

Mekânsal Nokta Verilerin Mekânsal İstatistiklerle Analizi: Yenilenebilir Enerji Kaynakları Uygulaması

Analysis of Spatial Point Data with Spatial Statistics: Renewable Energy Resources Application

Mehmet Burak BARTAN¹, Günseli AYTAÇ CANKURTARAN¹, Özlem TÜRKŞEN²

¹ Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik ABD, 06100, Ankara, Türkiye

² Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, 06100, Ankara, Türkiye

Öz

Araştırma konusuna yönelik olarak elde edilen verinin konum bilgisi içermesi durumunda veri, mekânsal veri olarak adlandırılır. Nokta ve raster biçiminde tanımlanabilen mekânsal verilerin analizinde mekânsal istatistikler kullanılır. Savunma ve bilişim teknolojileri, sağlık, çevre bilimi, yer bilimi, enerji, şehir ve bölge planlama gibi alanlarda mekânsal verilerle sıklıkla karşılaşılır. Bu çalışmada, Türkiye’de yer alan rüzgâr türbinleri ve güneş panellerine ilişkin nokta verilerin mekânsal istatistiklerle analizi yapılmıştır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından lisans verilen işletmelerden rüzgâr türbinleri için Çanakkale ili verileri ve güneş panellerine ilişkin ise ülkemizde lisans verilen tüm nokta verileri dikkate alınmıştır. Nokta verilere ilişkin öznitelik için kurulu güç değerleri ile ilgilenilmiştir. Mekânsal Betimsel İstatistikler, Mekânsal Örüntü Analizi, Mekânsal Otokorelasyon Analizi ve Mekânsal Enterpolasyon başlıklarında RStudio programı kullanılarak mekânsal istatistikler elde edilmiştir. Bu mekânsal istatistiklere göre, Türkiye’de yer alan rüzgâr enerji santrali (RES) ve güneş enerji santrali (GES) kurulu güç değerlerinin mekânsal dağılımının rastgele olmadığı görülmüştür. RES’ler ve GES’ler için 10-kat çapraz doğrulama ile Kriging Analizi uygulanarak nokta verilerin kurulu güç değerleri için öngörüler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mekânsal Nokta Veri, Mekânsal İstatistiksel Analizler, Yenilenebilir Enerji

Abstract

Data is referred to as spatial data if it contains location information relevant to the research issue. The analysis of spatial data, which can be described in raster and point forms, uses spatial statistics. Spatial data is frequently encountered in areas such as defense and information technologies, health, environmental science, earth science, energy, urban and regional planning. In this study, spatial statistics were used to assess point data pertaining to solar panels and wind turbines in Turkey. All point data licensed in our country for solar panels and data from the province of Çanakkale were considered for wind turbines licensed by the Energy Market Regulatory Authority (EMRA). Installed power values were of interest for the attribute related to point data. Spatial statistics were obtained using the RStudio program under the titles of Spatial Descriptive Statistics, Spatial Pattern Analysis, Spatial Autocorrelation Analysis and Spatial Interpolation. According to these spatial statistics, it was observed that the spatial distribution of the installed power of wind power plant (WPP) and solar power plant (SPP) in Turkey was not random. Installed power predictions of point data were made by applying Kriging Analysis with 10-fold cross validation for the WPPs and the SPPs.

Keywords: Spatial Point Data, Spatial Statistical Analysis, Renewable Energy

I. GİRİŞ

Mekânsal kelimesi, verideki her bir birim, olay veya durumun ilgili harita üzerinde nerede meydana geldiğinin bilinmesini sağlayan coğrafi bir referansa sahip olduğu anlamına gelmektedir [1]. Mekânsal veri, mekânsal nesnelere ilişkin öznitelik değerleriyle birlikte nesnelere konum bilgilerinin de yer aldığı veridir. Öznitelikler farklı biçimlerde ele alınabilir. Bazıları doğası gereği fiziksel veya çevresel iken bazıları ise sosyal veya ekonomik niteliktedir. Mekânsal veriler, özniteliklerin atıfta bulunduğu mekânsal nesne türüne (nokta, çizgi, alan) ve bu

özniteliklerin ölçüm düzeyine göre sınıflandırılır. Z_1, Z_2, \dots, Z_p 'nin p tane rastgele değişkeni ve S 'nin nokta konumunu ifade ettiği varsayılır. Buna göre mekânsal veri genel olarak matris biçiminde Şekil 1'deki gibi temsil edilebilir [2].

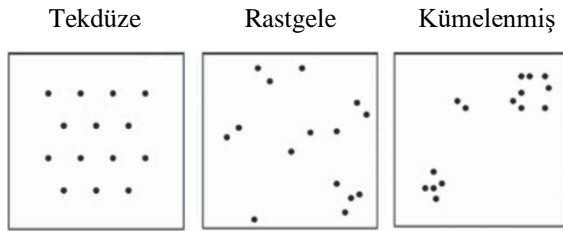
$$\begin{array}{cccccc} & \text{Öznitelikler} & & & \text{Konum} & \\ Z_1 & Z_2 & \dots & Z_p & S & \\ \left[\begin{array}{cccccc} z_1(1) & z_2(1) & \dots & z_p(1) & s(1) \\ z_1(2) & z_2(2) & \dots & z_p(2) & s(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ z_1(n) & z_2(n) & \dots & z_p(n) & s(n) \end{array} \right] & \begin{array}{l} \text{Durum 1} \\ \text{Durum 2} \\ \vdots \\ \text{Durum } n \end{array} \end{array}$$

Şekil 1. Mekânsal veri matrisi

Mekânsal verinin aldığı değerlerin gösterimi, $\{z_1(i), z_2(i), \dots, z_p(i) | s(i)\}_{i=1,2,\dots,n}$ biçiminde yapılabilir. Burada, z_k , değişken Z_k ($k = 1, 2, \dots, p$)'nin bir gerçekleşmesini belirtirken, parantez içindeki sembol i , belirli bir durumu ifade eder. Her bir i durumu için $i = 1, 2, \dots, n$, mekânsal nesnenin konumunu temsil eden bir $s(i)$ konumu eklenir.

Mekânsal veri analizi, üzerinde çalışılan sistem içinde her bir nesne veya veri değeri ile ilişkili olan mekânsal referansları kullanan modeller ve yöntemler topluluğudur. Olaylar arasındaki mekânsal ilişkiler veya mekânsal etkileşimleri tanımlamak için mekânsal veri analizi yöntemlerinde verinin görsel olarak gösterimine ihtiyaç duyulmaktadır.

Mekânsal istatistiğin temel amacı, mekânsal dağılıma ilişkin betimsel istatistiklerin üretilmesi, hipotezlerin geliştirilmesi ve bu hipotezlerin test edilmesidir [3]. Mekânsal istatistikler kullanılarak veri setlerinin dağılım özellikleri belirlenir. Bunlar, tekdüze, rastgele ve kümelenmiş olmak üzere üç kategoride adlandırılır [4]. Mekânsal nokta verilerin örüntüleri Şekil 2'de görülmektedir.

