



HİDROELEKTRİK ENERJİ ÜRETİMİNİN DEMATEL VE REGRESYON YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ezgi GÜLER^{1*}, Süheyla YEREL KANDEMİR², Zerrin ALADAĞ³

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Bilecik

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-8789-8244>

²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Bilecik

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-4056-5383>

³İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, İstanbul

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5986-72>

Anahtar Kelimeler Öz

DEMATEL,
Hidroelektrik enerji
üretimi,
Regresyon analizi,
Tahminleme.

Yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevresel zararları ve yüksek maliyetleri yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesine neden olmaktadır. Türkiye’de hidroelektrik enerji üretimi en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Gelecekte üretilecek enerjinin yaklaşık olarak tahmin edilebilmesi enerji planlaması açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada Türkiye’nin 1985-2022 yılları arasındaki 38 yıllık hidroelektrik enerji üretim değerleri polinom ve üstel regresyon modelleri ile analiz edilmiştir. Tahmin yöntemlerinin uygunluğu Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ve Belirlilik Katsayısı (R^2) performans metrikleri kullanılarak incelenmiştir. MAPE değerleri polinomal ve üstel regresyon yöntemleri için sırasıyla %15,755 ve %18,393 olarak elde edilmiştir. Bu değerlere göre regresyon modelleri “iyi model” statüsündedir. Elde edilen MAPE değerlerine göre polinomal regresyon yöntemi tahminleme açısından daha elverişlidir. Bu bağlamda Türkiye’de 2032 yılına kadar hidroelektrik enerji üretim verileri polinomal regresyon modeli ile tahminlenmiştir. R^2 değeri polinomal regresyon

*Sorumlu yazar; e-posta : ezgi.guler@bilecik.edu.tr

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1533179>

yöntemi için 0,828 olarak hesaplanmıştır. Sadece zaman (yıl) değişkeni ele alınarak yapılan analizlerde elde edilen R^2 değeri incelendiğinde analize dahil edilmesi gereken/önerilen yedi adet kriter Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden biri olan The Decision Making Trial And Evaluation Laboratory (DEMATEL) ile analiz edilmiştir. DEMATEL yöntemi ile belirlenen eşik değere göre hidroelektrik enerji üretimine etki eden kriterler etkileyen ve etkilenen kriterler olarak gruplandırılabilmiştir. Ayrıca her bir kriterin hidroelektrik üretim sürecindeki önem düzeyi belirlenerek kriter ağırlıkları elde edilmiştir. DEMATEL yöntemi sonuçlarına göre akarsu verimi ile baraj ve rezervuar kapasitesi kriterleri regresyon analizine dahil edilmesi öngörülen ve önemli bağımsız değişkenler olarak sunulmuştur. Tahminleme ve karar verme sürecinden elde edilen tüm bulgular karar vericilere öngörü sağlaması açısından önemlidir.

EVALUATION OF HYDROELECTRIC ENERGY PRODUCTION USING DEMATEL AND REGRESSION METHODS

Keywords

DEMATEL,
Hydroelectric energy
production,
Regression analysis,
Forecasting.

Abstract

Environmental damage and high costs of non-renewable energy sources cause renewable energy sources to be preferred. Hydroelectric energy production has become one of the most important renewable energy sources in Türkiye. Being able to approximately estimate the energy that will be produced in the future is extremely important in terms of energy planning. In this study, Türkiye's 38-year hydroelectric energy production values between 1985 and 2022 are analyzed with polynomial and exponential regression models. The suitability of the prediction methods is examined using the Average Absolute Percentage Error (MAPE) and Coefficient of Determination (R^2) performance metrics. MAPE values are obtained as 15.755% and 18.393% for polynomial and exponential regression methods, respectively. According to the MAPE values obtained, the polynomial regression method is more suitable for estimation. In this context, hydroelectric energy production data in Türkiye until 2032 has been estimated via polynomial regression model. The R^2 value is calculated as 0.828 for the polynomial regression method. When the R^2 value obtained in the analyses conducted by considering only the time (year) variable is examined, seven criteria that should be included/recommended in the analysis are analyzed with The Decision-Making Trial And Evaluation Laboratory (DEMATEL), one of the Multi-Criteria Decision Making (MCDM) techniques. According to the threshold value determined by the DEMATEL method, the criteria affecting

hydroelectric energy production can be grouped as affecting and affected criteria. In addition, the importance level of each criterion in the hydroelectric production process is determined and the criterion weights are obtained. According to the DEMATEL method results, stream yield and dam and reservoir capacity criteria are presented as important independent variables that are predicted to be included in the regression analysis. All findings obtained from the estimation and decision-making process are important in terms of providing insight to decision makers.

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 14.08.2024	Submission Date : 14.08.2024
Kabul Tarihi : 16.11.2024	Accepted Date : 16.11.2024

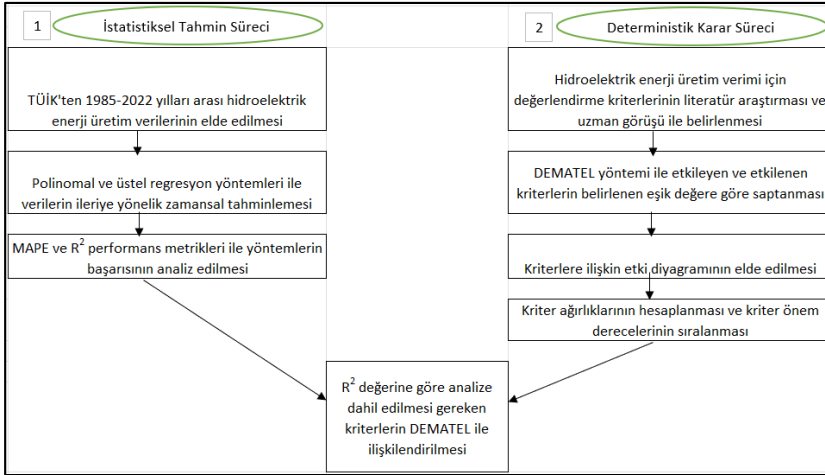
1. Giriş

Dünyada enerji kavramı, özellikle Sanayi Devrimi ile önem kazanmıştır. Enerji kaynakları uygar toplumlara geçişin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi sonucunda enerji güvenliği sorunu ortaya çıkmış ve ülkeler enerji kaynaklarını koruma ve artırma yarışına girmiştir. Bu doğrultuda enerji kaynakları araştırmacıların olduğu kadar hükümetlerin de ilgisini çekmektedir. Birçok çalışma, geleneksel fosil yakıtların (örneğin kömür, doğalgaz, petrol) kullanımının ekonomik büyümeye katkıda bulunduğunu göstermiştir. Ancak yenilenemeyen enerji kaynaklarının aşırı kullanımı çevreye yüksek miktarda karbondioksit (CO₂) salarak sera etkisi yaratmaktadır (Yurtkuran ve Terzi, 2018; Pata, 2018).

