



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Rüzgar ve Güneş Santrallerinde Kısa Dönem Enerji Üretim Tahmini İçin Matematiksel Modellerin Oluşturulması

Ali ÖZTÜRK<sup>a</sup>, Özge ALKAN<sup>a\*</sup>, Salih TOSUN<sup>b</sup>

*a Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE*  
*b Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE*

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: [alkanozge81@gmail.com](mailto:alkanozge81@gmail.com)

### ÖZET

Yapılacak olan çalışmada meteorolojik veriler ile doğru üretim tahmini yapan matematiksel modellerin oluşturulması amaçlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında, üretim tahminlerini doğru olarak yapabilen modeller bulunmamaktadır. Bu çalışma ile üretilecek modeller sayesinde geleceğe yönelik doğru tahminler yapılmış olup, en uygun yöntem kullanılarak üretilen matematiksel modellerin doğruluğu test edilmiştir. Elde edilen tahmin modelleri ile rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinde kısa dönem enerji üretim tahmini yapılmıştır. Geliştirilen matematiksel modellerin doğruluğu çoklu regresyon analizi kullanılarak incelenmiştir. Bu modeller ile üretim planlaması daha kolay ve doğru bir şekilde tahmin edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yenilenebilir enerji, Enerji üretim tahmini, Matematiksel model

## Establishment Of Mathematical Models For Short-Term Energy Production Forecasting In Wind And Solar Power Plants

### ABSTRACT

In the study to be done, it is aimed to establish mathematical models which make accurate production estimation with meteorological data. Renewable energy sources do not have models that can accurately estimate their production. With this model, accurate forecasts for the future are made and models' mathematical models are tested with the most appropriate method. Short-term energy production forecasts were made in wind and solar energy plants with the obtained prediction models. The most appropriate method has been determined by using the multiple regression analysis of the correctness of the developed mathematical models. With this model, production planning has been predicted more easily and accurately.

**Keywords:** Renewable energy, Energy production forecast, Mathematical mode

## I. GİRİŞ

**E**nerji ihtiyacının karşılanması günümüzde ülkelerin en önemli sorunlarından biridir. Enerji ihtiyacı birçok nedenden dolayı artmakta ve üretim-tüketim arasındaki fark da gün geçtikçe açılmaktadır. Bu nedenler nüfus artışı, teknolojik gelişmeler, sanayileşmedir. Enerji sorunu her ülkenin yaşadığı sorun olmaktan çıkmış küresel bir sorun haline almıştır. Halen devam etmekte olan savaşlar ve işgaller de enerji sorununun insanlara yansımalarıdır. Enerji yalnızca insanların temel gereksinimlerini karşılayan bir ihtiyaç olmaktan çıkıp uluslararası politikaları yönlendiren bir güç haline almıştır. Türkiye’de elektrik enerjisi üretimini önemli bir oranda fosil yakıtlara bağlıdır. Başlıca fosil yakıtlar kömür, petrol ve doğalgazdır. Bu yakıtların kullanımını sonucu ülkemizde büyük oranda çevre kirliliğine sebep olduğu gibi, ekonomik açıdan döviz kaybını da etkilemektedir. Fosil kaynaklı enerjiler sonsuz değildir ve bir gün tükenenlerdir aşikârdır. Fosil kaynakların çalışma prensibi üzerine kurulu birçok teknolojik sistemler de çalışamaz hale gelecektir. Bunun sonuçları da dünya ekonomisini büyük oranda etkileyecektir[1].

Alternatif enerji kaynaklarından olan rüzgâr ve güneş enerjisinden sürekli bir enerji elde edilmek istenmektedir. Rüzgâr ve güneş enerjisinden sürekli enerji elde etmek mümkün değildir, iklim koşullarına göre elektrik enerjisi üretimi değişir. Güneş ışınlarının en kuvvetli ve parlak olduğu yaz aylarında rüzgâr hızı düşüktür. Daha az güneş enerjisinin bulunduğu kış aylarında ise rüzgâr hızı yüksek olabilmektedir. Rüzgâr ve güneş enerjisi sistemlerinde verimli enerji üretimi, günün ve yılın değişik zamanlarında farklılık gösterir. Diğer bir ifadeyle rüzgâr hızının yetersiz veya verimsiz olduğu günlerde alternatif olarak güneş enerjisinden istifade edilebilir. Böylece sistemde enerji üretiminin devamlılığı sağlanmış olur[2].