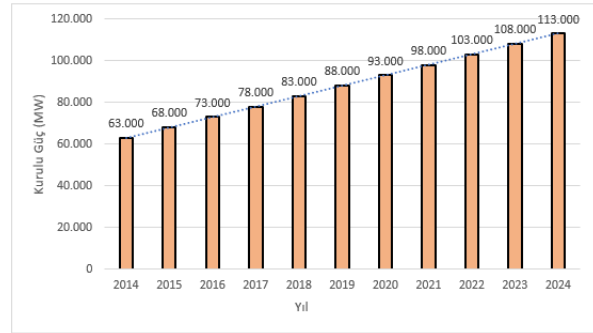


Şekil 2. Mekânsal nokta verilerin örüntü örnekleri [4]

Gelişen teknolojiye paralel olarak ortaya çıkan gereksinimlerin her geçen gün artmasından dolayı çoğalarak artan elektrik enerjisi tüketimi, üreticileri ve kullanıcıları yeni ve çevreye uyumlu enerji kaynakları aramaya zorlamaktadır [5]. Yenilenemeyen ya da yeraltı enerji kaynakları olarak da adlandırılan fosil enerji kaynakları olan kömür, petrol gibi enerji kaynaklarının çevreye olumsuz etkilerinin olması ve tükenebilir olması nedeniyle alternatif enerji

kaynaklarına yönelim hızla artmıştır. Güneş, rüzgâr, biyokütle, hidro, gel-git ve dalga enerjisi şeklinde sıralanabilen yenilenebilir enerji kaynakları, karbondioksit emisyonunu azaltarak doğanın korunmasına yardımcı olduğu gibi enerjide dışa bağımlılığı azaltmakta ve aynı zamanda istihdamın artmasına da katkı sağlamaktadır [6].

Yenilenebilir enerji kaynakları yatırımları, başta arz güvenliği olmak üzere, iklim değişikliği, çevresel faktörler ve sürdürülebilirlik bakımından artış göstermektedir. Ülkemizde son yıllarda artan nüfus ve artan sanayi üretimi ile birlikte enerji ihtiyacı da artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneş enerjisi özellikle elektrik enerjisinin karşılanması konusunda öncü iki enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik enerjisinin kurulu gücü son on yılda neredeyse iki katına çıkmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. 2014-2024 yılları arasında Türkiye elektrik enerjisi kurulu güç değerleri [7]

Tablo 1. Yıllara göre Türkiye'nin elektrik üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları oranı [8]

Yıl	Hidrolik (%)	Doğal Gaz (%)	Kömür (%)	Rüzgâr (%)	Güneş (%)	Jeotermal (%)	Diğer (%)
2014	30.5	28.9	29.3	5.1	2.6	1.3	2.3
2015	31.0	28.5	28.0	5.5	3.0	1.5	2.5
2016	31.5	28.0	27.0	6.0	3.5	1.7	2.3
2017	32.0	27.5	26.0	6.5	4.0	1.8	2.2
2018	32.5	27.0	25.0	7.0	4.5	2.0	2.0
2019	33.0	26.5	24.0	7.5	5.0	2.2	2.0
2020	33.5	26.0	23.0	8.0	5.5	2.4	1.6
2021	34.0	25.5	22.0	8.5	6.0	2.6	1.4
2022	34.5	25.0	21.0	9.0	6.5	2.8	1.2
2023	19.6	21.4	36.3	10.4	5.7	3.4	3.2
2024	29.6	23.2	20.2	11.2	11.7	1.6	2.5

Elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla birçok yatırım yapılmıştır. Yapılan yatırımların çoğunluğunun yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneldiği görülmektedir (Tablo 1). Bu durumun başlıca nedeni; ülkemizdeki yenilenemeyen enerji kaynaklarının hemen hemen tamamının ithal edilmesidir. Bunun sonucunda, elektrik enerjisinde dışa bağımlılık ve maliyetler artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr ve güneş enerjisi, temiz, tükenmez ve maliyet bakımından rekabetçi bir güç kaynağı sağlama potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Özellikle düşük karbon

ayak izi ve diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, emisyonları hızlı bir biçimde dengeleme yeteneği nedeniyle de son yıllarda bu alanda yatırımlar hız kazanmıştır.

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi ile ilgilenilmiştir. Rüzgâr Enerji Santrali (RES) ve Güneş Enerji Santrali (GES) için EPDK'dan elde edilen mekânsal nokta veriler analiz edilmiştir. Mekânsal analizde mekânsal istatistiksel yöntemler uygulanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, mekânsal betimsel istatistikler, mekânsal örüntü analizleri, global mekânsal otokorelasyon ve mekânsal enterpolasyon konuları hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, RES'ler ve GES'ler için iki ayrı uygulama yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Mekânsal istatistik yöntemlerinin hemen hemen tamamının çıkış noktası nokta ile ifade edilebilen gözlemlerin analizidir. Nokta veri için mekânsal istatistik, objelerin ya da olayların mekânsal konum bilgisine sahip nokta ile ifade edilebildiği ortamlarda, bu noktaların geometrik yapılarını ve desenlerini analiz ederek mekânsal düzenler ve ilişkiler hakkında derinlemesine bilgiler sağlamaktadır. Bu yöntemler, karar vericilerin ve araştırmacıların, mekânsal verileri anlamalarını ve etkili çözümler geliştirmelerini sağlamaktadır.

2.1. Mekânsal Betimsel İstatistikler

Mekânsal nokta veride, nokta dağılımının merkezi eğiliminin tespit edilmesi ve dağılımın orta noktasının bulunması son derece önemlidir. Mekânsal nokta verinin merkez noktasının tespiti için kullanılan birden fazla ölçüt bulunmaktadır [3]. Bunlar, ortalama merkez, ağırlıklı ortalama merkez ve ortanca merkez değerleridir.

2.1.1. Ortalama merkez

Mekânsal istatistikte ortalama merkez (mean center), olayların mekânsal dağılımlarının merkez noktasını göstermektedir [9]. Ortalama merkezin hesaplanmasında örneklemdaki elemanların koordinatları kullanılır. Ortalama merkez

$$(\bar{x}_{mc}, \bar{y}_{mc}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (1)$$

biçiminde elde edilir. Burada, $(\bar{x}_{mc}, \bar{y}_{mc})$ ortalama merkezin koordinatları, (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ gözleme ait koordinatları olup n ise örneklem büyüklüğünü göstermektedir.

2.1.2. Ağırlıklı ortalama merkez

Mekânsal istatistikte ağırlıklı ortalama merkez (weighted average center), ortalama merkezin bir değişken ile ilişkilendirilerek ağırlıklandırılmasıyla elde edilir [3]. Ağırlıklı ortalama merkez

$$(\bar{x}_{wmc}, \bar{y}_{wmc}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (2)$$

olarak tanımlanır. Burada, $(\bar{x}_{wmc}, \bar{y}_{wmc})$ ağırlıklı ortalama merkez koordinatları (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ gözleme ait koordinatlar, w_i , $i = 1, 2, \dots, n$ sayılı gözleme ait ağırlığı olup n ise örneklem büyüklüğünü göstermektedir.