Günümüzde yenilenemeyen enerji kaynakları için dışa bağımlılık ve üretim güvenliği en temel küresel sorunlardır (Güler, Yerel Kandemir, Açıklalp ve Ahmadi, 2021). Önemli enerji kaynaklarından biri olan elektrik, herhangi bir toplumun istikrarlı işleyişini kontrol etmektedir. Elektrik üretimi için yenilenebilir ve yenilenemeyen farklı enerji kaynağı türleri bulunmaktadır. Yenilenebilir enerjiye ilişkin küresel durum raporunda, önceki yıllarla karşılaştırıldığında son dönemlerde elektriğin büyük kısmının yenilenebilir enerji kaynaklarından üretildiği belirtilmektedir. 2018 yılında enerji sektöründe yenilenebilir kaynaklar kullanılarak 18 GW'lık elektrik kurulumu artışı sağlanmıştır (Azad, Rahaman, Watada, Vasant ve Vintaned, 2020). Hidroelektrik enerji tüm dünyada yaygın olarak kullanılan temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Günümüzde yenilenebilir enerjilerin ve özellikle küçük hidroelektrik santrallerin geliştirilmesine olan ilgi giderek artmaktadır (Aka, Kentel ve Kucukali, 2017). Hidroelektrik; yenilenebilir bir enerji kaynağına dayanmakta, kirliliği ve sera gazı emisyonlarını azaltmakta ve toplumların yaşam kalitesi üzerinde olumlu etkilere sahip olmaktadır (Martins ve Smitkovác, 2017). Hidroelektrik enerjinin birçok ülke tarafından tercih edilmesinin nedenleri; ekonomik, teknik ve çevresel faydalarıdır (Huang ve Yan, 2009). Hidroelektrik enerji santralleri elektrik üretimi için yenilenmeyen kaynak kullanmamakla

birlikte diğer santraller gibi çevre kirliliğine neden olmamaktadır. Hidrolojik döngü atmosferik suyun yağış olarak yeryüzüne ulaşmasıyla başlamaktadır. Yağmurdan ve eriyen karlardan gelen su, sonunda buharlaşmanın sürekli olduğu göletlere, göllere, denizlere veya okyanuslara ulaşır (Baran, 2020). Her geçen gün azalan su kaynaklarının verimli kullanımı, su kaynaklarının doğru planlanmasına ve işletilmesine bağlıdır (Önöz ve Albostan, 2007). Suyun akış enerjisinden yararlanarak elektrik enerjisi elde etmek amacıyla kurulan elektrik santrallerine hidroelektrik santraller denir. Hidroelektrik santrallerde suyun mevcut enerjisi, su türbinleri kullanılarak mekanik enerjiye, bu mekanik enerji ise su türbinleri ile çalıştırılan jeneratörler kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülür (Makas ve Karaatlı, 2016). Üretilen elektrik enerjisi nakil hatlarına, şalt sahalarına ve trafo merkezlerine, oradan da nihai tüketicilere elektrik olarak dağıtılmaktadır (İnalı, Işık ve Dağtekin, 2014).

Bu çalışmada Türkiye'deki hidroelektrik enerji üretiminin karar verme ve istatistiksel tahminleme bakımından analiz edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmaya dair akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın Akış Diyagramı

Enerji üretimi konusunu kapsayan ve “karar verme” ile “tahminleme” çalışmalarını içeren bazı çalışmalar bir sonraki bölümde özetlenmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde kullanılan yöntemler detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde bulgular sunulmuştur. Beşinci bölümde çalışmaya yönelik tartışma ve sonuçlara yer verilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Bu çalışmada hidroelektrik enerji üretimi kapsamında karar verme ve tahminleme yöntemlerini içeren bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Mevcut alternatifler arasından en iyi olanın seçilmesi karar verme sürecini gerektirmektedir. Karar verme süreci birden fazla kriter, alternatif ve karar verici içerebilir. Karar sürecine etki eden kriterlerin önem düzeylerinin ya da ağırlıklarının belirlenmesi çok kriterli karar verme problemleri için önemlidir. Bu bağlamda literatürde hidroelektrik enerji üretimi konusunu farklı perspektiflerden içeren bazı çalışmalar ele alınmış ve bu çalışmalardan bazıları özetlenmiştir. Özcan, Ünlüsoy ve Eren (2017) çalışmalarında Türkiye’de enerji karması için büyük öneme sahip olan hidroelektrik santrallerdeki bakım stratejisi seçim problemine odaklanmışlardır. Belirlenen dokuz değerlendirme kriteri Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) ile ağırlıklandırılmıştır. Benzer etkilere sahip ve enerji santrali için en önemli olan ekipmanlar, İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği (TOPSIS) ile belirlenmiştir. Bakım stratejisi kombinasyonları, AHP ile hesaplanan kriter ağırlıklarını ve alternatif öncelikleri kullanan ve santralin gerçeklerini yansıtan hedef programlama modeli ile analiz edilmiştir. Da Silva, Bellinello, de Souza, Antomarioni, Bevilacqua, ve Ciarapica (2021) çalışmalarında hidroelektrik güç santrallerinin bakım iş emirlerini önceliklendirmek için çok kriterli karar verme yöntemi seçimi için yeni bir bilgi tabanlı yöntem önermişlerdir. Avşar Özcan, Bulut, Özcan ve Eren (2022) çalışmalarında hidroelektrik enerjiyi de içeren enerji üretim yatırım alternatiflerini değerlendirmek için çok kriterli karar verme yaklaşımlarını kullanmışlardır. On iki adet değerlendirme kriteri ve dokuz adet yatırım alternatifini belirledikten sonra değerlendirme kriterlerini AHP ve Analitik Ağ Prosesi (AAP) yöntemleri ile ağırlıklandırmış; TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR ve COPRAS yöntemleri ile alternatifleri sıralamışlardır. Albayrak ve Turanlı (2022) hidroelektrik enerji santrallerinin kurulumlarını çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS yöntemi ile değerlendirmişlerdir. Karar süreci için 6 kriter ve 17 adet hidroelektrik enerji santrali belirlenmiştir. Suvitha, Narayanamoorthy, Sandra, Pamucar, Simic ve Kang (2024) çalışmalarında hibrit çok kriterli karar verme için Çoklu-Nitelikli Sınır Yaklaşım Alanı Karşılaştırma (MABAC) yönteminin bir uzantısı olarak üçgen bulanık nütrosifik sayılar önermişlerdir. Önerilen yöntem, toplum için en verimli ve sürdürülebilir yenilenebilir enerji kapsamında hidroelektrik enerji kaynak seçimini değerlendirmek için kullanılmıştır. Yedi kriter için öncelik vektörlerini ve ağırlıklı ortalamalarını belirlemek adına ikili karşılaştırma matrisleri kullanılmıştır.

Tahminleme ise geçmiş verileri kullanarak çeşitli yöntemlerle belirli varsayımlar altında geleceğe yönelik verilerin elde edilmesidir. Karar vericiler bütünsel enerji planlama süreçlerinde geçmiş enerji üretim verilerini analiz edip yorumlayarak doğru bir arz tahmini yapmalıdır. Akpınar, Tavşan, Kömürcü, Filiz ve Kaygusuz (2012) çalışmalarında dünyanın, Avrupa Birliği’nin (AB) ve

Türkiye'nin 2030 yılına kadar hidrolik enerji ile birlikte elektrik enerjisi üretimini tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada bağımsız değişken zaman (yıl) olarak belirlenip AB ve Türkiye için toplam elektrik enerjisi üretimi regresyon analizi ile modellenmiştir. Projeksiyonlar için Türkiye'de 1970-2004 yılları arasındaki veriler; dünya ve AB için 1980-2004 yılları arasındaki veriler kullanılmıştır. Elektrik enerjisi üretimleri 2030 yılına kadar tahmin edilmiştir. Sonuçlara göre, dünya ve AB'nin elektrik enerjisi üretiminin projeksiyonu için sırasıyla kübik ($R^2 = 0,997$) ve doğrusal ($R^2 = 0,993$) regresyon modellerinin uygun olduğu, Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi üretiminin projeksiyonu için ise ikinci dereceden ($R^2 = 0,996$) regresyon modelinin uygun olduğu saptanmıştır. Tahmin sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Uzu, Akpınar, Öztürk, Nacar ve Kankal (2014) Türkiye'nin yıllık hidrolik enerji üretimini tahmin etmek için yapay sinir ağı modelini yapay arı kolonisi algoritmasıyla birlikte uygulamışlardır. Brüt elektrik enerjisi talebi, nüfus, ortalama yıllık sıcaklık ve enerji tüketimi bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, model performansı, geri yayılım algoritmasıyla eğitilen klasik yapay sinir ağı modellerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Türkiye için gelecekteki hidroelektrik üretim değerlerini tahmin etmek amacıyla üç farklı senaryo geliştirilmiştir. Şahin (2020) çalışmasında 2019-2030 yılları arasında Türkiye'nin toplam yenilenebilir ve hidrolik enerji kurulu gücü ile elektrik üretiminin tahminini araştırmıştır. Bu amaçla, kesirli doğrusal olmayan gri Bernoulli modeli (FANGBM(1,1)) ile birlikte modelin indirgenmiş formları kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Tahmin prosedürü 2009-2018 yılları arasındaki veri setleri için uygulanmış ve modellerin tahmin performansı ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) değeri ile ölçülmüştür. FANGBM(1,1) tüm durumlar için en yüksek doğrulukta sonuçları vermiştir. Ayrıca model sonuçlarına göre 2030 yılında Türkiye'nin hidroelektrik kurulu gücünün ve elektrik üretiminin sırasıyla 30,7 GW ve 57,3 TWh olacağı öngörülmüştür. Stefanon ve diğerleri (2022), bir hidroelektrik santralinin rezervuar seviyesindeki tahmini artışı değerlendirmek için farklı makine öğrenme modellerini karşılaştırmıştır.

