modern yaşamın temelini oluşturmuştur. Ancak fosil yakıtların kullanımı ciddi çevresel ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan karbon dioksit (CO₂) ve diğer sera gazları, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin başlıca nedenlerindedir. Ayrıca, fosil yakıtların çıkarılması, taşınması ve işlenmesi süreçlerinde çevresel kirlenme ve habitat tahribatı meydana gelmektedir. Ekonomik açıdan, fosil yakıtların arzı sınırlıdır ve fiyatları dalgalanmalara karşı hassastır. Bu durum, enerji güvenliğini tehdit etmekte ve enerji bağımlılığını artırmaktadır. Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması, uzun vadede sürdürülebilir bir enerji politikası oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji ihtiyacını karşılamak ve çevresel etkileri en aza indirmek adına önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, özellikle rüzgar enerjisinin küresel enerji dengesini dönüştürme potansiyeline odaklanılmıştır.

Dünya genelinde kullanılan enerjinin önemli bir kısmı yenilenebilir kaynaklardan elde edilmektedir. 2020 yılında, dünya genelinde toplam elektrik üretiminin yaklaşık %29'u yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır (Global Wind Energy Council, 2020). Bu oran, güneş, rüzgar, hidroelektrik ve diğer yenilenebilir kaynakların birleşiminden oluşmaktadır. Yenilenebilir enerjinin bu payı, birçok ülkenin enerji politikalarında yaptığı düzenlemeler ve yatırımlar sayesinde her yıl artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki bu artış, fosil yakıtların çevresel etkileri ve iklim değişikliği gibi küresel sorunların azaltılmasına yönelik çabaların bir parçası olarak görülmektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na (IRENA) göre, 2020 yılında dünya genelinde yenilenebilir enerji kapasitesi 2,799 GW'a ulaşmıştır ve bu kapasitenin büyük bir kısmı hidroelektrik, güneş ve rüzgar enerjisinden gelmektedir (International Renewable Energy Agency, 2020).

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin bir potansiyele sahiptir. 2020 yılı verilerine göre, Türkiye'nin toplam elektrik üretiminin %42'si yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmektedir (TEİAŞ, 2020). Bu oran, hidroelektrik, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile sağlanmaktadır. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, 2023 yılında elektrik üretiminin %19.6'sı hidrolik enerjiden, %10,4'ü rüzgar enerjisinden, %5.7'si güneş enerjisinden ve %3,4'lük kısmı da jeotermal enerjiden sağlanmıştır. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

Yenilenebilir enerji, güneş, rüzgar, su ve biyokütle gibi doğal kaynaklardan elde edilen enerji türlerini içermektedir. Rüzgar enerjisi, son yıllarda küresel enerji talebinin büyük bir bölümünü karşılamak amacıyla temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Kusiak, Zhang, Verma, 2013). Rüzgar enerjisi, doğal rüzgar akımlarının kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek çevre dostu bir enerji üretim yolunu sunmaktadır. Bu kaynağı çekici kılan faktörlerden birisi sınırsız bir kaynak olması ve atmosferde sürekli olarak meydana gelen rüzgar hareketlerinden elde edilebilmesidir. Diğer faktörler ise, rüzgar türbinlerinin ve tesislerinin kurulum ve işletme aşamalarında diğer enerji kaynaklarına kıyasla düşük karbon emisyonlarına sahip olması ve nispeten daha az maliyetli kurulabilmesidir. T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu verilerine göre 2024 yılı Ocak ayı itibarıyla Türkiye'nin toplam kurulu gücü 107.270,87 MW olup bunun 59.467,82 MW'lık kısmı (%55,44'ü) yenilenebilir enerji kaynaklıdır. Elektrik kurulu gücümüzün 11.885,90 MW'ı rüzgar enerjisine dayanmakta ve bu oran toplam kurulu güç içinde %11,08'lik dilimi oluşturmaktadır (EPDK, 2024).

Rüzgar türbinlerinin verimli çalışabilmesi ve maksimum enerjiyi üretebilmesi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler rüzgar türbinlerinin fiziksel yapıları olabileceği gibi hava basıncı, nemlilik, anlık esinti ve rüzgâr hızı gibi hava şartlarına da bağlı olabilir. Rüzgar Enerjisi Üretimi, diğer geleneksel kaynaklardan farklı olarak, sadece rüzgar kaynağına bağımlıdır. Rüzgâr şiddetinin alansal ve zamansal olarak kesikli olması nedeniyle rüzgâr güç üretiminin kısa süreli tahmini ve planlamasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu kapsamda, özellikle rüzgâr enerjisi üreticileri ve kamunun enerji yönetimi açısından, doğru ve güvenilir tahminler önem kazanmaktadır (Dündar, Dokuyuncu, Oğuz ve Bacanlı 2011).

2. Bilimsel Yazın Taraması

Rüzgar enerjisi, geniş rezervleri ve kirlilik içermeyen yapısı nedeniyle, rüzgar enerjisi üretiminde yaygın olarak kullanılan, ümit verici bir yenilenebilir enerji kaynağını temsil etmektedir (Kusiak, Zhang ve Verma, 2013). Son yıllarda yapılan araştırmalarla özellikle rüzgar hızındaki değişkenlik, enerji üretim verimliliğinin artırılması ve üretim maliyetinin düşürülmesi gibi konulara odaklanarak sektördeki gelişmeye katkıda bulunulmuştur. Rüzgar hızı ve diğer faktörler ile üretilen enerji arasındaki ilişkiyi açıkça ortaya koymak araştırmanın geleceğinde hava tahmin raporları analiz edilerek üretilecek enerjinin saatler hatta günler öncesinden tahmin edilmesine olanak sağlayabilmektedir. Bu da enerji planlaması açısından oldukça önemlidir. Ackermann ve Soder (2000) çalışmalarında rüzgar türbinleri ve rüzgar projelerindeki sorunlar da dahil olmak üzere rüzgar

enerjisi teknolojisindeki tarihsel gelişmeleri ortaya koymuşlardır. Weisser ve Garcia (2005) ise rüzgar-dizel hibrit sistemlerini araştırmış ve bunların zorluklarını tartışmıştır. Herbert, Iniyen, Sreevalsan ve Rajapandian (2007) rüzgâr kaynağı değerlendirmesini, yer seçimini ve iz etkileri de dahil olmak üzere aerodinamik modelleri kapsayan bir araştırma yapmışlardır. Foley, Leahy, Marvuglia ve McKeogh (2012) rüzgar enerjisi tahmininde uygulanan kavram ve teknikleri ele almışlardır. Chen, Wei, Yang ve Liu (2023) çalışmalarında rüzgar hızı ev yönüne bağlı olarak kurulacak rüzgar türbininin seçimi için ekonomik bir yaklaşım önermişlerdir. Yıldırım, Gazibey ve Güngör (2016) yaptıkları istatistiksel çalışmada Niğde bölgesindeki rüzgar enerjisi potansiyelini, Yanıktepe ve Kara (2021) ise Osmaniye'deki üniversite kampüsünün rüzgar enerjisi potansiyelini 3 farklı istatistiksel dağılım yöntemi ile sunmuşlardır. Ayar, Gülten Yalçın ve Dağ (2023) ise rüzgar enerjisi ve türbünleri hakkında bilgiler vererek Türkiye'de kurulu rüzgar enerjilerini çalışmalarında sunmuşlardır.