2.1.3. Ortanca merkez

Mekânsal istatistikte ortanca merkez, istatistikteki ortancaya karşılık gelmektedir. Ortanca merkez noktası (median center) (x_{mdc}, y_{mdc}) , diğer tüm noktalara olan uzaklıkların toplamının minimum olduğu noktada konumlanmaktadır.

Literatürde ortanca merkezin diğer noktalara olan uzaklıklarının ölçülmesinde farklı metrikler kullanılmıştır. Bu metriklerin en yaygınları Öklid ve Manhattan uzaklıklarıdır. Öklid uzaklığında, ortanca merkez koordinatlara olan x -ekseni ve y -ekseni uzaklıklarının mutlak değeri esas alınmakta ve $\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_j - x_{mdc})^2 + (y_i - y_{mdc})^2}$ ifadesi ile minimize edilmektedir. Manhattan uzaklığında, ortanca merkez koordinatlarına olan doğrusal uzaklıkların toplamı esas alınmakta ve $\sum_{i=1}^n |x_i - x_{mdc}| + |y_i - y_{mdc}|$ ifadesi ile minimize edilmektedir [3].

2.1.4. Standart uzaklık

Standart uzaklık gözlemlerin mekânsal dağılımının ortalama merkezden ne kadar uzaklaştığını gösteren bir ölçüttür. Standart uzaklık

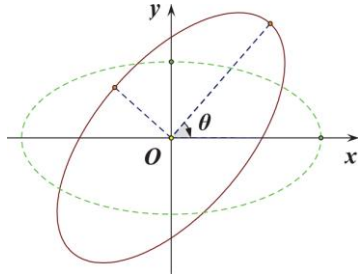
$$s_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{mc})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_{mc})^2}{n}} \quad (3)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, s_D standart uzaklık, $(\bar{x}_{mc}, \bar{y}_{mc})$ ortalama merkez, (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ sayılı gözleme ait koordinatlar olup n ise örneklem büyüklüğüdür [3].

2.1.5. Standart sapma elipsi

Standart sapma elipsi, standart uzaklık ile birlikte mekânsal istatistikte gözlemlerin mekânsal dağılımını betimlemek için kullanılan en yaygın ölçütlerden biridir. Bu elips, gözlemlere ait ortalama merkez çevresinde çizilir [3].

Mekânsal veri için standart sapma elipsinin tespitinde, x -ekseni ile y -ekseninden sapmalar ve y -ekseninden sapma açısı (θ) hesaplanmaktadır. Standart sapma elipsi, Şekil 4'te görülmektedir [10].



Şekil 4. Standart sapma açısı [10]

Şekil 4'te görülen θ açısının pozitif olması elipsin kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda, negatif olması ise elipsin kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda olduğu anlamına gelmektedir [11].

2.2. Mekânsal Örüntü Analizi

Mekânsal istatistikte en önemli konulardan biri, mekânsal dağılımın veya kümeleşmenin ölçülmesidir. Bu yöntemlerin amacı, nokta verilerin deseninin veya dağılımının tekdüze, rastgele veya kümelenmiş olup olmadığını belirlemektir.

Nokta verilerin örüntü analizinde kullanılan En Yakın Komşuluk Analizi ve Kuadrat Analizi yöntemleri, gözlemlenen nokta verinin mekânsal örüntüsünü ya da dağılımını analiz etmek için oldukça güçlü yöntemlerdir.

2.2.1. En Yakın Komşuluk Analizi

En Yakın Komşuluk Analizi, her birimin kendine en yakın birime olan uzaklık üzerine kurgulanmış bir yöntemdir. Öznitelik değerlerinden bağımsızdır ve sadece mekânsal olarak mesafeleri dikkate almaktadır.

En Yakın Komşuluk Analizi'nde gözlemlenen nokta verilerin mekânsal dağılımının rastgele olup olmadığı test edilir. Her gözlem için kendisine en yakın gözlem tespit edilerek tüm gözlemler için hesaplanan en kısa mesafelerin ortalaması alınarak gözlemlenen en yakın noktaya ortalama uzaklığı, r_{obs} [3]

$$r_{obs} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (4)$$

olarak bulunur. Burada, d_i , $i = 1, 2, \dots, n$ noktasının kendisine en yakın uzaklıktaki noktaya olan doğrusal uzaklığı ve n , toplam nokta sayısını göstermektedir.

Beklenen en yakın komşuya uzaklık değeri ise, r_{exp}

$$r_{exp} = \frac{1}{2\sqrt{n/A}} \quad (5)$$

olarak hesaplanır. Burada, A , toplam çalışma alanı büyüklüğüdür.

r_{obs} , r_{exp} değerine bölünerek R -istatistiği

$$R - \text{istatistiği} = \frac{r_{obs}}{r_{exp}} \quad (6)$$

biçiminde elde edilir. Buna göre, $R - \text{istatistiği} > 1$ ise mekânsal dağılım tekdüze, $R - \text{istatistiği} < 1$ ise mekânsal dağılım kümelenme eğiliminde, $R - \text{istatistiği} \approx 1$ ise mekânsal veri, rastgele dağılımlıdır yorumu yapılır.

2.2.2. Kuadrat Analizi

Kuadrat Analizi nokta verinin mekânsal dağılımının incelenmesi amacı ile geliştirilmiş bir yöntemdir. Çalışma alanının eşit büyüklükteki alanlara (kuadrat) bölünmesine ve kuadrat içinde bulunan nokta sayısının dağılımının teorik ya da kurgusal dağılımlar ile karşılaştırılmasına dayanmaktadır [3].

Kuadrat Analizi'nde temel amaç, nokta verilerin mekânsal dağılımının tekdüze, rastgele veya kümelenmiş olup olmadığını belirlemektir. Kuadrat Analizi'nin ilk aşamasında, çalışma alanı eş büyüklükteki alanlara bölünür. Kuadratların kare ya da dikdörtgen olması durumunda tek bir kuadratın alanı

$$K = \frac{2A}{n} \quad (7)$$

formülü ile belirlenir. Burada, K , kuadrat alanı, A , toplam çalışma alanı büyüklüğünü, n , nokta gözlem sayısını ifade etmektedir.

Kuadrat formu kareye yakın ise karenin bir kenarı

$$k = \sqrt{K} = \sqrt{\frac{2A}{n}} \quad (8)$$

olarak bulunur.

Kuadrat Analizi'nin ikinci aşamasında, kuadratların içerisine düşen noktaların sayıları tespit edilerek frekans dağılım tablosu hazırlanır ve dağılım Kolmogorov-Simirnov ($K-S$) testi aracılığıyla hipotetik veya kurgusal dağılımlarla karşılaştırılır. Bunun için $K-S$ istatistiği

$$K - S = \sqrt{\frac{m_o \times m_H}{m_o + m_H}} \times \max |P_o - P_H| \quad (9)$$

biçiminde hesaplanır. Burada, m_o , gözlemlenen veriye ait kuadrat sayısını; m_H , hipotetik gözlemlere ait kuadrat sayısını; P_o , gözlemlenen veri kümülatif frekansını ve P_H , hipotetik veri kümülatif frekansını göstermektedir.