Literatürdeki bazı çalışmalarda deterministik ve istatistiksel yöntemler bir arada kullanılmıştır (Kotan ve Erener, 2023; Maleki, Sorooshian, Goudarzi, Baboli ve Birgani, 2019; Yadav ve Nath, 2020; Dutta ve Jinsart, 2021). Bu çalışmada Türkiye'nin hidroelektrik enerji üretim verileri regresyon analizleri ile değerlendirilmiş, tahmini veriler elde edilmiş ve hidroelektrik enerji üretimine etki eden kriterler DEMATEL yöntemi ile incelenmiştir.

3. Yöntem

Hidroelektrik enerji üretim verileri polinomal ve üstel regresyon yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Bağımsız değişken zaman (yıl) olarak ele alınırken bağımlı değişken hidroelektrik enerji üretim verileridir. Şekil 1'deki akış diyagramında verildiği gibi tahminleme süreci için polinomal ve üstel regresyon yöntemleri

kullanılmıştır. Yöntem etkinlikleri ve model uygunluğu MAPE ve R^2 ile belirlenmiştir. Çalışmanın diğer bölümünde hidroelektrik enerji üretimi için değerlendirme kriterleri çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan DEMATEL yöntemi ile analiz edilmiştir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Bu bölümde tahminleme ve karar verme süreçleri için kullanılan yöntemler detaylandırılmıştır.

3.1. Regresyon Analizi

3.1.1. Polinomal Regresyon Yöntemi

Regresyon analizi, iki veya daha fazla nicel değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan istatistiksel analiz yöntemidir. Polinom regresyon analizi, birden fazla değişkeni içeren doğrusal regresyon modelinin özel bir biçimidir (Meyers, Gamst ve Guarino, 2016). Zaman serileri için x : bağımsız değişken “periyot” iken; y bağımlı değişkendir. Polinom regresyon modeli Eşitlik (1)’de verilmiştir (Özen, Saraç ve Koyuncu, 2021).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \beta_3 x_i^3 + \dots + \beta_k x_i^k + \varepsilon \quad (1)$$

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

Eşitlik (1)’de, ε hata terimidir. $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ regresyon katsayılarıdır. k polinomun derecesidir ve regresyon modelinin derecesini tanımlar. “ i ” bağımsız değişken indisidir, n bağımsız değişken sayısıdır. Regresyon parametreleri en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilir (Ostertagová, 2012). Polinom regresyon analizinde farklı polinom dereceleri vardır. Eğim noktaları yüksek olan veri kümeleri için derece yüksektir. Her polinom regresyon modeli, polinomun derecesine göre farklı isimler alabilir (Varol, Ömürlü ve Türe, 2020). Bu çalışmada Şekil 2’deki grafik gösterimden hareketle regresyon modeli için polinom derecesi (k) “4” olarak kabul edilmiştir.

3.1.2. Üstel Regresyon Yöntemi

Zaman serisi verileri, bir dönemden diğerine, değişkenlerin ardışık olarak gözlemlendiği sayısal değerlerdir. Zaman serisi analizi ile belirli bir dönemdeki mevcut veriler kullanılarak olayın yapısı değerlendirilir ve geleceğe ilişkin tahminler yapılabilir (Bek, 2008).

Üstel regresyon modeli e sayısını temel almaktadır. x bağımsız değişken ve y bağımlı değişken olmak üzere üstel regresyon modeline dair denklem Eşitlik (2)’de verilmiştir (Malaslı, Çelik ve Çelik, 2015).

$$y_i = \beta_0 e^{\beta_1 x_i} \quad (2)$$

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

Eşitlik (2)'de verilen β_0 regresyon katsayısıdır. β_1 üstel büyüme katsayısıdır. Bu katsayı, x 'in bir birim artışıyla y 'nin ne kadar hızlı artacağını veya azalacağını belirler. Eğer $\beta_1 > 0$ ise, y artar (pozitif üstel büyüme); eğer $\beta_1 < 0$ ise, y azalır (negatif üstel büyüme). e : Doğal logaritmanın tabanıdır (yaklaşık 2.71828). " i " bağımsız değişken indisidir, n bağımsız değişken sayısıdır.

Üstel regresyon modeli genellikle nüfus büyümesi, yatırım getirileri, biyolojik büyüme gibi süreçleri modellemek için kullanılmaktadır.

3.1.3. Model Metrikleri

Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE): MAPE, gerçek ve öngörülen değerler arasındaki yüzdelik hatayı tespit eden bir ölçümdür. (Özen vd., 2021). Regresyon analizinde, tahmini değerler gerçek değerleri yansıtmadığında veya tahmini değerler gerçek değerlerle örtüşmediğinde MAPE değeri yüksek hesaplanır (Gönültaş vd., 2020). MAPE değeri %10'dan az olduğunda modelin çok iyi bir model olduğu belirtilmektedir. %10-%20 arası MAPE değeri iyi tahminleme olduğunu göstermektedir. %20-%50 arası elde edilen MAPE değeri makul bir tahminleme sonucunu kapsar. %50 üzerindeki MAPE değerine göre ilgili modelin tahminleme gücü zayıftır. MAPE formülü Eşitlik (3)'te verilmiştir (Moreno, Pol, Abad ve Blasco, 2013).

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{(y_j - \hat{y}_j)}{y_j} \right| \quad (3)$$

Burada,

y_j : gerçek değerler,

\hat{y}_j : tahmini değerler,

N : değer sayısı

Belirlilik Katsayısı (R^2): R^2 , tahmini ve gerçek değerler arasındaki ilişkinin regresyon eğrisine uyumunu analiz eden bir metriktir. Bağımsız değişken (x) ya da değişkenlerin (x_1, x_2, \dots) bağımlı değişken (y) üzerindeki etkisinin ölçüsüdür. R^2 değeri bağımlı değişkendeki değişimin ne kadarının bağımsız değişken tarafından açıklanabildiğini göstermektedir (Yavuz, 2009). 1'e eşit veya çok yakın bir R^2 değeri, modelin mükemmel olduğunu gösterir ve yüksek R^2 değeri, herhangi bir regresyon modeli için istenen özelliklerden biridir (Yerel ve Ersen, 2013). R^2 formülü Eşitlik (4)'te verilmiştir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{\sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y}_j)^2} \quad (4)$$

Burada,

y_j : gerçek değerler,

\hat{y}_j : tahmini değerler,

\bar{y}_j : veri setinin ortalama değeri,

N : değer sayısı.

3.2. DEMATEL Yöntemi

DEMATEL, bir karar probleminde karmaşık kriter ya da faktörler arasında nedensellik ilişkisi kuran çok kriterli karar verme yöntemidir (Wu ve Lee, 2007). Bu yöntemde, yapısal bir karar modelinin analizi için uzman görüşlerinden yararlanılır (Liou, Yen ve Tzeng, 2008). DEMATEL yöntemi ile değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları elde edilebilmekte ve kriterler önem derecelerine göre sıralanabilmektedir. Ayrıca DEMATEL yönteminin spesifik bir özelliği kriterler arasındaki etki derecesini ölçerek kriterleri etkilenen ve etkileyen kriterler olarak gruplayabilmesidir. DEMATEL yönteminin adımları aşağıda verilmiştir (Karaoğlan, 2016).