Bu çalışma ile üretilecek modeller sayesinde geleceğe yönelik doğru tahminler yapılmıştır. Yöntemler kullanılarak üretilen matematiksel modellerin doğruluğu test edilmiştir. Matematiksel modeller Düzce bölgesinde belirlenen yenilenebilir enerji santrallerinde uygulanmış ve elde edilen faydalar ortaya konulmuştur. Böylece yenilenebilir enerji santrallerinde üretim planlamasına önemli bir katkı sağlanmıştır. Yapılan çalışma ile enerjide dışa bağımlılık azalacaktır. Matematiksel modellerin, bölgesel şartlara bağlı olarak değişiklikler göstereceği öngörülmüştür. Matematiksel modelin oluşturulmasında çoklu regresyon analizi yöntemi kullanılarak en uygun yöntem seçilmiştir. Bu modellerin kullanıp kullanılmaması durumlarına göre dengesizlik maliyetine olan olumlu katkısı belirlenmiştir. Böylece üretilen matematiksel modellerin sağladığı faydalar ortaya çıkartılmıştır.

## II. MATEMATİKSEL MODELLER

### *A. ÇOKLU REGRESYON ANALİZİ*

Regresyon analizi bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade etmek için kullanılan bir yöntemdir. En küçük kareler yöntemi en fazla tercih edilen regresyon yöntemidir[3]. Bir tane bağımlı değişkene karşılık birden fazla bağımsız değişkenin bulunması halinde denklem elde edilmesi yöntemine Çoklu Regresyon Analizi (ÇRA) denir.

$$\tilde{Y} = a_{00} + \sum_{i=1}^{\lambda} a_{1i} X_i(k) + \sum_{i=1}^{\lambda} a_{2i} X_{2i}^2(k) + \dots + \sum_{i=1}^{\lambda} a_{mi} X_i^m(k), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Denklem 1 ile  $m$ . dereceden çok değişkenli polinomik regresyon analizi ifade edilmektedir [4]. Hesaplanması gereken bilinmeyen katsayı değerler  $a_{ij}$  ile ifade edilmiştir. Gerçek değer olarak kabul edilen ölçülen değerler ile modelin hesapladığı tahmini değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamalarının (Mean Squared Errors (MSE)) minimize edilmesi ile polinom katsayıları hesaplanır. Bu durum denklem 2 ve 3 ile ifade edilmiştir[6].  $m$ . dereceden polinom modeli hatanın karesinin hesaplanması ise Denklem 2 ile gösterilmiştir.

$$E = \sum_{i=1}^N [Y_i - \check{Y}_i]^2 = \sum_{i=1}^N [Y_i - a_{00} - a_{11}X_{1i} - a_{12}X_{1i}^2 - \dots - a_{1m}X_{1i}^m]^2 \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} a_{00} \\ a_{11} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{1m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & \sum_{i=1}^N X_{1i} \Lambda & \sum_{i=1}^N X_{1i}^m \\ \sum_{i=1}^N X_{1i} & \sum_{i=1}^N X_{1i}^2 \Lambda & \sum_{i=1}^N X_{1i}^{m+1} \\ M & M & M \\ \sum_{i=1}^N X_{1i}^m & \sum_{i=1}^N X_{1i}^{m+1} \dots & \sum_{i=1}^N X_{1i}^{2m} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^N Y_i \\ \sum_{k=1}^N Y_i X_{1i} \\ M \\ \sum_{k=1}^N Y_i X_{1i}^m \end{pmatrix} \quad (3)$$

Denklem 2 'de  $\check{Y}_i$  matematiksel modeli tarafından hesaplanan değeri  $Y_i$  ise ölçüm sonucunda bulunan gerçek değeri ifade etmektedir.  $X_i$  ise bağımsız değişken değerlerini ifade eder. ÇRA ile Denklem 3 ve 4 da ifade edilen  $a_{00}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{22}$  katsayıları belirlenir. Bu katsayıların belirlenmesi için Denklem 4 kullanılır. Denklem (4) ve (5) 'de  $Y_i$ , üretilen saatlik enerji miktarını,  $X_1$  saat olarak zaman değerini ve  $X_2$  ise Santigrad derecesi olarak sıcaklık değerini ifade etmektedir. Denklem (5) ile elde edilen katsayılar Denklem (4) de yerine yazıldığında enerji tüketimini zamana ve sıcaklığa bağlı olarak ifade eden matematiksel model elde edilir.