$K-S$ istatistiğinin, istatistiksel anlamlılığı için kurulan hipotez testinde incelenen iki mekânsal dağılımın aynı ya da farklı kitleden seçilip seçilmediği test edilir.

2.3. Global Mekânsal Otokorelasyon

Nokta verinin örüntü analizinde kullanılan yöntemlerde, gözlemlenen nokta verilerin sadece konumları dikkate alınmakta fakat, noktalara ait öznelik değerleri dikkate alınmamaktadır. Global mekânsal otokorelasyon ise, her mekânsal nokta verinin öznelik değerinin olması durumunda, gözlemler arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Moran (1948) tarafından geliştirilen Moran'ın I indeksi, değişken değerlerine sahip nokta verinin dağılımının analizinde kullanılan en yaygın global mekânsal otokorelasyon yöntemidir [12]. Moran'ın I indeksinde gözlemlenen verinin mekânsal dağılımının rastgele olup olmadığı test edilir.

Moran'ın I indeksi, noktaların sahip olduğu değişken değerlerinin benzerlik ve yakınlık değerini

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S_0 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

biçiminde tek bir değerde birleştirir. Burada, n , örneklemdeki nokta sayısını; x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ noktasına ait öznelik değerini; x_j , $j = 1, 2, \dots, n$ noktasına ait öznelik değerini; \bar{x} , özneliğe ait ortalama değeri ve S_0 ise, örneklem için mekânsal ağırlıklar toplamını belirtir ve

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (11)$$

olarak hesaplanır.

Beklenen indeks değeri $E(I) = (-1)/(n-1)$, Moran'ın I indeksi değeri ile karşılaştırılarak yorumlanır. $I > E(I)$ olduğu durumda gözlemlenen mekânsal nokta veride kümelenme eğiliminin bulunduğu, $I < E(I)$ olduğu durumda tekdüze dağılımın bulunduğu ve $I = E(I)$ durumunda ise noktaların rastgele dağıldığı ve özneliğe bağlı bir kümelenme eğiliminin olmadığı değerlendirilir [11].

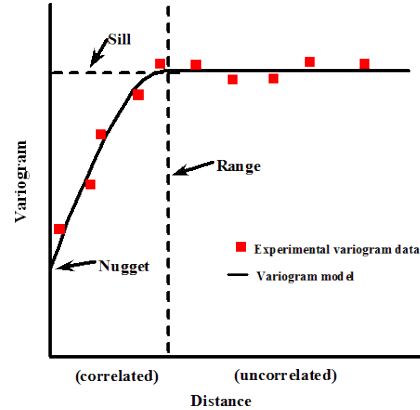
2.4. Mekânsal Enterpolasyon Yöntemleri

Mekânsal enterpolasyon, belirli bir coğrafi alandaki ölçüm noktaları arasındaki değerleri tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir [13]. Mekânsal enterpolasyon amacıyla Kriging analizi uygulanmıştır.

Kriging Analizi, ölçümü yapılmış konumlardan, ölçüm yapılmamış olan öznelik değerini öngörmek için son yıllarda jeostatistik alanında yaygın olarak kullanılan bir enterpolasyon yöntemidir [14], [15]. Kriging ile variogram oluşturularak mekânsal korelasyon modellenmekte ve bu modelden tahminler elde edilmektedir.

Variogram, mekânsal nokta verilerde mekânsal korelasyonu ölçmek için jeostatistikte kullanılan temel

bir araçtır. Veri noktaları arasındaki mesafe arttıkça veri benzerliğinin nasıl azaldığını açıklamaktadır. Variogram modeli, mekânsal enterpolasyon yöntemi olan Kriging'in gerçekleştirilmesi için çok önemlidir. Şekil 5, variogram modeli tahmini yapılmış deneysel bir variogramın grafiğini göstermektedir. Her kırmızı kare, deneysel variogramın bir gecikmesidir. x -ekseni, nokta çiftleri arasındaki mesafeyi ve y -ekseni de variogramın hesaplanan değerini temsil etmektedir. Grafikte görülen büyük bir değer, nokta çiftleri arasındaki korelasyonun daha düşük olduğunu göstermektedir. Şekil 5'teki grafik ayrıca variogram modelinin uyumunu kontrol eden Nugget, Range ve Sill olarak adlandırılan üç önemli parametreyi göstermektedir. Nugget, variogramın y -ekseni ile kesişimidir ve verilerin küçük ölçekli değişkenliğini diğer bir deyişle ölçüm hatalarını temsil etmektedir. Range, variogramın düzleştiği mesafedir. Range değerinin fiziksel anlamı, bu mesafede veya daha fazla uzaklıkta olan nokta çiftlerinin mekânsal olarak ilişkili olmamasıdır. Sill ise, toplam varyansı göstermektedir [16]. Literatürde kullanılan çeşitli variogram modelleri, Küresel Model, Üssel Model, Gauss Model, Doğrusal Model ve Başlangıç Değeri Modeli biçiminde tanımlanabilir. Mekânsal veri analizlerinde en sık kullanılan ve kısa mesafelerde güçlü korelasyonları temsil eden yöntemler ise Küresel ve Üssel modellerdir.



Şekil 5. Variogram grafiği

Kriging Analizi, diğer tahmin yöntemlerine kıyasla daha yansız sonuçlar sağlamakta ve minimum varyans ile tahminin standart sapmasını hesaplama olanağı sunmaktadır. Kriging'i diğer enterpolasyon yöntemlerinden ayıran en önemli özellik, tahmin edilen her nokta veya alan için bir varyans değeri hesaplanabilmesidir. Bu yöntemin bir diğer avantajı ise, kriging varyansı sayesinde tahmin hatasının büyüklüğünü değerlendirme imkânı sunmasıdır [17]. Yaygın olarak kullanılan Kriging yöntemleri arasında Sıradan Kriging (Ordinary Kriging), Basit Kriging (Simple Kriging), Evrensel Kriging (Universal Kriging), Blok Kriging (Block Kriging), Göstergeli Kriging (Indicator Kriging), Ayrık Kriging (Disjunctive Kriging) ve Ko-Kriging (Cokriging) yöntemleri bulunmaktadır [1].