Bu çalışmada ise, Eskişehir bölgesinde bulunan rüzgar enerji santrali olan KARTAL RES rüzgar türbininden Ekim 2023 ayı için elde edilen veriler ile hava sıcaklığı, nemlilik, anlık esinti ve rüzgâr hızının üretilen elektrik enerjisi ile aralarındaki ilişkiler pearson-korelasyon analizi ile ortaya konmuştur. Ayrıca üretilen elektrik enerjisine etki eden değişkenlerin belirlenmesi için de doğrusal ve polinom regresyon analizleri yapılmıştır.

Literatüre bakıldığında üretilen elektrik enerjisi ile rüzgar hızı arasında kübik bir ilişki olduğu belirtilmektedir (Karlı ve Geçit 2003). Bu çalışma sonucunda da, gerçek verilere en uygun matematiksel denklemin R^2 (adj)=65,39 ile kübik bir fonksiyon ile ifade edilebileceği görülmüştür.

Makalenin üçüncü bölümünde kullanılan yöntemler, dördüncü bölümünde gerçek verilere dayalı yapılan analizler bulgular olarak verilmiş, beşinci bölümde bulgular tartışılmış ve altıncı bölümde sonuçlar verilmiştir.

3. Yöntem

Rüzgar hızı ve üretilen enerji verileri, rüzgar enerjisi tesislerinin performansını izlemek ve optimize etmek için önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu veriler, tesisin verimliliğini değerlendirmek, bakımları planlamak ve enerji üretim tahminlerini geliştirmek için kullanılmaktadır. Rüzgar hızı, nemlilik, anlık esinti hızı ve hava sıcaklığı gibi parametrelerin tamamı hava koşulları olarak nitelendirilmektedir.

Elde edilen rüzgar hızı ve diğer hava koşulları ile üretilen enerji verileri genellikle bilgisayar tabanlı veri analizi ve yönetim sistemleri kullanılarak işlenmektedir. Bu sistemler, veri setlerini analiz ederek tesisin performansını değerlendirmek, sorunları tespit

etmek ve gelecekteki enerji üretimini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada rüzgar hızı ve diğer hava koşulları ile üretilen enerji verilerinin istatistiksel analizinde pearson-korelasyon analizi, doğrusal ve polinom regresyon analizleri kullanılmıştır.

Pearson-korelasyon katsayısı, iki değişken arasındaki ilişkinin gücünü ve yönünü gösteren istatistiksel bir terimdir. Ancak nedensel bir ilişkiyi belirtmez. Yani, iki değişken arasında korelasyon bulunsa bile, birinin diğerini neden etkilediği konusunda kesin bir bilgi sağlamaz. Korelasyon katsayısı -1 ile 1 arasında bir değer alır. +1 iki değişken arasında pozitif kuvvetli bir ilişkinin olduğunu, -1 değeri iki değişken arasında negatif kuvvetli bir ilişki olduğunu gösterirken 0 değeri ise herhangi bir doğrusal ilişkinin olmadığını temsil etmektedir.

Doğrusal regresyon, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılan bir istatistiksel yöntemdir. İki değişken arasındaki ilişkiyi anlamak ve bir değişkenin diğerini nasıl etkilediğini öngörmek için kullanılır. Doğrusal regresyon, genellikle bir bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler tarafından nasıl açıklandığını belirlemek için kullanılmaktadır.

Doğrusal regresyon modeli genellikle aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 X_i \quad (1)$$

Burada:

\hat{Y}_i , i. bağımlı değişkenin tahmin değeri,

X_i , i. bağımsız değişken,

b_1 , eğim (regresyon katsayısı),

b_0 , y-kesişim noktasını

temsil etmektedir (Hines ve Montgomery, 1990).

Doğrusal regresyon, veri setindeki ilişkileri anlamak ve gelecekteki değerleri tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem, bir değişkenin diğerini hangi yönde etkilediğini ve bu etkinin ne kadar güçlü olduğunu anlamamıza yardımcı olmaktadır.

Polinom regresyon ise doğrusal regresyonun genişletilmiş bir formudur ve veri setlerindeki karmaşık ilişkileri modelleme yeteneği sunmaktadır. Doğrusal regresyon, bir bağımlı değişkenin bağımsız değişkenlerle doğrusal bir ilişkisini tahmin etmeye odaklanırken, polinom regresyon, bu ilişkiyi doğrusal olmayan bir şekilde modellemek için kullanılmaktadır. Polinom regresyonun temel özellikleri esneklik, derece kontrolü ve eğri uyumudur. Doğrusal regresyonun yetersiz olduğu durumlarda, polinom regresyon, fiziksel olayların daha karmaşık modellerini oluşturmak için kullanılmaktadır. Polinom regresyon, veri setlerindeki karmaşıklığı ve doğrusallık dışındaki ilişkileri modelleme yeteneğiyle, analizlerin daha derinlemesine ve etkili olmasını sağlar. Ancak, modelin

aşırı uyum riskini göz önünde bulundurarak, uygun derece ve dikkatli değerlendirme yöntemleri kullanılmalıdır. Bu, polinom regresyonunun doğru ve güvenilir tahminler yapma kabiliyetini artırmaktadır. Polinom regresyon analizlerinden biri de kareli terimin de modelde olduğu matematiksel modeldir ve yapısı aşağıdaki gibidir:

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1X_i + b_2X_i^2 \quad (2)$$

Burada formül (1)'deki açıklamalara ilave olarak;

b_2 : kareli terimin katsayısı'nı temsil etmektedir (Hines ve Montgomery, 1990).