$$f(x) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + \dots + a_n X_n \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} N & \sum X_{1i} & \sum X_{2i} \\ \sum X_{1i} & \sum X_{1i}^2 & \sum X_{1i}X_{2i} \\ \sum X_{2i} & \sum X_{1i}X_{2i} & \sum X_{2i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum X_{1i}Y_i \\ \sum X_{2i}Y_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### *A. MATEMATİKSEL MODELLERİN HESAPLANMASI*

Bu çalışmada, Matlab Programı kullanılarak enerji tahmini yapacak matematiksel modeller oluşturulmuştur. Güneş ve rüzgâr enerjisi için hissedilen sıcaklık, ışıınım değerleri, ortalama rüzgâr hızı modelde değişken olarak ele alınmıştır. Elde edilen modeller sayesinde değişkenler bilgisine göre üretilecek elektrik enerjisi miktarı tahmin edilmektedir. Yaygın olarak model testi için kullanılan, çoklu belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) ve hataların karelerinin ortalamalarının karekökü ( Root Mean Squared Errors)

(RMSE) değeri hesaplanmıştır. Böylece elde edilen matematiksel modellerin güvenilirliği test edilmiştir.

Güneş enerjisine ait matematiksel tahmin modeli:

$$z = a_{00} + a_{10} * x + a_{01} * y + a_{20} * x^2 + a_{11} * x * y + a_{02} * y^2 + a_{30} * x^3 + a_{21} * x^2 * y + a_{12} * x * y^2 + a_{03} * y^3 \quad (6)$$

Denklem (6) 'da, z ilgili sıcaklık ve ışınımında üretilen elektrik enerjisi değerini belirtmekte olup x, hangi ışınım değerinde olduğumuzu, y ise °C olarak sıcaklık değerini ifade etmektedir.

**Tablo 1.** Güneş enerjisine ait Temmuz ayı çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen matematiksel model katsayıları

$a_{00}$	-9.488
$a_{10}$	0.1766
$a_{01}$	1.057
$a_{20}$	0.000126
$a_{11}$	-0.004145
$a_{02}$	-0.03245
$a_{30}$	-2.976e-08
$a_{21}$	-2.966e-06
$a_{12}$	0.0001441
$a_{03}$	0.0001646

$a_{00}$ ,  $a_{10}$ ,  $a_{01}$ ,  $a_{20}$ ,  $a_{11}$ ,  $a_{02}$ ,  $a_{30}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{03}$  değerleri denklemin Temmuz ayı katsayılarını oluşturmakta olup, Tablo 1'de verilmiştir.

Rüzgar enerjisine ait matematiksel tahmin modeli

$$z = a_{00} + a_{10} * x + a_{01} * y + a_{20} * x^2 + a_{11} * x * y + a_{02} * y^2 + a_{30} * x^3 + a_{21} * x^2 * y + a_{12} * x * y^2 + a_{03} * y^3 \quad (7)$$

**Tablo 2.** Rüzgar enerjisine ait Eylül ayı çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen matematiksel model katsayıları

$a_{00}$	-0.01397
$a_{10}$	530.1
$a_{01}$	0.208
$a_{20}$	1465
$a_{11}$	-315.9
$a_{02}$	-0.4279
$a_{30}$	-757.2
$a_{21}$	-209.1
$a_{12}$	56.11
$a_{03}$	0.07069

$a_{00}, a_{10}, a_{01}, a_{20}, a_{11}, a_{02}, a_{30}, a_{21}, a_{12}, a_{03}$  değerleri denklemin Eylül ayı katsayılarını oluşturmakta olup, Tablo 2’de verilmiştir.