Adım 1: Değerlendirme kriterleri arasındaki ilişkiler uzman karar verici grup tarafından Tablo 1'deki ikili ölçek kullanılarak belirlenir. Tablo 1'de verilen değerler herhangi bir değerlendirme kriterinin bir diğer kriteri hangi ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Tablo 1

İkili Karşılaştırmalar İçin Ölçek	
Sayısal Değer	Dilsel Karşılık
0	Etkisiz
1	Düşük etki
2	Orta etki
3	Yüksek etki
4	Çok yüksek etki

Adım 2: Değerlendirme kriterlerinin etki durumları Tablo 1'deki sayısal değerler ile matris formunda düzenlenir. Karar verici sayısı birden fazla ise matristeki değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanmaktadır. Köşegen değerleri 0 olan bu asimetrik matris X : direkt ilişki matrisidir. X matrisinin gösterimi Eşitlik (5)'te verilmiştir.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Adım 3: X matrisi elde edildikten sonra Eşitlik (6) ile matristeki her bir satır ve sütun toplamının en büyüğü (s) bulunur.

$$s = \max(\max \sum_{j=1}^n x_{ij}, \sum_{i=1}^n x_{ij}) \quad (6)$$

Sonrasında X matrisinin her elemanı elde edilen s değerine Eşitlik (7)'de gösterildiği gibi bölünerek C: normalleştirilmiş direkt ilişki matrisi elde edilir.

$$C = \frac{x}{s} \quad (7)$$

Adım 4: Eşitlik (8)'de verilen formülasyon ile C matrisi birim matristen (I) çıkarılarak tersi alınır. Ters alma işleminden sonra elde edilen matris tekrar C matrisi ile çarpılarak F: toplam ilişki matrisi elde edilir.

$$\lim_{H \rightarrow \infty} C + C^2 + C^3 + \dots + C^H \quad (8)$$

$$F = C + C^2 + C^3 + \dots + C^H = C(I - C)^{-1}$$

Adım 5: Etkileyen ve etkilenen değerlendirme kriter grupları belirlenir. Net etki derecelerinin elde edilebilmesi için F matrisinde satır ve sütun toplamları hesaplanır. F matrisinde her bir değerlendirme kriteri için;

D_i = Her bir satır toplamı; ilgili kriterin diğer kriterleri doğrudan ya da dolaylı etkilemesini belirtir.

R_i = Her bir sütun toplamı; ilgili kriterin diğer kriterlerden etkilenme durumunu belirtir.

$D_i + R_i$ = Her bir değerlendirme kriteri için gönderilen ve alınan toplam etkiyi yani kriterin sistem içindeki önemini ortaya koyar.

$D_i - R_i$ = İlgili değerlendirme kriteri için negatif ise kriterin etkilenen grupta, pozitif ise etkileyen grupta olduğunu açıklar.

Adım 6: Etki yönlü dağılım grafiği elde edilir. Karar verici uzman grup tarafından ya da F matris değerlerinin ortalaması alınarak eşik değer belirlenir. Eşik değer üzerinde değeri olan kriterler etkileyen olarak belirlenir ve etki yönü diyagramda oklarla işaretlenir. Ok yönü etkileyen kriterden etkilenen kriter

doğrudur. Herhangi bir değerlendirme kriterinin kendisini etkilemesi de yine oklarla diyagram üzerinde gösterilir.

Adım 7: Her bir değerlendirme kriteri için göreceli ağırlıklar elde edilen $D_i + R_i$ ve $D_i - R_i$ değerleri kullanılarak Eşitlik (9)'daki formülasyonla hesaplanmaktadır.

$$W_{ia} = \sqrt{(D_i + R_i)^2 + (D_i - R_i)^2} \quad (9)$$

$$W_i = \frac{W_{ia}}{\sum_{i=1}^n W_{ia}}$$

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Regresyon Analizi Bulguları

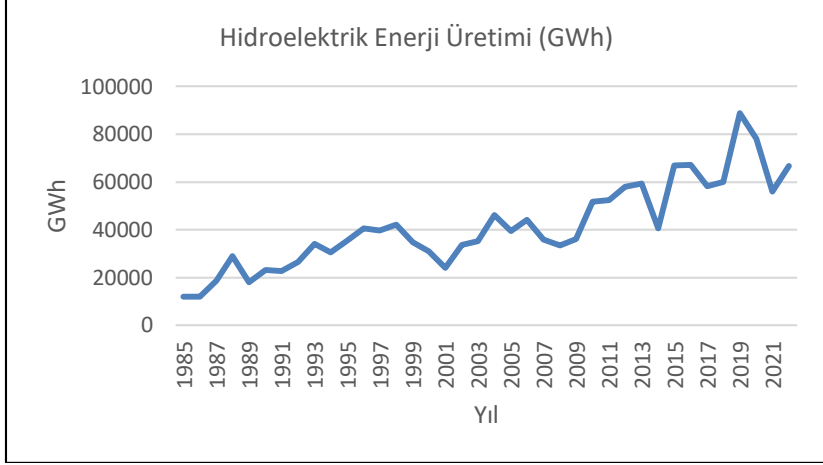
Türkiye'de 1985-2022 yılları arasında kapsayan 38 yıllık hidroelektrik enerji üretim verileri Tablo 2'de yer almaktadır (TÜİK, 2024).

Tablo 2

Türkiye'nin 1985-2022 Yılları Arası Hidroelektrik Enerji Üretim Verileri (GWh)

Yıl	Hidroelektrik Enerji Üretimi (GWh)	Yıl	Hidroelektrik Enerji Üretimi (GWh)
1985	12045,088	2004	46113,588
1986	11868,805	2005	39517,264
1987	18628,260	2006	44251,300
1988	28973,547	2007	35821,346
1989	17954,835	2008	33334,224
1990	23132,286	2009	36040,405
1991	22652,496	2010	51745,960
1992	26600,090	2011	52302,060
1993	34025,488	2012	57958,274
1994	30623,902	2013	59318,038
1995	35533,764	2014	40566,043
1996	40506,074	2015	67016,448
1997	39768,960	2016	67229,887
1998	42188,360	2017	58266,390
1999	34699,120	2018	60045,994
2000	30855,734	2019	88822,787
2001	24054,100	2020	78094,369
2002	33644,000	2021	55926,809
2003	35285,831	2022	66802,497

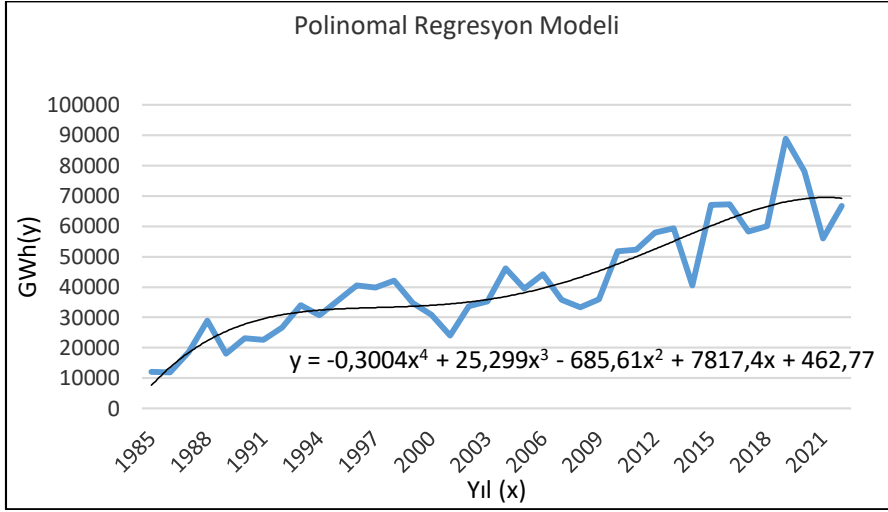
Tablo 2’de yer alan hidroelektrik enerji üretim verilerinin grafik görünümü Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Türkiye’de Hidroelektrik Enerji Üretim Verilerinin Grafik Gösterimi (1985-2022)

Şekil 1’e göre çalışmanın ilk bölümünde polinomal regresyon ve üstel regresyon yöntemleri kullanılarak yıl bağımsız değişkeni altında hidroelektrik enerji üretim verileri analiz edilmiştir.