Tablo 1. Santralin Rüzgar Hızı Ortalaması ve Üretilen Enerji Ortalaması Verileri

Tarih	Rüzgar Hız Ortalaması (Km/h)	Üretilen Enerji Ortalaması (MW/h)
2023-10-02	28,0	36,007917
2023-10-03	18,1	17,643750
2023-10-04	12,4	1,567500
2023-10-05	11,1	2,877500
2023-10-06	14,8	5,599583
2023-10-07	14,5	3,123333
2023-10-08	13,0	8,378333
2023-10-09	18,6	16,824583
2023-10-10	23,8	15,647917
2023-10-11	17,3	11,054167
2023-10-12	11,4	9,711667
2023-10-13	14,7	3,079167
2023-10-14	16,3	2,990000
2023-10-15	14,3	6,620833
2023-10-16	22,0	14,907500
2023-10-17	15,8	1,401667
2023-10-18	17,8	7,532917
2023-10-19	14,5	11,403750
2023-10-20	12,9	14,967500
2023-10-21	7,0	2,594167
2023-10-22	7,8	1,054167
2023-10-23	6,5	0,139167
2023-10-24	12,7	1,755000
2023-10-25	20,5	14,881667
2023-10-26	20,8	15,704583
2023-10-27	20,0	28,557917
2023-10-28	19,4	16,117083
2023-10-29	11,6	2,811250
2023-10-30	18,3	5,155417

Yapılan bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

4. Bulgular

Çalışmada pilot bölge olarak Eskişehir, pilot rüzgar enerji santrali olarak KARTAL RES seçilmiştir. Kurulu gücü 39 MWe olan Kartal Rüzgar Enerji Santrali Eskişehir'in Tepebaşı ilçesinde bulunmaktadır ve şehrin 4., Türkiye'nin ise 349. büyük enerji santralidir (www.enerjiatlası.com).

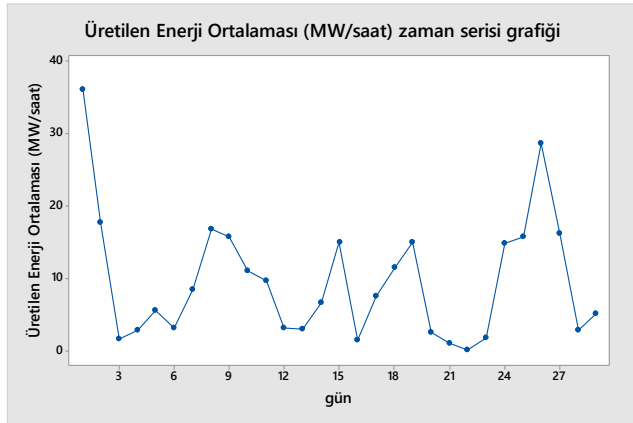
Tablo 2. Seçilen Santralin Sıcaklık, Nem ve Anlık Esinti Verileri

Tarih	Sıcaklık (°C)	Nem (g/m ³)	Anlık Esinti (Km/h)
2023-10-02	15,1	77,2	37,1
2023-10-03	14,7	66,0	25,9
2023-10-04	12,1	73,5	16,6
2023-10-05	12,5	68,7	22,3
2023-10-06	13,3	68,0	27,4
2023-10-07	14,4	69,2	18,7
2023-10-08	13,7	67,0	28,1
2023-10-09	13	75,6	28,4
2023-10-10	12,3	70,6	37,4
2023-10-11	13,1	65,0	23,4
2023-10-12	10,2	72,1	25,2
2023-10-13	11,6	63,2	18,0
2023-10-14	12,3	65,8	21,2
2023-10-15	13	60,9	25,6
2023-10-16	11,7	71,6	40,3
2023-10-17	12,9	69,6	19,1
2023-10-18	11,1	83,8	31,0
2023-10-19	11,3	75,0	24,1
2023-10-20	11,3	71,6	18,4
2023-10-21	13,7	64,3	11,2
2023-10-22	14	61,3	17,3
2023-10-23	14,1	59,7	15,7
2023-10-24	15,6	54,6	28,4
2023-10-25	13,6	58,5	35,3
2023-10-26	15,3	51,1	34,2
2023-10-27	16,2	58,2	41,0
2023-10-28	15,6	63,6	37,1
2023-10-29	14,6	71,4	18,7
2023-10-30	15	75,7	29,5

Tablo 2'de ele alınan santralin rüzgar hızı ortalamaları ve üretilen enerji ortalaması verileri sunulmuştur. Hesaplanan günlük rüzgar hız ortalamaları ve ortalama enerji üretim verileri EPİAŞ Şeffaflık Platformu veri havuzundan elde edilmiştir ve 02.10.2023 Saat 00:00

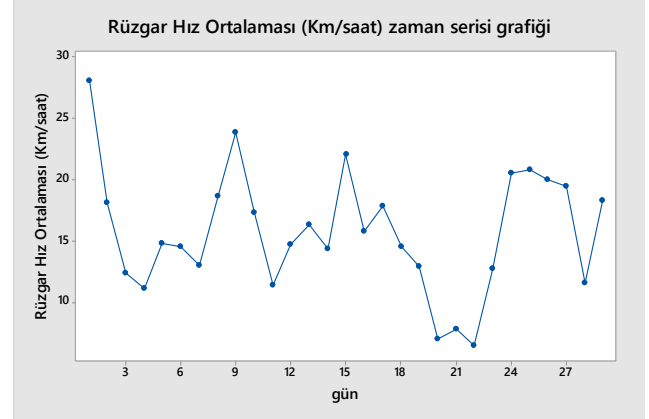
ile 30.10.2023 Saat 23:00 arasındaki 29 günlük periyodu kapsamaktadır (EPIAŞ, 2023).

Tablo 2 ise santralin sıcaklık, nem ve anlık esinti verilerini göstermektedir. Hava verileri "Weather Query Builder" sitesi üzerinden Eskişehir Tepebaşı konumu baz alınarak elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında incelenen hava koşulları olarak anlık esinti hızı, nem oranı ve sıcaklık verileri istenilen tarih aralığında saatlik ve günlük ortalama olarak elde edilmiştir. Rüzgar hızı ve anlık rüzgar esintisi hızı arasında temel fark ise, sürekli rüzgar, iki dakika boyunca ortalama rüzgar hızı olarak tanımlanırken anlık esinti hızı ise rüzgar hızındaki ani patlama olarak tarif edilir ve genellikle 20 saniyeden kısa sürmektedir (Cheng, Lin, Bao ve Xue, 2009).

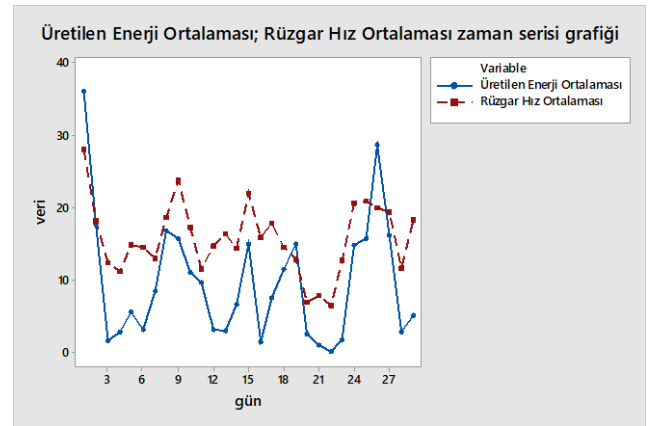


Şekil 1. Üretilen Enerji Ortalaması Zaman Serisi-29 Günlük

Araştırmada istatistiksel veri analizleri ve grafik çizimleri için MINITAB 17 programı kullanılmıştır. Şekil 1 günlük ortalama üretilen enerji, Şekil 2 ise günlük ortalama rüzgar hızının zamana bağlı değişim grafiğini göstermektedir. Her iki eğrinin aynı grafik üzerinde gösterimi Şekil 3'de yer almaktadır. Şekil 3'den görüldüğü üzere, ortalama üretilen enerji ile ortalama rüzgar hızı arasında ilişki olduğu görülmektedir.