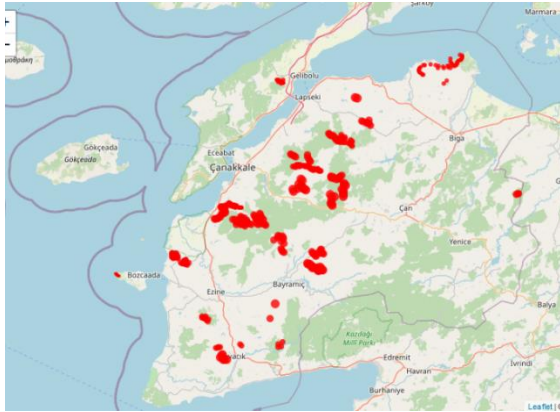
Ordinary Kriging yönteminin ilk adımı, enterpolasyon yapılacak noktalar kümesinden bir variogram oluşturmaktır. İkinci aşamada, deneysel variogramdaki trendi modelleyen basit bir matematiksel fonksiyon olan teorik variogram belirlenir. Ordinary Kriging yönteminde, bilinmeyen değerlerin belirlenmesi, değişkenlerin durağan olduğu ve ortalamasının sabit olduğu varsayımına dayanmaktadır. Variogram fonksiyonundan ağırlıkların belirlenmesi sırasında, tahmin ağırlıkları variogram modellerine göre hesaplanır.

III. UYGULAMA

Bu çalışmada, Türkiye’de yer alan RES’lere ve GES’lere ilişkin mekânsal nokta verilerin mekânsal istatistiklerle analizi yapılmıştır. EPDK tarafından lisans verilen işletmelerden RES’ler için Çanakkale ili verileri ve GES’ler için ise lisans verilen tüm nokta verileri ile öznitelik değerleri olarak kurulu güç değerleri dikkate alınmıştır. Mekânsal istatistikler, RES ve GES nokta verilerine dört temel başlıkta uygulanmıştır: (i) Mekânsal Betimsel İstatistikler (Mekânsal Ortalama, Standart Uzaklık, Standart Sapma Elipsi), (ii) Mekânsal Örüntü Analizi (Kuadrat Analizi, En Yakın Komşuluk Analizi), (iii) Mekânsal Otokorelasyon (Moran’ın I indeksi) ve Mekânsal Enterpolasyon (Kriging). Mekânsal istatistik analizlerinde RStudio (1.1.456 versiyon) programı kullanılmıştır.

3.1. Rüzgâr Enerji Santrali (RES)

EPDK Şeffaflık Platformundan RES verileri temin edilmiştir. 433 adet mekânsal nokta verileri koordinat ve kurulu güç özniteliklerini içermekte olup Çanakkale ili içindeki RES’leri temsil etmektedir. RES’lere ait veriler Şekil 6’da görselleştirilmiştir.

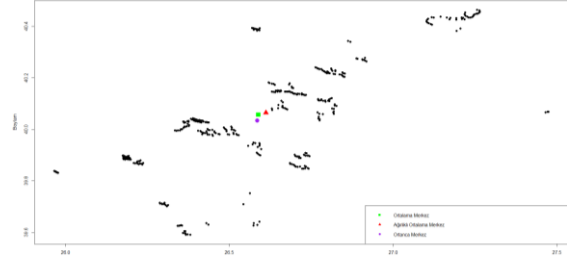


Şekil 6. EPDK Verilerine Göre Çanakkale’deki RES’ler

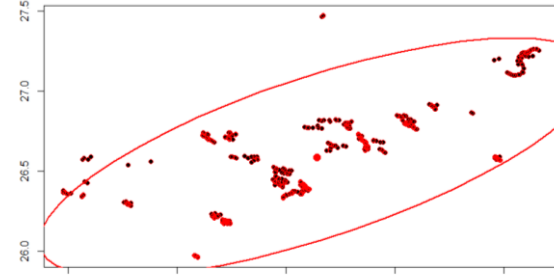
• RES için Mekânsal Betimsel İstatistikler

Şekil 7’de Rüzgâr türbinlerine ait koordinatların ortalama merkezi (40.057, 26.588) yeşil renk ile koordinatlara ait Kurulu Güç değerlerine ilişkin ağırlıklı ortalama merkezi (40.064, 26.611) kırmızı

renk ile ortanca merkez ise (40.033, 26.585) mor renk ile gösterilmiştir. Mekânsal ortalama ve mekânsal ağırlıklı ortalama birbirine yakın bulunmuştur.



Şekil 7. RES’lerin mekânsal ortalama, mekânsal ağırlıklı ortalama ve mekânsal ortanca merkezi

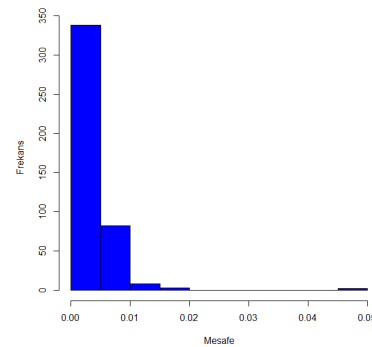


Şekil 8. RES’lere ait standart sapma elipsi

Mekânsal yayılım için Şekil 8’deki standart sapma elipsine göre RES’lerin kuzeydoğu-güneybatı yönünde dağılım gösterdiği söylenir.

• RES için Mekânsal Örüntü Analizi

Şekil 9’da en yakın komşu mesafelerinin dağılımının sağa çarpık olduğu görülmektedir. Bu durum, RES’lerin yoğunluğunun yakınlarında bir başka RES’in bulunduğu anlamına gelmektedir. Çok küçük mesafe (< 0.01) aralıklarında en yüksek frekanslar gözlemlenmiştir. Bu durum, RES’lerin yoğunlukla çok küçük mesafelerde kümelenmiş olduğunu göstermektedir. Orta ve Yüksek Mesafe (> 0.01) aralıklarında frekanslar hızla düşmektedir. Bu durum, daha uzak mesafelerdeki RES’lerin sayısının az olduğunu ve RES’lerin daha geniş alanlara yayılmadığını göstermektedir.



Şekil 9. RES’lerin en yakın komşuluk dağılımı

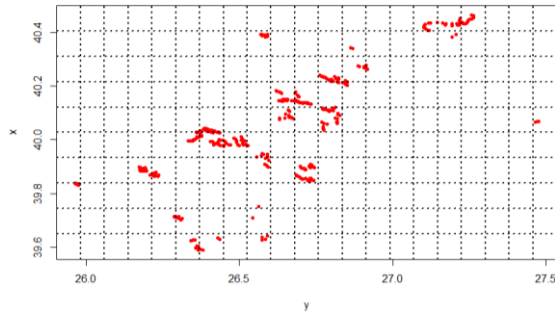
RES'ler için Kuadrat Analizi'nde öncelikle Çanakkale ilinin yüzölçümüne göre kuadrat kenar uzunluğu

$$k = \sqrt{K} = \sqrt{\frac{2(9817)}{433}} = 6.733804 \text{ km}^2$$

olarak elde edilmiştir.

Çanakkale ili için kısa kenar, 67 km ve uzun kenar ise 140 km olarak bulunmuştur. Buna göre, sırasıyla, kuadrat satır ve sütun sayıları $r_k = \frac{67}{6.733804} \cong 10$ ve $c_k = \frac{140}{6.733804} \cong 21$ olarak elde edilmiştir.