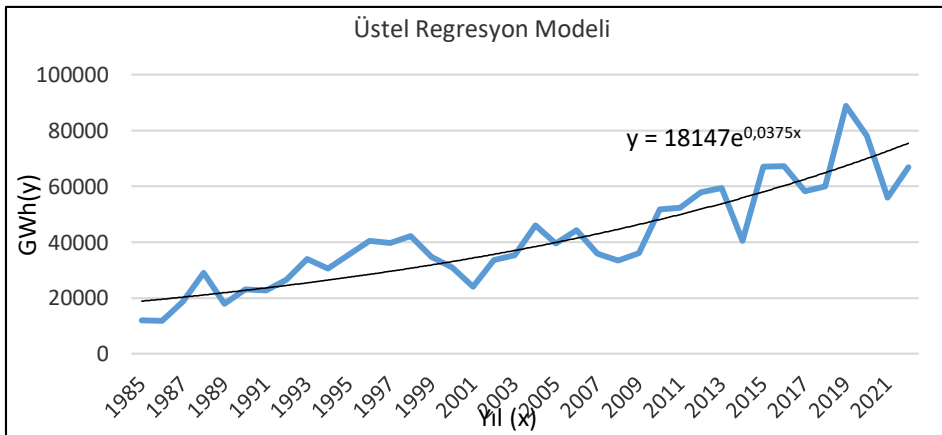
Tablo 2’de yer alan verilere polinomal regresyon yöntemi uygulanarak oluşturulan tahmin model denklemi ve grafiği Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Hidroelektrik Enerji Üretim Verileri İçin Polinomal Regresyon Modeli

Şekil 3'te yer alan $y = -0,3004x^4 + 25,299x^3 - 685,61x^2 + 7817,4x + 462,77$ model denklemi Eşitlik (1) kullanılarak elde edilmiş ve gerçek verilere uygulanmıştır. Eşitlik (3)'teki formülasyon ile MAPE değeri %15.755 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değere göre polinomal regresyon modeli tahminleme gücü bakımından "iyi" statüdedir.

Tablo 2'de yer alan verilere üstel regresyon yöntemi uygulanarak oluşturulan tahmin model denklemi ve grafiği Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Hidroelektrik Enerji Üretim Verileri İçin Üstel Regresyon Modeli

Şekil 4'te yer alan $y = 18147e^{0,0375x}$ model denklemi Eşitlik (2) kullanılarak elde edilmiş ve gerçek verilere uygulanmıştır. Eşitlik (3)'teki formülasyon ile MAPE değeri %18.393 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değere göre üstel regresyon modeli tahminleme gücü bakımından "iyi" statüdedir.

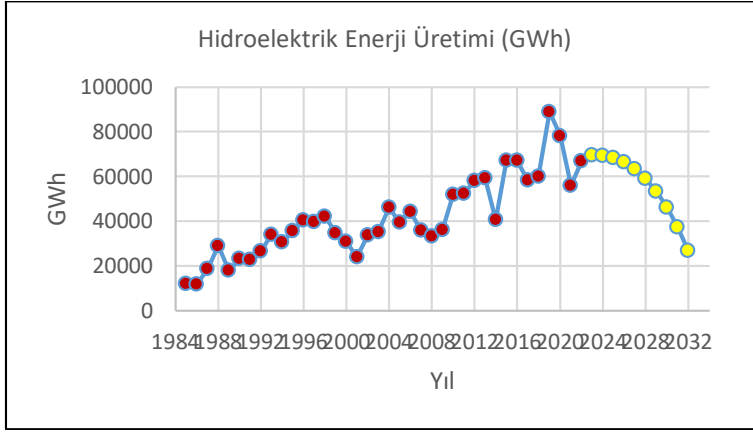
MAPE değerleri incelendiğinde polinomal regresyon yönteminin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bu nedenle tahmin modeli olarak bu çalışmada bir seçim yapılmış ve polinomal regresyon yöntemi kullanılmıştır. Polinomal regresyon model denklemi ile 2032 yılına kadar olan tahmini hidroelektrik enerji üretim değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3

Polinomal Regresyon Yöntemi ile Tahminlenen Hidroelektrik Enerji Üretim Verileri (GWh)

Yıl	Tahmini Hidroelektrik Enerji Üretimi (GWh)
2023	69578,763
2024	69335,004
2025	68282,265
2026	66294,770
2027	63239,535
2028	58976,364
2029	53357,853
2030	46229,388
2031	37429,145
2032	26788,092

Tablo 2'de verilen 1985-2022 yılları arası hidroelektrik üretim verileri polinomal regresyon yöntemi ile modellenmiştir. Geleceğe yönelik elde edilen tahmini verilere ilişkin grafik, geçmiş dönem verileriyle birlikte Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Geçmiş Veriler ve Tahmini Verilerin Grafik Gösterimi

Polinomal regresyon yöntemi uygulamasında Eşitlik (4)'teki R^2 formülasyonu ile R^2 değeri 0,828 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değere göre hidroelektrik enerji üretim değerlerindeki değişimin %82,8'i yıl değişkeni tarafından açıklanabilmektedir. Bu oran 1'e (%100) yakın olduğu için pozitif kabul edilebilir düzeydedir. Fakat daha doğru modelleme için yıl değişkeni dışında farklı bağımsız değişken verisine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu bağlamda DEMATEL yöntemi kullanılarak tahminleme için kullanılabilir bağımsız değişkenlere yönelik bir çıkarım yapılması amaçlanmıştır.

4.2. DEMATEL Yöntemi Bulguları

Şekil 1'e göre çalışmanın ikinci bölümünde DEMATEL yöntemi kullanılarak karar verici görüşleriyle hidroelektrik enerji üretimini etkileyen bazı kriterler değerlendirilmiştir. Literatürden ve karar verici görüşleri ile belirlenen kriterler; kriter açıklamaları, kaynak yayınları ve kodları ile birlikte Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4