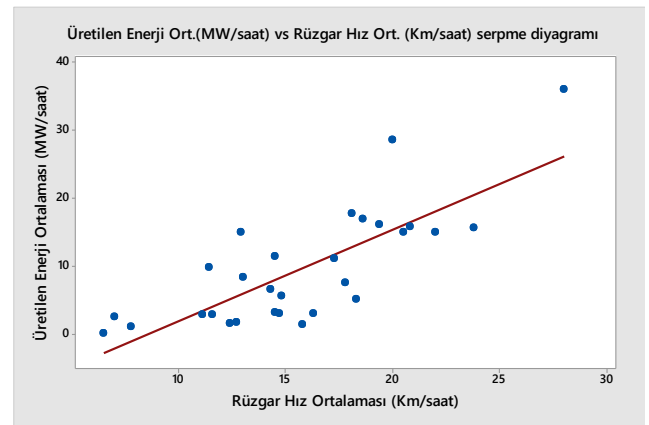


Şekil 2. Rüzgar Hızı Ortalaması Zaman Serisi-29 Günlük

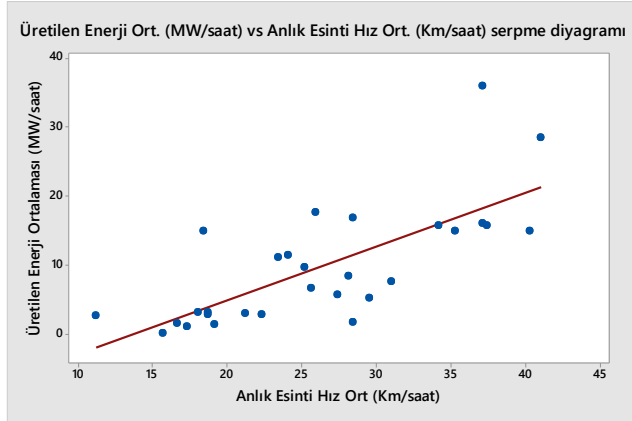


Şekil 3. Üretilen Enerji ve Rüzgar Hızı Ortalaması Zaman Serisi-29 Günlük

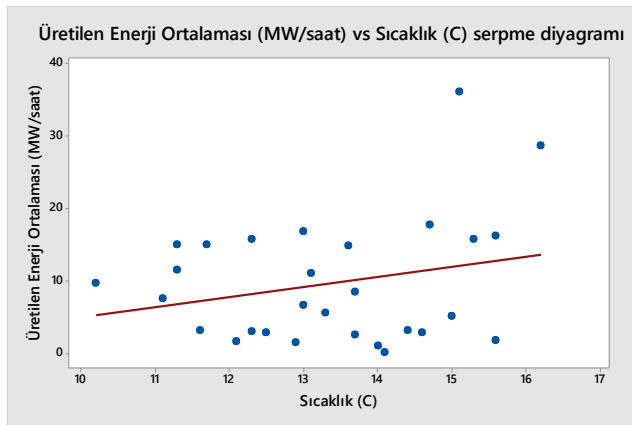
Şekil 4'de üretilen enerji ortalaması ile rüzgar hızı ortalaması Şekil 5'de ise üretilen enerji ortalaması ve anlık esinti hızı ortalaması arasındaki doğrusal ilişkiyi gösteren serpm diyagramları verilmiştir. Bu diyagramlardan görüldüğü gibi rüzgar hızı ortalaması ve anlık esinti hızı ortalaması arttıkça üretilen enerji ortalamasının da arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4. Üretilen Enerji Ortalaması ile Rüzgar Hızı Ortalaması Serpm Diyagramı

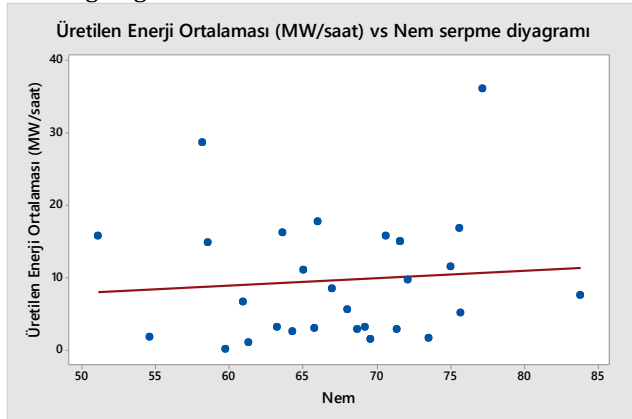


Şekil 5. Üretilen Enerji Ortalaması ile Anlık Esinti Hızı Ortalaması Serpme Diyagramı



Şekil 6. Üretilen Enerji Ortalaması ile Sıcaklık (°C) Serpme Diyagramı

Şekil 6'da üretilen enerji ortalaması ile hava sıcaklığı arasındaki ilişkiyi gösteren serpme diyagramı verilmiştir. Burada doğrusal ilişkiyi ifade eden doğrunun eğiminin az olması aralarındaki ilişkinin de az olduğunu göstermektedir. Üretilen enerji ortalaması ile nem arasındaki ilişkiyi gösteren serpme diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Bu diyagramdaki doğrunun eğiminin çok daha az olması aralarında ilişkinin olmadığını göstermektedir.



Şekil 7. Üretilen Enerji Ortalaması ile Nem (g/m³) Serpme Diyagramı

Üretilen enerji ortalaması ile hava koşulları arasındaki ilişki şekilsel olarak serpme diyagramları ile ifade edildiği gibi bu ilişkiyi sayısal olarak ortaya koymak için pearson-korelasyon analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Pearson korelasyon analizine göre, rüzgar hız ortalaması ile anlık esinti ortalaması arasında % 83 derecesinde pozitif yönde güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir (p-value < 0,05). Aynı şekilde üretilen enerji miktarı ile rüzgar hızı ortalaması ve anlık esinti hız ortalaması arasında güçlü ve pozitif yönde ilişki bulunmaktadır. Korelasyon katsayıları ve p-value değerleri sırasıyla %77,7 ve % 73,5 ve her ikisi için de p-value < 0,05 çıkmıştır. p-value değerlerinin 0,05'den küçük olması aralarındaki ilişkinin %95 güven seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Değişkenler Arası İlişkiyi Gösteren Pearson Korelasyon Analizi

	Sıcaklık	Nem	Anlık Esinti	Rüzgar Hızı
Hızlı Nem	-0,505 0,005			
Anlık Esinti	0,267 0,161	-0,020 0,919		
Rüzgar Hızı	0,176 0,361	0,177 0,359	0,830 0,000	
Üretilen Enerji	0,251 0,188	0,088 0,650	0,735 0,000	0,777 0,000

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Üretilen enerji ortalamasına etki eden hava koşullarının belirlenmesi için doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Burada "nem" ve "sıcaklık" değerleri ortalamaları, "anlık esinti hız ortalaması" ve "rüzgar hız ortalaması" değerleri bağımsız değişken olarak ele alınmış, bu bağımsız değişkenler ile rüzgar türbininden elde edilen "üretilen enerji ortalaması" ise bağımlı değişken olarak belirlenmiştir.