Denklem (7) ‘de, z ilgili Cp ve saatlik rüzgar hızına bağlı olarak elektrik enerjisi değerini belirtmekte olup x, Cp değerini y ise hangi rüzgar hızında olduğumuzu ifade etmektedir. Modelin kabul edilebilir bir model olduğunu test etmek için denklem (8) ile ifade edilen çoklu belirlilik katsayısı hesaplanmıştır. Ayrıca model uygunluk testi için kullanılan ve denklem (9) ile ifade edilen hataların karelerinin ortalamasının kara kökünü gösteren RMSE değeri ve denklem (10) ile ortalama mutlak yüzdeler hata değeri hesaplanmıştır.  $R^2$  determinasyon katsayısını, e, hatayı, n değişken sayısını, veri sayısını,  $\bar{Y}_i$  matematiksel modeli tarafından hesaplanan değeri ve  $Y_i$  ise ölçüm sonucunda bulunan gerçek değeri ifade etmektedir.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 - \sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|}{n} * 100 \quad (10)$$

$R^2$  değerinin 0-1 arasındaki  $R^2$  değerinin 1’e yakın olması RMSE değerinin de 5’ten küçük olması modelin uygun olduğunu göstermektedir. MAPE (Mean Absolute Percentage Error) değeri %10’un altında olan modelleri “çok iyi”, % 10 ile % 20 arasında olan modelleri “iyi”, % 20 ile % 50 arasında olan modelleri “kabul edilebilir” ve % 50’nin üzerinde olan modelleri ise “yanlış ve hatalı” olarak sınıflandırmıştır [7]. Denklem (6) ve (7) ile elde edilen model için uygunluk testi değerleri hesaplandığında elde edilen değerler Tablo 3’ te verilmiştir. Tablo 3’ te sunulan değerler dikkate alındığında modelin güvenilir bir model olduğu anlaşılmıştır.

**Tablo 3.** Matematiksel model test değerleri

Ay	R <sup>2</sup>	RMSE	MAPE
Temmuz(Güneş)	0.997	3.443	5.43
Eylül(Rüzgar)	0.9995	4.514	0.6

**Tablo 4.** Işınım ve sıcaklık değerlerine göre matematiksel model ile elde edilen temmuz (2016) 1. gününe ait tahmini güç değerleri

Saat	Ölçülen Sıcaklık (°C)	Işınım (W.h/m <sup>2</sup> )	Güç(w)	Tahmini Güç(w)
1	20	0	0	0
2	19,8	0	0	0
3	19,6	15	1,3103	2,2785
4	19,8	76,6	11,0784	11,9328
5	19,7	174,6	28,325	28,2427
6	21,1	525,6	95,1416	93,6841
7	23,1	717,3	131,2258	131,3855
8	27,9	844,8	157,6075	157,4952
9	29,7	905,9	170,1758	170,1876
10	30	958,3	180,3996	179,6211
11	30,5	924,7	174,1695	174,4442
12	30,4	817,6	153,4241	155,2138
13	30,4	709,1	132,3685	134,9938
14	30,2	53,8	7,5058	7,3093
15	30,1	364,9	65,4431	67,4150
16	29,3	176,8	29,5719	30,4445
17	28,5	35,3	4,4205	4,3353
18	26,4	0	0	0

**Tablo 5.** Cp ve Ortalama rüzgar hızı Değerlerine Göre Matematiksel Model İle Elde Edilen Eylül Ayı (2016) 1. Gününe ait Tahmini Güç değerleri

Saat	Cp	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Güç(w)	Tahmini Güç(w)
1	0,0772	3,7	12,232	12,2411
2	0,1508	5,6	82,8403	82,7532
3	0,1678	7,9	258,7912	258,7308
4	0,1664	6,4	136,4488	136,5617
5	0,1647	6,3	128,8225	128,9260
6	0,1733	7,2	202,3356	202,3123
7	0,1732	7,1	193,9096	193,9125
8	0,1715	6,8	168,6814	168,7612
9	0,1693	6,6	152,2527	152,3633
10	0,1705	6,7	160,4077	160,5058
11	0,1733	7,2	202,3356	202,3123
12	0,1732	7,3	210,7622	210,7119
13	0,1733	7,2	202,3356	202,3123

14	0,1733	6,6	152,2527	155,7703
15	0,1693	8,2	281,1289	291,0025
16	0,163	8,4	295,5306	301,6292
17	0,1594	8,8	323,1644	338,2532
18	0,1516	8,8	323,1644	323,2479
19	0,1516	8,7	316,3919	312,7359
20	0,1613	8,3	288,4994	288,5110
21	0,1728	7,4	219,0359	218,9691
22	0,1664	6,4	136,4488	136,5617
23	0,1487	5,5	77,3883	77,2812
24	0,157	5,9	100,863	100,8658

Tablo 4 ve Tablo 5’te temmuz ve eylül aylarının 1. gününe ait saatlik sıcaklığa, ışınımına, rüzgar hızına ve Cp değerlerine bağlı tahmin edilen enerji üretim miktarları yer almaktadır.