Hidroelektrik Enerji Üretimi İçin Değerlendirme Kriterleri

Kriter Kodu	Kriter	Kriter Açıklaması	Kaynak
C1	Akarsu Verimi	Akarsuların verimi, hidroelektrik santraller ile enerji üretimini doğrudan etkileyen bir parametredir. Hidroelektrik enerji santralinin üzerine kurulacağı akarsu, yüksek debili olması ve düzenli rejimde akış göstermesi enerji üretimi için uygundur.	(Candar, 2022)
C2	Arazi Eğimi	Arazi eğimi ve düşü yüksekliğinin fazla olması hidroelektrik enerji üretimi için elverişli bir durumdur.	(Candar, 2022)
C3	Zemin Geçirimsizlik Özelliği	Su toplama bölgesindeki zeminin geçirimsizlik özelliği akarsu akımını etkilediği için hidroelektrik enerji üretimi için önemlidir.	(Akarçesme, 2019)
C4	Yıllık Yağış Miktarı	Yıllık yağış miktarının hidroelektrik enerji üretimi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yağışların bol olduğu yıllarda hidroelektrik santrallerinin enerji üretimi belirgin bir şekilde artmaktadır.	(Wei, Jiheng, Junhong, Zhe, Lingbo ve Baodeng, 2020)
C5	Jeolojik Yapı	Jeolojik yapı, hidroelektrik enerji üretimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Jeolojik yapı, yeraltı suyu akışını etkileyerek su seviyelerini ve dolayısıyla hidroelektrik enerji üretimini değiştirebilir. Baraj yapılarının stabilitesi ve deprem riskleri gibi mühendislik açısından kritik konularda da belirleyici olabilir.	(Pujades, Poulain, Orban, Goderniaux ve Dassargues, 2021)
C6	Baraj ve Rezervuar Kapasitesi	Su depolama kapasitesi enerji üretim potansiyeliyle doğrudan ilişkilidir. Büyük rezervuarlara sahip barajlar suyu daha uzun süre tutarak enerji üretimini optimize edebilir. Barajlardaki su seviyelerinin daha yüksek olduğu dönemlerde enerji üretimi artar.	(Zanoli, Pepe, Astolfi ve Luzi, 2023)
C7	Türbin Verimliliği	Türbinler, hidroelektrik santrallerinde su enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için kullanılır. Türbin verimliliği, türbinin su enerjisini ne kadar etkili bir şekilde mekanik enerjiye dönüştürdüğünü ifade eder. Yüksek verimlilik, daha fazla enerji üretimi anlamına gelir ve enerji kayıplarını azaltır.	(Kholifah, Setyawan, Wijayanto, Widiastuti ve Saputro, 2018)

DEMATEL yöntemi uygulamasında 3 karar vericinin uzman görüşünden yararlanılmıştır. Karar vericiler KV1, KV2 ve KV3 olarak kodlanmıştır ve KV1 özel bir kurumda enerji sistemleri mühendisi, KV2 kamu kurumunda enerji yönetimi uzmanı ve KV3: kamu kurumunda endüstri mühendisi olarak çalışmalarına devam etmektedir. Her bir karar vericinin Tablo 1’de verilen değerler gözeterek oluşturduğu matrisler Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5

Hidroelektrik Enerji Üretim Değerlendirme Kriterleri için İkili Karşılaştırma Matrisleri

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
KV1	C1	0	3	1	4	0	3	2
	C2	4	0	1	0	1	3	2
	C3	2	0	0	0	1	0	1
	C4	4	0	2	0	0	3	2
	C5	1	2	2	0	0	2	1
	C6	0	0	0	0	0	0	3
	C7	1	0	0	0	0	1	0
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
KV2	C1	0	2	2	2	0	3	2
	C2	3	0	2	0	2	4	3
	C3	2	0	0	1	3	0	2
	C4	4	1	1	0	0	3	1
	C5	2	2	2	1	0	2	1
	C6	1	0	1	1	0	0	2
	C7	1	0	0	0	1	2	0
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
KV3	C1	0	3	1	4	0	3	2
	C2	3	0	2	0	1	3	1
	C3	2	1	0	1	2	1	1
	C4	3	0	2	0	0	4	1
	C5	1	2	2	0	0	2	1
	C6	1	0	0	1	0	0	2
	C7	1	1	1	0	0	1	0

Tablo 5'te bulunan matrislerdeki değerlerin aritmetik ortalaması alınarak Tablo 6'da yer alan X matrisi elde edilmiştir.

Tablo 6

Direkt İlişki Matrisi (X)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0,000	2,667	1,333	3,333	0,000	3,000	2,000
C2	3,333	0,000	1,667	0,000	1,333	3,333	2,000
C3	2,000	0,333	0,000	0,667	2,000	0,333	1,333
C4	3,667	0,333	1,667	0,000	0,000	3,333	1,333
C5	1,333	2,000	2,000	0,333	0,000	2,000	1,000
C6	0,667	0,000	0,333	0,667	0,000	0,000	2,333
C7	1,000	0,333	0,333	0,000	0,333	1,333	0,000

X matrisi için Eşitlik (6)'daki formülasyon uygulandığında s değeri 12,333 olarak hesaplanmıştır. Eşitlik (7) kullanılarak elde edilen C matrisi Tablo 7'de yer almaktadır.

Tablo 7

Normalleştirilmiş Direkt İlişki Matrisi (C)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0,000	0,216	0,108	0,270	0,000	0,243	0,162
C2	0,270	0,000	0,135	0,000	0,108	0,270	0,162
C3	0,162	0,027	0,000	0,054	0,162	0,027	0,108
C4	0,297	0,027	0,135	0,000	0,000	0,270	0,108
C5	0,108	0,162	0,162	0,027	0,000	0,162	0,081
C6	0,054	0,000	0,027	0,054	0,000	0,000	0,189
C7	0,081	0,027	0,027	0,000	0,027	0,108	0,000

7X7 birim matristen ($I_{7 \times 7}$) C matrisi çıkarıldığında elde edilen matris Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8

(I-C) Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1,000	-0,216	-0,108	-0,270	0,000	-0,243	-0,162
C2	-0,270	1,000	-0,135	0,000	-0,108	-0,270	-0,162
C3	-0,162	-0,027	1,000	-0,054	-0,162	-0,027	-0,108
C4	-0,297	-0,027	-0,135	1,000	0,000	-0,270	-0,108
C5	-0,108	-0,162	-0,162	-0,027	1,000	-0,162	-0,081
C6	-0,054	0,000	-0,027	-0,054	0,000	1,000	-0,189
C7	-0,081	-0,027	-0,027	0,000	-0,027	-0,108	1,000

Tablo 8'de yer alan matrisin tersi alınarak Tablo 9'daki matris elde edilmiştir.

Tablo 9

(I-C)⁻¹ Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1,343	0,338	0,291	0,414	0,097	0,604	0,471
C2	0,506	1,165	0,295	0,189	0,186	0,576	0,447
C3	0,333	0,148	1,127	0,171	0,207	0,262	0,285
C4	0,512	0,172	0,276	1,185	0,074	0,552	0,379
C5	0,330	0,268	0,288	0,156	1,084	0,412	0,311
C6	0,139	0,046	0,076	0,102	0,024	1,108	0,261
C7	0,156	0,075	0,078	0,059	0,050	0,203	1,095

Eşitlik (8) kullanılarak elde edilen F matrisi Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10

Toplam İlişki Matrisi (F)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0,343	0,338	0,291	0,414	0,097	0,604	0,471
C2	0,506	0,165	0,295	0,189	0,186	0,576	0,447
C3	0,333	0,148	0,127	0,171	0,207	0,262	0,285
C4	0,512	0,172	0,276	0,185	0,074	0,552	0,379
C5	0,330	0,268	0,288	0,156	0,084	0,412	0,311
C6	0,139	0,046	0,076	0,102	0,024	0,108	0,261
C7	0,156	0,075	0,078	0,059	0,050	0,203	0,095

DEMATEL yönteminde Adım 5 izlenerek Tablo 11'deki değerler elde edilmiştir.

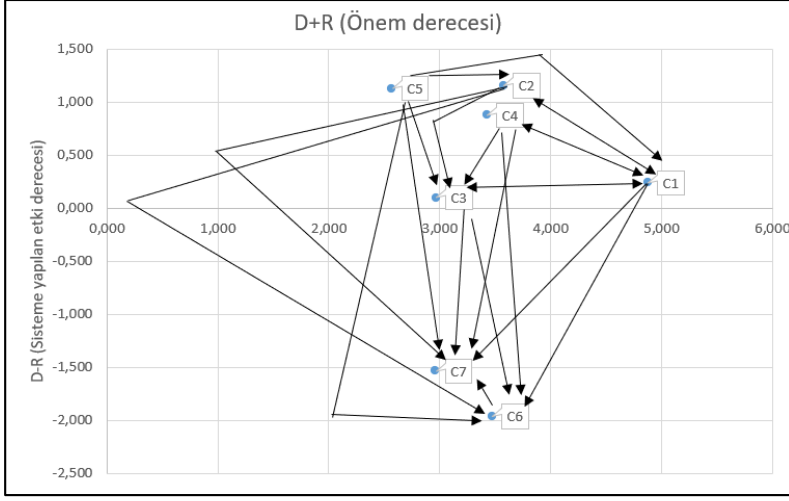
Tablo 11

Etkileyen ve Etkilenen Kriter Grupları

	D_i	R_i	D_i+R_i	D_i-R_i
C1	2,558	2,319	4,877	0,239
C2	2,365	1,212	3,577	1,153
C3	1,533	1,433	2,966	0,100
C4	2,151	1,276	3,427	0,875
C5	1,850	0,721	2,571	1,129
C6	0,756	2,716	3,472	-1,960
C7	0,715	2,249	2,964	-1,534

Tablo 11'deki değerlere göre gönderilen ve alınan toplam etki derecesini gösteren D_i+R_i değeri C1 kriteri için en yüksek değerdedir. C1 kriterinin sistemdeki önem derecesi yüksektir. D_i-R_i değerleri incelendiğinde C1, C2, C3, C4 ve C5 kriterleri pozitif değerde olduğu için etkileyen kriter grubu olarak belirlenmiştir. C6 ve C7'ye ait D_i-R_i kriterleri negatif hesaplandığı için bu kriterler etkilenen kriter grubudur.