Tablo 4. Doğrusal Regresyon Analizi

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	-25,6	19,5	-1,32	0,201
Sıcaklık	0,650	0,825	0,79	0,438
Nem	0,073	0,181	0,40	0,691
Anlık Esinti	0,292	0,245	1,19	0,245
Rüzgar Hız	0,894	0,408	2,19	0,039

Tablo 5. Doğrusal Regresyon Denklemi

Regression Equation	
Üretilen Enerji Ortalaması (MW/h)	= -25,6
+ 0,650 Sıcaklık (OC)	+ 0,073 Nem
+ 0,292 Anlık Esinti Hız Ort (Km/h)	
+ 0,894 Rüzgar Hız Ortalaması (Km/h)	

Tablo 6. Doğrusal Regresyon Denklemi Varyans Analizi-ANOVA Tablosu

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	1313,09	328,273	10,62	0,000
Sıcaklık	1	19,20	19,199	0,62	0,438
Nem	1	5,02	5,018	0,16	0,691
Anlık Esinti	1	43,85	43,855	1,42	0,245
Rüzgar Hız	1	148,18	148,185	4,79	0,039
Error	24	741,79	30,908		
Total	28	2054,88			

Tablo 7. Modelin Özeti

Model Summary		
S	R-sq	R-sq(adj)
5,55950	63,90%	57,88%

Yapılan doğrusal regresyon analizi katsayılar, katsayıların anlamlılık testi için t-değerleri, p-değeri ve VIF değerleri Tablo 4'de verilmiştir. Burada sıcaklık, nem ve anlık esinti hız ortalaması bağımsız değişkenlerinin p-değerleri sırasıyla 0,438; 0,691; 0,245 bulunmuş ve bu değerler 0,05'den büyük olduğundan üretilen enerji ortalaması üzerine etkisi yoktur. Bu aynı şekilde Tablo 6'da verilen varyans analizi sonuçları için de geçerlidir. Burada da sıcaklık, nem ve anlık esinti hız ortalaması bağımsız değişkenlerinin p-değerleri > 0,05 olduğundan üretilen enerji ortalamasındaki değişkenliği %95 güven seviyesinde istatistiksel olarak açıklamamaktadır. Tablo 5'de tüm bağımsız değişkenlerin olduğu doğrusal regresyon denklemi görülmektedir. Tablo 7'de ise kurulan modelin %57,88 oranında üretilen enerji ortalamasındaki değişkenliği orta derecede açıkladığı görülmüştür. Bu oranın büyük bir kısmı rüzgar hızı ortalaması bağımsız değişkeninden gelmektedir. Ayrıca korelasyon analizinden görüldüğü gibi iki bağımsız değişken olan "anlık esinti hız ortalaması" ve "rüzgar hız ortalaması" arasında ilişki yüksek olduğundan regresyon analizinde ilişkili olan değişkenlerden sadece birinin yer alması uygun olmaktadır.

Bu analiz sonuçlarına göre, nem, sıcaklık ve anlık esinti hız ortalaması bağımsız değişkenleri modelden çıkarılarak sadece "rüzgar hız ortalaması" bağımsız değişkeni ile "üretilen enerji ortalaması" bağımlı değişkeni arasındaki ilişki doğrusal regresyon analizi ile araştırılmış ve Tablo 8-11'de verilmiştir.

Bu analiz sonuçlarından görüldüğü gibi "rüzgar hız ortalaması"nın p-değeri < 0,05 olduğundan üretilen

enerji ortalamasının rüzgar hız ortalamasına bağlı olduğu istatistiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 8. Doğrusal Regresyon Analizi (Rüzgar Hız Ortalaması Bağımsız Değişkeni için)

Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	-11,47	3,45	-3,33	0,003		
Rüzgar Hızı	1,344	0,210	6,41	0,000	1,00	

Tablo 8'de modelin katsayıları, katsayının anlamlılığını gösteren t-değeri ve p-değeri verilmiştir. Tablo 9'da ise doğrusal regresyon modeli verilmiştir. Bu sonuçlara göre, sadece regresyon modelinde bağımsız değişken olarak "rüzgar hız ortalaması" ve bağımlı değişken olarak "üretilen enerji ortalaması" bulunduğu Tablo 10'da verilen ANOVA tablosuna bakıldığında "rüzgar hız ortalaması" p-değeri < 0,05 olduğu için bağımlı değişken olan "üretilen enerji ortalaması" arasında ilişki vardır. Ayrıca Tablo 11'de verilen R² (adj) değeri %58,91 olduğundan bu ilişkinin "orta-iyi" derecede olduğu söylenebilir.

Tablo 9. Doğrusal Regresyon Denklemi (Rüzgar Hız Ortalaması Bağımsız Değişkeni için)

Regression Equation	
Üretilen Enerji Ortalaması (MW/h)	= -11,47
+ 1,344 Rüzgar Hız Ortalaması (Km/h)	

Tablo 10. Doğrusal Regresyon Denklemi Varyans Analizi-ANOVA Tablosu (Rüzgar Hız Ortalaması Bağımsız Değişkeni için)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	1240,75	1240,75	41,15	0,000
Rüzgar Hızı	1	1240,75	1240,75	41,15	0,000
Error	27	814,14	30,15		
Lack-of-Fit	26	779,85	29,99	0,87	0,705
Pure Error	1	34,28	34,28		
Total	28	2054,88			

Tablo 11. Modelin Özeti (Rüzgar Hız Ortalaması Bağımsız Değişkeni için)

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5,49120	60,38%	58,91%	52,30%

Kurulan bu modelin geçerliliğini göstermek için hatalar üzerindeki üç varsayımı sınamak gereklidir.

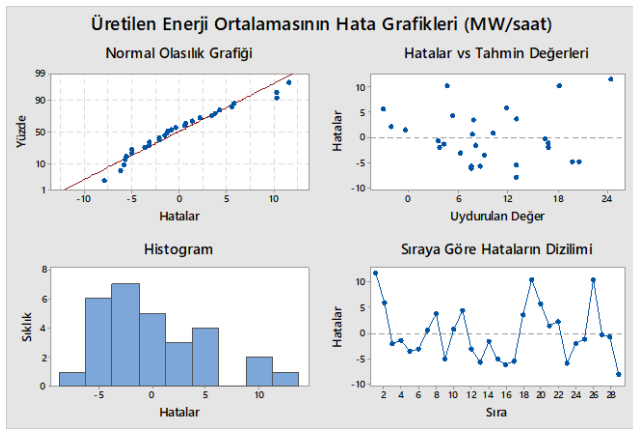
i) Hatalar (residual) Normal dağılmaktadır.

ii) Hatalar sabit varyanslıdır.