#### IV. SONUÇ

Yapılan çalışmada meteorolojik veriler ile doğru üretim tahmini yapan matematiksel modeller kullanılmıştır. Üretim tahminleri elektrik enerjisi üretim tüketim planlamalarında büyük öneme sahiptir. İhtiyaç duyulan elektrik enerjisinin tahminindeki hatalar dengesizlik maliyetlerinin artmasına sebep olmaktadır. Dengesizlik maliyetlerini düşürmek için daha doğru tahmin yöntemlerine ihtiyaç vardır. Polinomik modellerin katsayıları Tablo 1 ve 2 de sunulmuştur. Geliştirilen modellerin güvenilirliğini gösteren değerler Tablo 3’te verilmiştir. Modelin doğruluğunun test edilmesi için tahmin edilen Temmuz ve Eylül ayı saatlik üretim değerlerini kapsayan 1280 tahmin sonucu üzerinde bir hesaplama yapılmıştır. Hataların karelerinin ortalamasının kare kökünü gösteren RMSE değerleri güneş enerjisi için 3.443, rüzgar enerjisi için 4.514 olarak hesaplanmıştır. Literatüre ait çalışmalar incelendiğinde bu değerlerin 5 den küçük olması tahmin modelin güvenilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca bir başka test yöntemi olarak da aynı model için  $R^2$  determinasyon katsayısı hesaplanmış ve  $R^2$  değerleri güneş için 0.997, rüzgar için 0.9995 olduğu belirlenmiştir. Çıkan sonuçlar tahmin modellerinin %99 güvenilir olduğunu göstermektedir. Elde edilen verilere göre MAPE (Mean Absolute Percentage Error) hesaplaması yapıldığında sonucun %10’un altında çıkması modelin doğruluğunu göstermektedir. Türkiye’de elektrik enerjisi üretimi, önemli bir oranda fosil yakıtlara bağlıdır. Bu durum ülkemizde büyük oranda çevre kirliliğine sebep olduğu gibi, ekonomik açıdan döviz kaybını da etkilemektedir. Yapılan çalışma, yenilenebilir enerji santrallerinde üretim planlanmasına katkı sağlayacağından, enerji tüketiminde yenilenebilir enerji kullanım değerlerini arttıracaktır. Fosil yakıtların tüketim miktarının düşmesi, çevre kirliliğinin ve cari açığın azalmasına olumlu katkı sağlayacaktır. Böylece enerjide dışa bağımlılık azalacaktır. Dinamik modelin kullanılması durumunda dengesizlik maliyetlerini azaltarak minimum seviyelere indirecektir.

## V. KAYNAKLAR

- [1] C. KARACA, “Güneş ve Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi Sistemi Tasarımı,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2012.
- [2] N. UYSAL, “Konya ili için güneş ve rüzgar enerjisinden elektrik üretimi ve kullanımının araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2011.
- [3] S. Örün, C. Karatekin, “ İstanbul ili Avrupa Yakası için uzun dönem elektrik enerjisi yük tahmini,” Eleco 2014 Elektrik–Elektronik–Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 2014, ss. 38-43
- [4] Y. Aslan, S. Yavasca, C. Yasar, ”Long term electric peak load forecasting of kutahya using different approaches,” *International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering*, Issue 7 vol. 3, no. 2, 2011, ss. 87-91
- [5] N. Karaboga, *Sayısal Yöntemler ve Matlab Uygulamaları*, 2. Baskı, İstanbul, Türkiye:Nobel Yayın Dağıtım, 2015.
- [6] H. Var, B.E. Türkay, “Yapay sinir ağları kullanılarak kısa dönem elektrik yükü tahmini short term electric load forecasting using artificial neural networks,” Eleco 2014 Elektrik–Elektronik–Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Türkiye, 2014.