Kuadrat Analizi ile RES'lerin sıklığı baz alınarak nokta verilerin mekandaki dağılımı gösterilmektedir. 10×21'lik Kuadrat Analizi yapıldığında, Şekil 10'a göre RES rüzgâr hızlarının kuzey doğuda yoğunlaştığı gözlenmiştir. Şekil 10'da, bazı bölgelerde RES'lerin kurulu olmadığı görülmektedir. Bu durumun olası nedenleri, rüzgâr verimliliği, arazi ve zemin yapısı, çevresel alanlar ve yasal düzenlemelerin uygun olmaması olarak değerlendirilebilir.

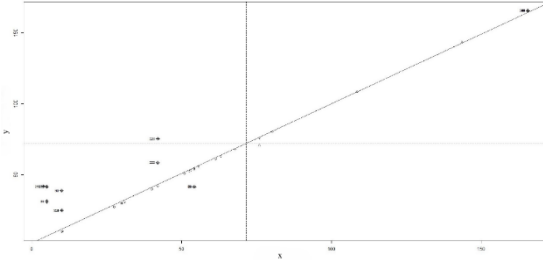


Şekil 10. RES'ler için kuadrat grafiği

• RES için Global Mekânsal Otokorelasyon

Global mekânsal otokorelasyon analizi sonucunda Moran'ın I indeksi değeri, $I = 0.9796$ bulunmuştur. $I > E(I)$ olduğundan Çanakkale'de yer alan RES'lerin kullanım gücünün mekânsal dağılımının rastgele olmadığı söylenebilir. Değer +1'e yakın olduğu için pozitif mekânsal otokorelasyonun olduğu yani benzer değerlerin kümelenmiş olduğu söylenebilir. Buna göre, gözlemlenen mekânsal nokta veride kümelenme eğiliminin olduğu yani benzer değişken değerlerine sahip noktaların birbirlerine mekânsal olarak yakın konumlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 11'deki Moran saçılım grafiğinde, her bir gözlemin standartlaştırılmış değeri (x -ekseni) ve bu değerlerin mekânsal ağırlıklı ortalaması (y -ekseni) görülmektedir. Çizgi, pozitif bir eğim göstermektedir. Gözlemlerin büyük çoğunluğunun çizgiye yakın olması pozitif mekânsal otokorelasyonun olduğunu göstermektedir.

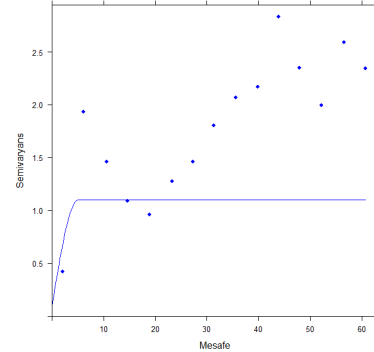


Şekil 11. RES'ler için Moran saçılım grafiği

• RES için Mekânsal Enterpolasyon

Variogram analizinde Nugget = 0.1, Sill = 1.1 ve Range = 1 bulunmuştur. Nugget değerine göre küçük mesafelerde gözlemlenen varyans ve ölçüm hataları oldukça düşüktür. Sill değerine göre RES'lerin toplam varyansı 1.1'dir. Bu değer veri setinin genelindeki değişimi göstermektedir. Mekânsal otokorelasyonun etkili olduğu mesafe yaklaşık olarak 1 km'dir. Bu, RES'lerin yoğunlukla 1 km içinde hem mekânsal olarak hem de kurulu güç ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

Küçük mesafede düşük semivaryans, RES'lerin birbirine yakın olanların benzer kurulu güçlere sahip olduğu ve güçlü bir mekânsal otokorelasyonun olduğu Şekil 12'deki variogram grafiğinde görülmektedir.



Şekil 12. RES variogram grafiği

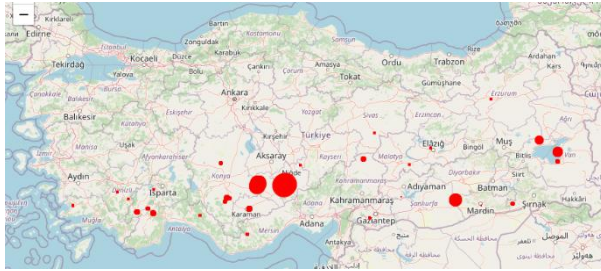
Kriging Analizi ile öngörü yapılabileceğini göstermek için 10 katlı çapraz doğrulama (Cross Validation-CV) uygulanmıştır. 433 adet mekânsal nokta veri incelenmiştir. 433 adet mekânsal nokta veri için kurulu güç değerleri öngörülmüştür. Bilinen gerçek kurulu güç değerleri ile öngörü değerleri karşılaştırılarak hatalar hesaplanmıştır. Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (Root Mean Squared Error - RMSE) hesaplanmıştır. Her yinelemede elde edilen bu değerler Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablo 2'deki RMSE değerleri incelendiğinde test verisinde Kriging modelinin iyi performans gösterdiği söylenebilir. Ortalama RMSE değeri, 0.1863 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. RES'ler için CV iterasyonu *RMSE* değerleri

İterasyon	<i>RMSE</i>
1	0.1016
2	0.1773
3	0.1979
4	0.2028
5	0.3207
6	0.1299
7	0.0875
8	0.1650
9	0.2260
10	0.1412

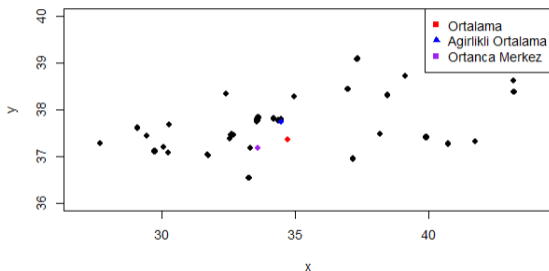
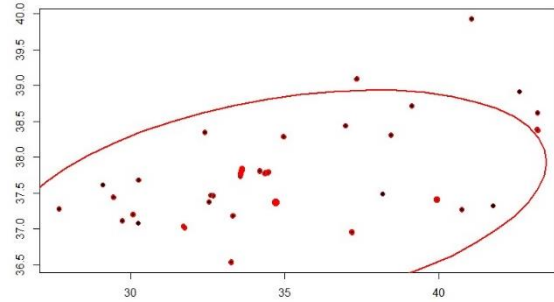
3.2. Güneş Enerji Santrali (GES)

EPDK Şeffaflık Platformundan GES verileri temin edilmiştir. Temin edilen veriler, Türkiye'de EPDK tarafından lisans verilen kurulu GES'leri temsil etmektedir. 1306 adet nokta veri olarak elde edilen verilerin koordinat ve kurulu güç değerleri mevcuttur. Türkiye'deki GES'lere ait veriler kurulu güç değerlerine göre boyutlandırılarak Şekil 13'de görselleştirilmiştir.