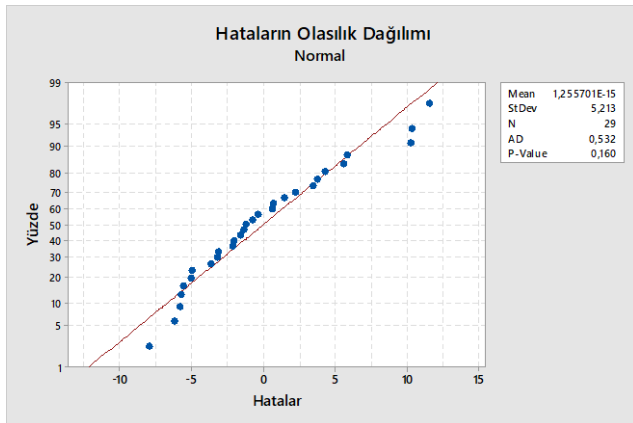
iii) Hatalar birbirinden bağımsızdır.

Üretilen Enerji ortalamasının rüzgar hızına bağlı olarak kurulan regresyon denkleminin hata grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Verilen hata grafikleri incelendiğinde hataların Normal dağıldığı, hataların sabit varyanslı olduğu ve hataların birbirinden bağımsız olduğu görülmektedir. Bu yüzden elde edilen regresyon denklemi rüzgar hızına bağlı olarak üretilen enerjiyi tahmin etmek için kullanılabilir.

Ayrıca hataların Normal dağılıma uyduğu normallik testi (Anderson Darling testi) yapılarak da belirlenmiş ve Şekil 9'da verilmiştir. Burada p-değeri=0,16 > 0,05 olduğundan "Hatalar Normal dağılıma uymaz" Ho hipotezi reddederek, hataların Normal dağıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 8. Hata Grafikleri



Şekil 9. Hataların Normal Dağılım Testi

Buraya kadar bağımlı değişkenler ile "üretilen enerji ortalaması" arasında doğrusal ilişki araştırılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki kısmında ise karesel ilişki analiz edilmiştir. Kurulan bu modelde, rüzgar hızı bağımsız değişkeninin karesi ile üretilen enerji ortalaması bağımlı değişkeni arasındaki ilişkiyi modelleyen regresyon denklemini oluşturulmuş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Polinom model analiz sonuçlarına göre, bağımsız değişken rüzgar hız ortalamasının kareli terimi ile oluşturulan modelin $R^2(\text{adj})$ katsayısının %64,65'e çıktığı görülmüştür. Bu sonuç modelde yer alan rüzgar hız ortalamasının kareli teriminin R^2 değerini arttırdığı dolayısıyla kareli modelin gerçek değerleri daha iyi tahmin ettiği söylenebilir. Karesel modelin regresyon katsayıları ve $R^2(\text{adj})$ değeri Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Polinom Regresyon Analizi-Kareli Model

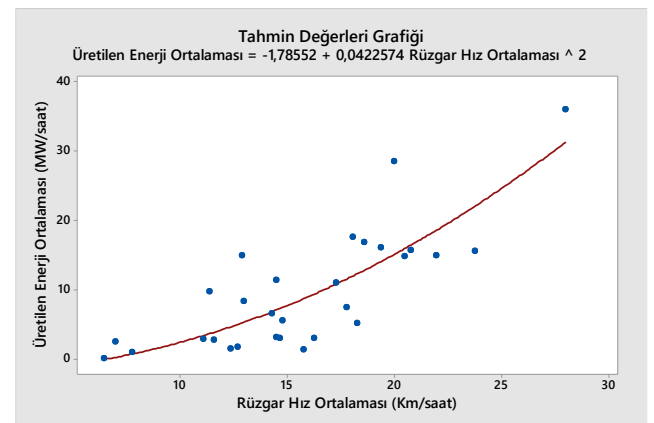
Polynomial Regression Analysis: Üretilen Enerji Ortalaması versus Rüzgar Hız Ortalaması	
The regression equation is	
Üretilen Enerji Ortalaması = -1,786 + 0,042 Rüzgar Hız Ortalaması ²	
S = 5,0899	R-Sq = 65,92% R-Sq(adj) = 64,65%

Tablo 13. Polinom Regresyon Analizi-ANOVA Tablosu-Kareli Model

Analysis of Variance				
Source	DF	SS	MS	F
P				
Regression	2	1371,27	685,637	26,08
Error	26	683,61	26,293	
Total	28	2054,88		

Tablo 13'de ise polinom regresyon analizinin varyans analizi gösterilmiştir. Regresyonun p-değeri < 0,05 olduğundan %95 güven seviyesinde kurulan kareli regresyon denklemi anlamlıdır ve rüzgar hızına bağlı olarak üretilen enerjinin tahmini için kullanılabilir.

Ayrıca kareli modelin grafiği de Şekil 10'da verilmiştir. Bu grafikten de görüleceği gibi doğrusal modele nazaran kurulan kareli model gerçek verilere daha iyi uyum göstermiştir.

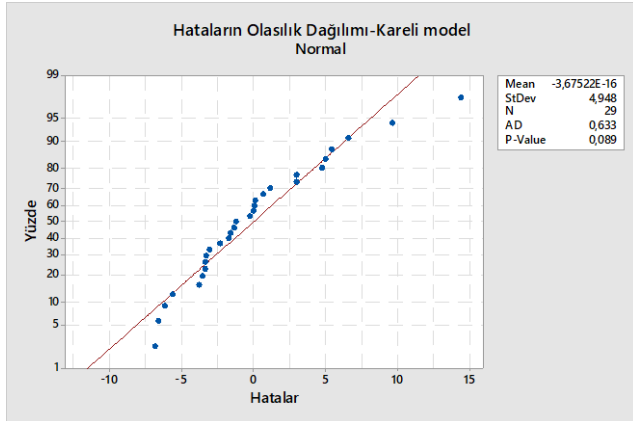


Şekil 10. Kareli Modelin Şekilsel Gösterimi

Şekil 11'de verilen grafikte ise kareli modelin hatalarının Normal dağılıma uyup uymadığı sınanmıştır. Burada p-değeri=0,089 > 0,05 olduğu için

hatalar %95 güven seviyesinde istatistiksel olarak Normal Dağılıma uymaktadır.