DEMATEL yönteminde Adım 6 uygulanmıştır. Tablo 10'daki F matris değerlerinin aritmetik ortalaması alınmış ve eşik değer 0,243 olarak belirlenmiştir. Elde edilen eşik değere göre Şekil 6'daki etki yönlü dağılım grafiği çizilmiştir.



Şekil 6. Etki yönlü dağılım grafiği

Etki yönlü dağılım grafiğinde etkileyen ve etkilenen kriterler yönlü oklarla gösterilmiştir. Her bir kriterin sistem içindeki yeri ya da önemi verilen düzlemdeki konumuna göre belirlenebilmektedir.

DEMATEL yöntemi ile ayrıca kriterlerin göreceli ağırlıkları da hesaplanmaktadır. Eşitlik (9)'daki formülasyon kullanılarak elde edilen değerler Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12

Hidroelektrik enerji üretim değerlendirme kriterlerinin göreceli ağırlıkları

	W_{ia}	W_i
C1	4,883	0,193
C2	3,758	0,149
C3	2,968	0,117
C4	3,537	0,140
C5	2,808	0,111
C6	3,987	0,158
C7	3,337	0,132

Tablo 12'ye göre ağırlık değeri en fazla olan kriter 0,193 değeri ile C1 kriteridir. En az ağırlığa sahip olan kriter 0,111 değeri ile C5 kriteridir. Önem ağırlıklarına göre kriterlerin sıralaması $C1 > C6 > C2 > C4 > C7 > C3 > C5$ şeklindedir.

5. Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde en yüksek öneme sahip kaynaklardan biri hidroelektrik enerjidir. Enerji kaynaklarının verimli kullanımı ve kontrolü amacıyla arz ve talep dengesini analiz edebilmek ve geleceğe yönelik tahminlerde bulunmak önemlidir. Ayrıca hidroelektrik enerji üretimi karar problemini içeren kriterlerin önem düzeylerinin konuyla ilgili bilgi sahibi olan karar vericilerin görüşleri ile değerlendirilmesi hidroelektrik enerji üretim verilerinin kontrolü ve analizi için önemli bir girdidir.

Bu çalışmada Türkiye'nin 1985-2022 yılları arasındaki hidroelektrik enerji üretim verileri (GWh) regresyon analizi ile değerlendirilmiştir. Tek bir bağımsız değişken olan yıl baz alınarak polinomal ve üstel regresyon yöntemleri kullanılmıştır. Yöntemlerden elde edilen modellere ilişkin MAPE değerleri sırasıyla %15,755 ve %18,393 olarak elde edilmiştir. Bu değerlere göre iki yöntemin de tahminleme gücü "iyi" olarak saptanmıştır. MAPE değerinin düşük olması modelleme açısından elverişli olduğu için zamansal tahminleme yöntemi olarak polinomal regresyon yöntemi seçilmiştir. Türkiye'nin hidroelektrik enerji üretim verileri 2032 yılına kadar polinomal regresyon modeli ile tahminlenmiştir. Bir diğer model metriği olan R^2 polinomal regresyon modeli için hesaplanmış ve 0,828 değeri elde edilmiştir. Bu değere göre hidroelektrik enerji üretim değerlerindeki değişimin %82,8'i "yıl" bağımsız değişkeni tarafından açıklanabilmektedir. Bu oran 1'e (%100) yakın olduğu için pozitif ve kabul edilebilir düzeydedir.

Şekil 5 incelendiğinde polinomal regresyon analizi ile elde edilen tahmini hidroelektrik enerji üretim verilerinin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Sadece yıl bağımsız değişkeni baz alınarak elde edilen bu sonucun bazı beklentilerle uyumlu olduğu düşünülmektedir. Kaplan (2023) çalışmasında Türkiye'de zamana bağlı olarak gelişen kuraklık etkisi nedeniyle özellikle de yaz mevsiminde gelen toplam suyun azalış göstermesinden dolayı elektrik üretiminin minimum seviyelere geldiğini ve bu azalışın devam edebileceğini değerlendirmiştir. Kapsamlı bir analiz için yıl değişkeni dışında farklı bağımsız değişken verisine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu bağlamda çalışmada farklı değişkenlerin regresyon analizine dahil edilmesi bir karar problemi olarak düşünülmüştür. Hidroelektrik enerji üretimi için bazı değerlendirme kriterleri karar verici görüşü ve literatür araştırması ile belirlenmiştir. Kriterler 3 karar verici tarafından puanlanmıştır. Matris işlemleri ile çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan DEMATEL yönteminin adımları uygulanmıştır. Etkileyen ve etkilenen kriter grupları belirlenebilmiştir. Hesaplanan D_i - R_i değerlerine göre akarsu verimi (C1), arazi eğimi (C2), zemin geçirimsizlik özelliği (C3), yıllık yağış miktarı (C4) ve jeolojik yapı (C5) etkileyen kriter grubu; baraj ve rezervuar kapasitesi (C5) ve türbin verimliliği (C6) ise etkilenen kriter grubu olarak belirlenmiştir. Ayrıca DEMATEL yöntemi ile kriterlere ilişkin ağırlıklar hesaplanmış ve önem ağırlığı en yüksek kriter akarsu verimi (C1); önem ağırlığı en düşük kriter ise jeolojik yapı (C5) olarak elde edilmiştir. Bu bağlamda

belirlenen regresyon modeline dahil edilecek farklı bağımsız değişken seçimi için DEMATEL sonuçlarını yorumlamak faydalı ve nicel olabilir. Örneğin en yüksek önem ağırlığına sahip akarsu verimi kriteri (C1) aynı zamanda etkileyen kriter grubunda yer aldığı için regresyon analizine bağımsız değişken olarak dahil edilmelidir. Ayrıca önem ağırlığı bakımından ikinci sırada bulunan ve etkilenen kriter grubunda olan baraj ve rezervuar kapasitesi (C6) kriteri de regresyon analizine dahil edilmesi gereken bir başka bağımsız değişken olarak düşünülebilir.