**Şekil 13.** Türkiye'deki GES'lere ait koordinatlar

• *GES için Mekânsal Betimsel İstatistikler*

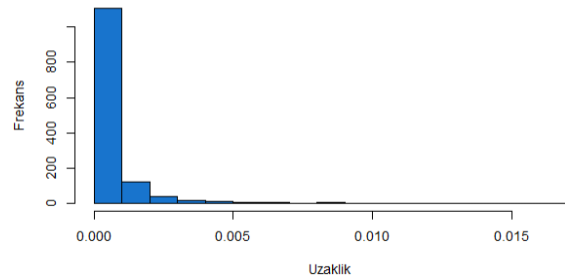
Şekil 14'te Güneş Panellerine ait koordinatların ortalama merkezi (37.3660, 34.7092) (Adana, Pozantı) kırmızı renk ile koordinatlara ait kurulu güç değerlerine ilişkin ağırlıklı ortalama merkezi (37.7318, 34.4665) (Niğde-Bor) mavi renk ile ortanca merkez ise (37.1889, 33.6009) (Karaman-Yeşildere) mor renk ile gösterilmiştir. Ortalama ve ağırlıklı ortalama değerlerinin birbirine yakın olduğu Şekil 14'te görülmektedir.

**Şekil 14.** GES'lerin mekânsal ortalama, mekânsal ağırlıklı ortalama ve mekânsal ortanca merkezi**Şekil 15.** GES'lere ait standart sapma elipsi

Şekil 15'te yer alan standart sapma elipsine göre güneş panelleri kuzeydoğu-güneybatı yönünde dağılım göstermiştir.

• *GES için Mekânsal Örüntü Analizi*

Şekil 16'da, en yakın komşu mesafelerinin dağılımının sağa çarpık olduğu görülmektedir. Bu durum, GES'lerin yoğunluğunun yakınlarında bir başka GES'in bulunduğu anlamına gelmektedir. Çok küçük mesafe (< 0.01) aralıklarında en yüksek frekanslar gözlemlenmiştir. Bu durum, GES'lerin yoğunlukla çok küçük mesafelerde kümelendiğini göstermektedir. Orta ve Yüksek Mesafe (> 0.01) aralıklarında frekanslar hızla düşmektedir. Bu durum, daha uzak mesafelerdeki GES'lerin sayısının az olduğunu ve GES'lerin daha geniş alanlara yayılmadığını göstermektedir.

**Şekil 16.** GES'lerin en yakın komşuluk dağılımı

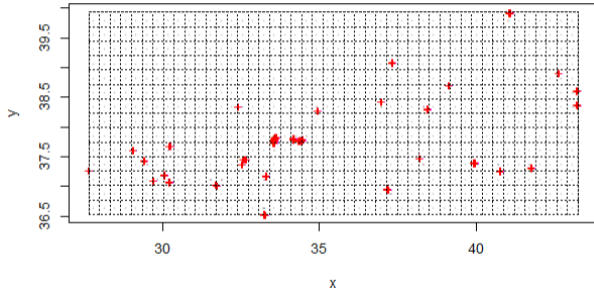
GES'ler için Kuadrat analizinde öncelikle Türkiye'nin yüzölçümüne göre kuadrat kenar uzunluğu (k)

$$k = \sqrt{K} = \sqrt{\frac{2(783562)}{1306}} = 34.64 \text{ km}^2$$

olarak elde edilmiştir. Türkiye için kısa kenar 490 km ve uzun kenar ise 1600 km olarak bulunmuştur. Buna göre, sırasıyla, kuadrat satır ve sütun sayıları $r_k = \frac{490}{34.64} = 14.145 \cong 14$ ve $c_k = \frac{1600}{34.64} = 46.189 \cong 46$ olarak elde edilmiştir.

Kuadrat Analizi ile GES'lerin sıklığı baz alınarak mekandaki dağılımı gösterilmektedir. 14 x 16 'lık Kuadrat analizi yapıldığında Şekil 17'de, GES'lerin,

sıcaklığın fazla olduğu Konya, Niğde ve Antalya illerinde daha çok olmak üzere güneyde yoğunlaştığı görülmektedir.

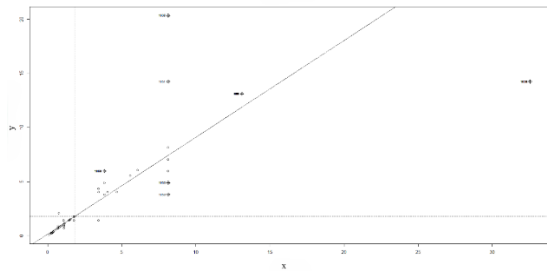


Şekil 17. GES'ler için kuadrat grafiği

• GES için Global Mekânsal Otokorelasyon

Global mekânsal otokorelasyon analizi sonucunda Moran'ın I indeksi değeri, $I = 0.8944$ olarak bulunmuştur. $I > E(I)$ olduğundan Türkiye'de yer alan lisanslı güneş panellerinin kullanım gücünün mekânsal dağılımının rastgele olmadığı söylenebilir. Değer +1'e yakın olduğu için pozitif mekânsal otokorelasyonun olduğu yani benzer değerlerin kümelenmiş olduğu söylenebilir. Buna göre, gözlemlenen mekânsal nokta veride kümelenme eğiliminin olduğu yani benzer değişken değerlerine sahip noktaların birbirlerine mekânsal olarak yakın konumlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 18'de görülen Moran saçılım grafiğinde, her bir gözlemin standartlaştırılmış değeri (x -ekseni) ve bu değerlerin mekânsal ağırlıklı ortalaması (y -ekseni) görülmektedir. Çizgi, pozitif bir eğim göstermektedir. Gözlemlerin büyük çoğunluğunun çizgiye yakın olması pozitif mekânsal otokorelasyonun olduğunu göstermektedir. Ayrıca noktaların orijine yakın olmasının bu noktaların kapasitelerinin benzer ve nispeten düşük kapasitelere sahip olduğu söylenebilir.



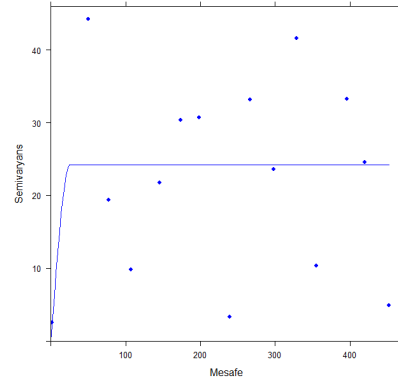
Şekil 18. GES'ler için Moran saçılım grafiği

• GES için Mekânsal Enterpolasyon

Variogram analizinde, Nugget = 0, Sill = 24.2189 ve Range = 25.7299 bulunmuştur. Nugget değerine göre küçük mesafelerde gözlemlenen varyans ve ölçüm hataları yoktur. Sill değerine göre GES'lerin toplam varyansı yaklaşık olarak 24.22'dir. Bu değer veri setinin genelindeki değişimi göstermektedir. Mekânsal

otokorelasyonun etkili olduğu mesafe yaklaşık olarak 25.73 km'dir. Bu, GES'lerin yoğunlukla 25.73 km içinde hem mekânsal olarak hem de kurulu güç ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

Küçük mesafede düşük semivaryans, GES'lerin birbirine yakın olanların benzer kurulu güç değerlerine sahip olduğunu ve güçlü bir mekânsal otokorelasyonun olduğu Şekil 19'da variogram grafiğinde görülmektedir.