Daha sonra, polinom dağılımlardan kübik model ile üretilen enerji ortalaması ve rüzgar hızı arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Kurulan bu modelde, rüzgar hızı bağımsız değişkeninin küpü ile üretilen enerji ortalaması bağımlı değişkeni arasındaki ilişkiyi modelleyen regresyon denklemi oluşturulmuş ve Tablo 14'de verilmiştir. Tablo 15'de ise regresyon modelinin ANOVA tablosu gösterilmiştir.



Şekil 11. Kareli Model için Hataların Normal Dağılım Testi

Tablo 14. Polinom Regresyon Analizi-Kübik Model

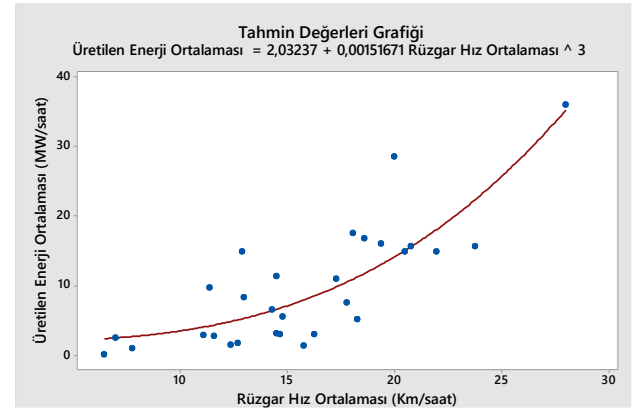
Polynomial Regression Analysis: Üretilen Enerji Ortalaması versus Rüzgar Hız Ortalaması	
The regression equation is	
Üretilen Enerji Ortalaması= 2,03237 + 0,00152 Rüzgar Hız Ortalaması ³	
S = 5,03895	R-Sq = 66,63% R-Sq(adj) = 65,39%

Tablo 15. Polinom Regresyon Analizi-ANOVA Tablosu - Kübik Model

Analysis of Variance				
Source	DF	SS	MS	F
P				
Regression	1	1369,33	1369,33	53,93
Error	27	685,55	25,39	
Total	28	2054,88		

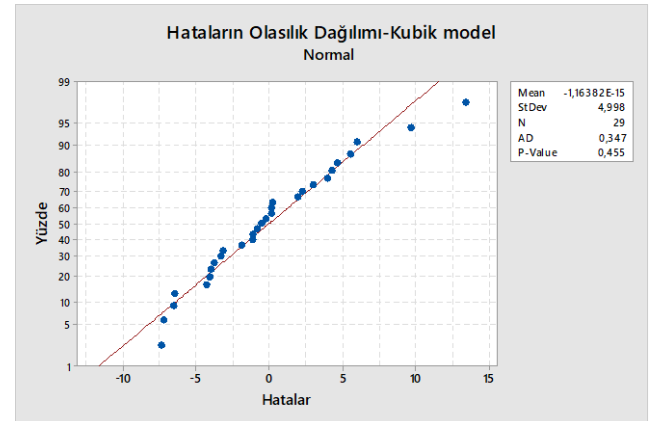
Tablo 14'de, $R^2(\text{adj})$ değeri %65,39 olarak bulunmuştur. Toplam değişkenliğin %65,39'u oluşturulan kübik model ile açıklanabilmektedir. Bu da kabul edilebilir bir değerdir. Tablo 15'deki $F=53,93$ değeri ve $p\text{-değeri}<0,05$ ile modelin %95 güven seviyesinde anlamlı olduğunu göstermektedir. Şekil-12'de oluşturulan kübik modelin grafiği verilmiştir. Bu

grafikten ve $R^2(\text{adj})$ değerlerinden de görüleceği gibi kübik model, kareli modele göre bir miktar daha iyi olacak şekilde gerçek verilere uyum göstermiştir.



Şekil 12. Kübik Modelin Şekilsel Gösterimi

Şekil 13'de verilen grafikte ise kübik modelin hatalarının Normal dağılıma uyup uymadığı sınanmıştır. Burada $p\text{-değeri}=0,455 > 0,05$ olduğu için hatalar %95 güven seviyesinde istatistiksel olarak Normal Dağılıma uymaktadır.



Şekil13. Kübik Model için Hataların Normal Dağılım Testi

5. Tartışma

Çalışmanın birincil önceliği olan rüzgar hızı ve hava koşullarının rüzgar enerji santralinde üretilen enerji miktarı ortalaması ile arasındaki ilişki hem korelasyon analizi hem de doğrusal ve polinom regresyon analizleri ile araştırılmıştır. Araştırmanın sonuçları istatistiksel olarak yorumlanmıştır. Öncesinde literatür taraması yapılmış, benzer makaleler incelendikten sonra araştırmada kullanılacak istatistiksel yöntemler belirlenmiştir. Seçilen pilot bölge ve santralden veriler elde edilmiştir. Santralden Ekim 2023 ayına ait saatlik ortalama üretim verisi MW/saat cinsinden elde edilmiştir. Bunların günlük ortalama değerleri

hesaplanmıştır. Santrale en yakın ilçeden hava raporu verileri toplanmıştır.

Öncelikle değişkenler arasındaki ilişki şekilsel olarak grafikler ile ve sayısal olarak pearson-korelasyon analizi ile ortaya konmuştur. Bu analizler sonucunda iki bağımsız değişken olan rüzgar hız ortalaması ve anlık esinti hızı arasında yüksek dereceden ilişki belirlenmiştir. Ayrıca bu iki değişkenin üretilen enerji ortalaması ile de yüksek dereceden pozitif yönde ilişkisi bulunduğu belirlenmiştir.

Sonrasında ise, değişkenler arası ilişkiler regresyon analizi ile araştırılmıştır. Kurulan matematiksel modelde bağımsız değişken olarak sıcaklık, nem, anlık esinti hızı ve ortalama rüzgar hızı; bağımlı değişken olarak da üretilen enerji miktarı ortalaması ele alınmıştır. Elde edilen veriler ile oluşturulan doğrusal regresyon analizinde sıcaklık, nem ve anlık esinti hızının üretilen enerji ortalaması üzerine etkisi olmadığı görülmüştür. Yapılan korelasyon analizinde bağımsız değişkenlerden anlık esinti hızı ve ortalama rüzgar hızı arasında kuvvetli ilişki (korelasyon katsayısı 0,777 ve p-değeri < 0,05) olması sebebiyle modelde sadece ortalama rüzgar hızı bağımsız değişkeni kullanılmıştır. Doğrusal modelin R^2 (adj) değeri %58,91 olarak bulunmuştur. İncelenen kareli modelde ise ortalama rüzgar hızının kareli terimi ile üretilen rüzgar enerjisi arasındaki ilişki incelenmiştir. Kareli modelin R^2 (adj) değeri %64,65 olarak bulunmuş ve bir artış olduğu tespit edilmiştir. Oluşturulan kareli modelde üretilen rüzgar enerjisindeki değişkenliğin %64,65'inin ortalama rüzgar hızının karesi tarafından açıklandığı, modelin "yüksek" derecede anlamlı olduğu söylenebilir. Ayrıca rüzgar hızının küplü terimi ile üretilen rüzgar enerjisi arasındaki ilişki de Tablo 14 - 15'de incelenmiştir. Oluşturulan küplü modelde üretilen rüzgar enerjisindeki değişkenliğin %65,39'unun ortalama rüzgar hızının küpü tarafından açıklandığı, modelin kareli modele göre bir miktar daha 'iyi' olduğu söylenebilir. Tablo 14'de verilen matematiksel model ile rüzgar hızına bağlı olarak üretilen enerji ortalamasını tahmin etmenin mümkün olduğu söylenebilir. Bu sonucun literatürde yer alan ve rüzgar enerjisini tahmin etmek için kullanılan matematiksel model ile de uyumlu olduğu görülmektedir. Literatürde verilen matematiksel denklem rüzgar hızının yanında hava yoğunluğunu, türbin kanatlarının süpürdüğü alanı ve türbin verimliliğini de dikkate almaktadır. Verilen teorik denklemde beklenen rüzgar enerjisinin rüzgar hızının küpü ile doğru orantıda olduğu görülmektedir (Karlı ve Geçit 2003).

6. Sonuçlar

Bu çalışma, Eskişehir bölgesinde bulunan Kartal RES (Rüzgar Enerji Santrali) için üretilen enerji miktarının, rüzgar hızı başta olmak üzere çeşitli hava koşulları ile

olan ilişkisini detaylı bir şekilde incelemiştir. Analiz sonuçları, rüzgar hızının üretilen enerji miktarı üzerindeki en önemli faktör olduğunu göstermektedir. Özellikle kübik regresyon modeli kullanılarak yapılan analizler, rüzgar hızının küpünün üretilen enerjiyi tahmin etmede en uygun model olduğunu ortaya koymuş ve bu model, toplam değişkenliğin %65,39'unu açıklayarak literatürde yer alan teorik modellerle uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu güçlü ilişki, rüzgar enerjisi üretiminde doğru lokasyon seçiminin ve rüzgar hızı tahminlerinin ne kadar kritik olduğunu bir kez daha doğrulamaktadır. Diğer yandan, nem ve sıcaklık gibi diğer hava koşulları değişkenlerinin, üretilen enerji üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bu sonuç, kısa vadeli analizlerde bu değişkenlerin etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Ancak, farklı zaman dilimlerinde ve mevsimsel koşullarda yapılacak ileriye dönük çalışmalar, bu değişkenlerin etkilerini daha iyi anlamamıza yardımcı olabilir. Sonuç olarak, bu çalışma, rüzgar enerjisi üretiminde rüzgar hızının belirleyici rolünü vurgulamakta ve bu alanda daha derinlemesine araştırmalar yapılması gerektiğini önermektedir. Elde edilen bulgular, enerji politikalarının ve santral yerleşim stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını destekleyecektir.

Araştırmacıların Katkısı

Çisil TİMURALP, konunun tespiti, literatür araştırması, çalışmanın düzenlenmesi ve yorumlanması; Ege ERGİNEL; literatür araştırması, veri elde edilmesi, istatistiksel analizler ve yorumlanması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Ackermann T., Soder L. (2000). Wind energy technology and current status: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(4). doi: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(00\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(00)00004-6)
- Ayar B., Gülten Yalçın Z., Dağ M., (2023). Harvesting the Wind: A Study on the Feasibility and Advancements of Wind Energy in Turkey. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı* 49, 43-49.
- Chen H., Wei S., Yang W., Liu S., (2023). Input wind speed forecasting for wind turbines based on spatio-temporal correlation, *Renewable Energy*, 216, November 2023, 119075. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119075>

- Cheng, K.W.E., Lin, J.K., Bao Y.J. ve Xue X.D., (2009). Review of the wind energy generating system, 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management Sempozyumunda Sunulmuş Bildiri, Hong Kong, Çin. doi: <https://doi.org/10.1049/cp.2009.1863>
- Dündar, C., Dokuyucu, K., Oğuz, K. ve Bacanlı, H.,(2011) Kısa süreli rüzgar enerjisi tahmini, VI. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumunda Sunulmuş Bildiri, Kayseri, Türkiye.
- EPDK, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, (2024). Elektrik Piyasası Aylık Sektör Raporu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/aylik-sektor-raporu>
Son erişim tarihi: 06/02/2024
- EPIAŞ, Enerji Piyasaları İşletme A.Ş., (2023). <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/uretim/gerceklesen-uretim/gercek-zamanli-uretim.xhtml>
Son erişim tarihi: 06/02/2024
- Foley A.M., Leahy P.G., Marvuglia A., McKeogh E.J. (2012). Current methods and advances in forecasting of wind power generation. *Renewable Energy*, 37(1). doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.033>
- Global Wind Energy Council. (2020). Global Wind Report 2020. <https://gwec.net/gwec-in-2020/>
Son erişim tarihi: 02/07/2024
- Herbert G.M.J., Iniyar S, Sreevalsan E, Rajapandian S., (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6). doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.004>
- Hines W. and Montgomery D.C. (1990). Probability and Statistics in Engineering and Management Science, Wiley & Sons Inc, ABD. <https://www.enerjiatlasi.com/ruzgar/kartalar.html>
Son erişim tarihi: 06/02/2024
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Renewable Capacity Statistics 2020. <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>
Son erişim tarihi: 02/07/2024
- Karlı V.M., Geçit C., 2003, An investigation on wind power potential of Nurdag'ı-Gaziantep, Turkey, *Renewable Energy* 28 (2003) 823-830. doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00059-9)
- Kusiak A., Zhang Z., Verma A., (2013). Prediction, operations, and condition monitoring in wind energy, *Energy*, 60 1-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.051>
- MINITAB 17 İstatistiksel paket Program
- Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ). (2020). Elektrik Üretim İstatistikleri. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
Son erişim tarihi: 02/07/2024
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). Elektrik Enerjisi <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
Son erişim tarihi: 02/07/2024
- Weather Query Builder, (31 Aralık 2023), <https://www.visualcrossing.com/weather/weather-data-services/University%20of%20Portsmouth/us/2023-12-31/2023-12-31>
- Weisser D., Garcia R. S. (2005). Instantaneous wind energy penetration in isolated electricity grids: concepts and review. *Renewable Energy*, 30(8). doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.10.002>
- Yanıktepe, B. ve Kara, O. (2021). Üç Farklı İstatistiksel Dağılım Yöntemleri Kullanarak Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Tahmin Edilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2), 359-368. doi: <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.982775>
- Yıldırım, U., Gazibey, Y. ve Güngör, A. (2016). Niğde ili rüzgar enerjisi potansiyeli. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 37-47. doi: <https://doi.org/10.28948/ngumuh.239392>