Şekil 19. GES variogram grafiği

Kriging Analizi ile öngörü yapılabileceğini göstermek için 10 katlı CV uygulanmıştır. 1306 adet mekânsal nokta veri incelenmiştir ve bu mekânsal nokta veriler için kurulu güç değerleri öngörülmüştür. Bilinen gerçek kurulu güç değerleri ile öngörü değerleri karşılaştırılarak hatalar hesaplanmıştır. Her yinelemede $RMSE$ değerleri hesaplanarak Tablo 3'te gösterilmiştir. Tablo 3'teki $RMSE$ değerleri incelendiğinde, test verisinde Kriging modelinin iyi performans gösterdiği söylenebilir. Ortalama $RMSE$ değeri ise 1.2406 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. GES'ler için CV iterasyonu $RMSE$ değerleri

İterasyon	$RMSE$
1	2.6157
2	0.0819
3	0.1211
4	1.0477
5	0.2599
6	0.0888
7	0.2513
8	1.6281
9	2.1425
10	0.24335

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, ülkemizde yer alan RES'lerin en yoğun olduğu illerden biri olan Çanakkale'deki RES'ler ile ülkemizdeki mevcut GES'lere ilişkin mekânsal nokta verilerin mekânsal istatistiksel yöntemler ile analizi amaçlanmıştır.

RES'lere ilişkin elde edilen bulgular doğrultusunda, Çanakkale ili nokta verisinde mekânsal ortalama ve mekânsal ağırlıklı ortalamasının birbirine yakın olduğu, standart sapma elipsine göre kuzeydoğu-güneybatı yönünde dağılım gösterdiği, En Yakın Komşuluk Analizi'ne göre ise en yakın komşu mesafesinin dağılımının sağa çarpık yani RES'lerin çoğunluğunun yakınlıklarında RES'lerin olduğu görülmüştür. Kuadrat analizine göre, RES rüzgâr hızlarının yoğun olduğu yerin kuzey doğuda olduğu gözlemlenmiştir. Moran'ın *I* indeksine göre gözlemlenen mekânsal nokta veride kümelenme eğiliminin olduğu yani benzer değerlere sahip noktaların birbirlerine mekânsal olarak yakın konumlandığı sonucuna ulaşılmıştır. Kriging Analizi'nde ise 10-kat CV uygulanarak her iterasyonda *RMSE* değerleri elde edilmiştir. Kriging Analizi sonucu Çanakkale bölgesinde 10-kat CV'de yer alan test verileri için RES'lerin gerçek kurulu güçleri ve tahmini kurulu güçleri karşılaştırıldığında yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

GES'lere ilişkin elde edilen bulgular doğrultusunda, lisanslı tüm nokta verilerin mekânsal ortalama ve mekânsal ağırlıklı ortalamasının birbirine yakın olduğu, standart sapma elipsine göre kuzey doğu/güney batı yönünde dağılım gösterdiği, En Yakın Komşuluk Analizi'ne göre ise en yakın komşu mesafesinin dağılımının sağa çarpık yani GES'lerin çoğunluğunun yakınlıklarında GES'lerin olduğu görülmüştür. Kuadrat analizine göre, GES'lerin sıcaklığın fazla olduğu güneyde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Moran'ın *I* indeksine göre gözlemlenen mekânsal nokta veride kümelenme eğiliminin olduğu yani benzer değerlere sahip noktaların birbirlerine mekânsal olarak yakın konumlandığı sonucuna ulaşılmıştır. Kriging Analizi'nde ise 10-kat CV uygulanarak her iterasyonda *RMSE* değerleri elde edilmiştir. Elde edilen *RMSE* değerleri incelendiğinde Kriging modelin bazı test veri kümelerinde daha iyi performans gösterdiği görülürken bazılarında ise performansın beklenildiği kadar iyi olmadığı söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada yer verilen uygulamaların bir kısmı V. Uluslararası Uygulamalı İstatistik Kongresi (UYİK-2024)'nde sözlü olarak sunulmuştur. Değerli katkıları için Editörlere ve Hakemlere çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] Eryılmaz, H. (2010). Mekânsal İstatistikte Nokta Örüntü Teknikleri ve Bir Uygulama, Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi, Türkiye, s. 6-20.

- [2] Fisher, M. M. ve Wang, J. (2011). Spatial Data Analysis Models, Methods and Techniques, Springer, New York, s. 1-10.
- [3] Çubukçu, M. (2020). Planlamada ve Coğrafyada Temel İstatistik ve Mekânsal İstatistik. Nobel Yayınevi, Ankara, s. 1-295.
- [4] Crawley, M. J. (2013). The R Book, Wiley, West Sussex, United Kingdom, s.825-867.
- [5] Erkurtulmuş, S. A. (2022). Açık deniz üzeri yüzer rüzgâr türbini platform konseptleri. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye, s.1-295.
- [6] Akalın, S. (2018). Açık Deniz rüzgâr enerjisi türbinlerinin kurulum yeri seçimi için bir model önerisi. Y.lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, s. 1-295.
- [7] 2014-2024 yılları arasında Türkiye elektrik enerjisi kurulu güç değerleri. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, (Erişim Tarihi: Haziran 2024).
- [8] Yıllara göre Türkiye'nin elektrik üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları oranı. <https://www.epdk.gov.tr/detay/icerik/3-0-167/resmi-istatistikler>, (Erişim Tarihi: Temmuz 2024)
- [9] Türkşen, Ö. (2019). An application of spatial statistics: spatial analysis of simulated fault plane geodetic points, BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, 21(1), 81-93.
- [10] Wang, B. and Shi, W. ve Miao, Z. (2015). Confidence analysis of standard deviational ellipse and its extension into higher dimensional euclidean space. PLoS ONE, 10(3), 1-17.
- [11] Wong, W.S.W. ve Lee, J. (2005). Statistical analysis of geographic information with ArcView GIS and ARCGIS. John Wiley and Sons, s.1-464.
- [12] Moran, P. A. P. (1948). The interpretation of statistical maps. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), 10(2), 243-251.
- [13] Kınaloğlu, İ. (2024). Coğrafi bilgi sistemleri destekli mekânsal istatistiksel yöntemler kullanılarak konya şehrinde trafik kaza kara noktalarının belirlenmesi. Y.lisans Tezi, Uşak Üniversitesi, Türkiye, s. 48-59.
- [14] Caruso, C. ve Quarta, F. (1998) Interpolation methods comparison. Computers and Mathematics with Applications, 35, s.109-126.
- [15] Kalkhan, M. A. (2011). Spatial statistics geospatial information modelling and thematic mapping, CRC Press, USA.
- [16] Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). Kriging Variogram Model, https://vsp.pnnl.gov/help/Vsample/Kriging_Variogram_Model.htm (Erişim Tarihi: Haziran, 2024)
- [17] Armstrong, M. (1998). Basic linear geostatistics, Springer, Berlin.