Ulusal ve uluslararası literatür incelendiğinde DEMATEL ve regresyon analizi kullanan bazı çalışmalar bulunmaktadır. Çakın ve Özdemir (2015) çalışmalarında Türkiye’de İstatistik Bölge Birimleri Sınıflaması Düzey 1’de yer alan 12 adet bölgenin 2010, 2011 ve 2012 yıllarındaki inovasyon performanslarını regresyon analizi, DEMATEL tabanlı Analitik Ağ Süreci ve TOPSIS yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Regresyon analizi ile elde edilen regresyon katsayılarını DEMATEL yönteminde kullanılarak kriterleri ağırlıklandırmış ve TOPSIS yöntemi ile bölgelere ait performans sıralamalarını ortaya koymuşlardır. Hashemi, Kamranrad, Bagheri ve Emami (2020) çalışmalarında bulanık DEMATEL ve bulanık ikili lojistik regresyon yöntemleriyle enerji projelerinde kritik riskleri belirlemeyi ve analiz etmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca meta-sezgisel algoritma kullanılarak yüksek düzeyde risk olasılığının en aza indirilmesi için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışma DEMATEL ve regresyon analizi yöntemlerini benzer bir konuda kullanan çalışma olmaması açısından bir yenilik teşkil etmektedir. Ayrıca literatürdeki çalışmalardan farklı şekilde iki yöntemin hibritlenerek ve destekleyici yöntemler olarak sunulması literatüre katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın temel motivasyon kaynağı yenilenebilir enerji kaynaklarındaki üretim verilerinin belirsizliği bakımından üretim kriterlerinin/değişkenlerin uygulama bölgesi özelinde ve karar vericiler tarafından bir karar algoritması ile belirlenebilmesi ve tahminleme algoritmasına dahil edilebilecek değişkenler hakkında fikir sunabilmesidir. İstatistiksel tahmin süreci ve deterministik karar sürecini hibritleştirmeyi amaçlayan çalışmada, karar verici grup veya karar verici yargıları değişirse değerlendirme sonuçları değişiklik gösterebilir. Bu bağlamda “dinamik” karar probleminin yapısı ve alınacak önlemlerin durumu dikkate alınmalıdır. Bu çalışma hidroelektrik enerji üretiminin karar alma ve istatistiksel analiz yoluyla incelenmesi, değerlendirilmesi ve tahmini konusunda bütünsel bir bakış açısı sağlamayı amaçlamaktadır. Elde edilen tahmini değerlerin kontrolünde DEMATEL ile elde edilen kriter ağırlıkları politika yapıcılar ve karar vericiler tarafından incelenebilir ve bu inceleme gelecekteki çalışmalarda daha detaylı analizlerin önünü açabilir. Kullanılabilecek kriter ağırlıklandırma süreci de farklı metodolojilere açıktır. Örneğin bulanık yaklaşımlarla entegre edilen yöntemlerin kullanımı çalışmayı daha da detaylandırabilir. İstatistiksel analiz açısından ele alındığında farklı tahmin yöntemlerinin başarısı farklı model metrikleri dahil edilerek incelenebilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Ezgi GÜLER, verilerin temin edilmesi, bilgisayar ortamına aktarılması, bilimsel yayın araştırması, regresyon modellerinin analizi, DEMATEL yöntem adımlarının hazırlanması, analizlerin yapılması; Süheyla YEREL KANDEMİR, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması, kontrolü; Zerrin ALADAĞ, makale fikrinin önerilmesi, geliştirilmesi, analizler, makalenin sonuçlarının hazırlanması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Aka, M., Kentel, E. ve Kucukali, S. (2017). A fuzzy logic tool to evaluate low-head hydropower technologies at the outlet of wastewater treatment plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 727-737. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.010>
- Akarçeşme, Y. (2019). Hidroelektrik Potansiyelin Türkiye Açısından Önemi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi. Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=4J_FzTwrMCH4q_BROpXPH_jmq7ksykUuc24w2jjvtlkb6-EyJZQ-ZkaPCz_w5wTW
- Akpınar, A., Tavşan, F., Kömürcü, M. İ., Filiz, M. H., ve Kaygusuz, K. (2012). The total electricity energy production of the world, European Union, and Turkey: projections and comparison. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7(1), 28-44. Doi: <https://doi.org/10.1080/15567240802532767>
- Azad, A. S., Rahaman, M. S. A., Watada, J., Vasant, P., ve Vintaned, J. A. G. (2020). Optimization of the hydropower energy generation using Meta-Heuristic approaches: A review. *Energy Reports*, 6, 2230-2248. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.08.009>
- Baran, B. (2020). Coverage Ratio of Residential Electricity Demand of Turkey with Wastewater Treatment Plant Hydroelectric Production. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 8(1), 139-145. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3321395>
- Bek, M. İ. (2008). *Zaman Serisi Analizi ve Tarımsal Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş. Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=UPP_Zu9is_EmWGFxFCBYasRT3_yNk90UbDWDp3GE0uNBebbOlvOSnlGsz5SijsO4

- Candar, B. (2022). *Türkiye’de Kurulu Olan Hidroelektrik Santrali Projelerinin Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=qVqOZFj2DwNmvdf1oGFYiGEJNLIhViazhyWaBiqaUS4QCc2gnZIJFXWjC4rpWLZu>
- Çakın, E., ve Özdemir, A. (2015). Bölgesel gelişmişlikte ar-ge ve inovasyonun rolü: DEMATEL tabanlı analitik ağ süreci (DANP) ve TOPSIS yöntemleri ile bölgelerarası bir analiz. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 30(1), 115-144. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/deuifbd/issue/22716/242453>
- Da Silva, R. F., Bellinello, M. M., de Souza, G. F. M., Antomarioni, S., Bevilacqua, M., ve Ciarapica, F. E. (2021). Deciding a multicriteria decision-making (MCDM) method to prioritize maintenance work orders of hydroelectric power plants. *Energies*, 14(24), 8281. Doi: <https://doi.org/10.3390/en14248281>
- Dutta, A. ve Jinsart, W. (2021). Air pollution in Indian cities and comparison of MLR, ANN and CART models for predicting PM₁₀ concentrations in Guwahati, India. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 15(1). Doi: <https://doi.org/10.5572/ajae.2020.131>
- Güler, E., Yerel Kandemir, S., Açıklalp, E., ve Ahmadi, M. H. (2021). Evaluation of sustainable energy performance for OECD countries. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 16(6), 491-514. Doi: <https://doi.org/10.1080/15567249.2021.1909673>
- Hashemi, R., Kamranrad, R., Bagheri, F., ve Emami, I. (2020). A fuzzy DEMATEL–Fuzzy Binary Logistic Regression approach to evaluate and prioritize risks and simulated annealing optimization algorithm (an empirical study in energy projects). *International Journal of Managing Projects in Business*, 13(5), 1025-1050. Doi: <https://doi.org/10.1108/IJMPB-04-2019-0089>
- Huang, H. ve Yan, Z. (2009). Present Situation And Future Prospect Of Hydropower In China. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 13(6), 1652-1656. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.013>
- İnallı, K., Işık, E. ve Dağtekin, İ. (2014). The prediction of efficiency and production parameters in Karakaya using the artificial network. *Dicle University Journal of Engineering*, 5(1): 59-68. Erişim adresi: <https://search.trdizin.gov.tr/yayin/detay/245927>
- Karaoğlan, S. (2016). DEMATEL VE VIKOR Yöntemleriyle Dış Kaynak Seçimi: Otel İşletmesi Örneği. *Akademik Bakış Uluslararası Hakemli Sosyal Bilimler Dergisi*, 55, 9-24. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/abuhxbd/issue/32960/366266>
- Kaplan, F. A. (2023). İklim Değişikliğinin Hidroelektrik Santraller Üzerindeki Etkisi ve Hes, Ges Hibrit Modeli. *DSI Technical Bulletin/DSİ Teknik Bülteni*,

141. Erişim Adresi: <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/471/Sayfa/1639/2069/DosyaGaleri/2.makale.pdf>

- Kholifah, N., Setyawan, A. C., Wijayanto, D. S., Widiastuti, I., ve Saputro, H. (2018). Performance of Pelton turbine for hydroelectric generation in varying design parameters. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 288, No. 1, p. 012108). IOP Publishing. Doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/288/1/012108>
- Kotan, B. ve Erener, A. (2023). Seasonal forecasting of PM₁₀, SO₂ air pollutants with multiple linear regression and artificial neural networks. *Geomatik*, 8(2), 163-179. Doi: <https://doi.org/10.29128/geomatik.1158565>
- Liou, J.J.H., Yen, L. ve Tzeng, G.H. (2008). Building An Effective Safety Management System for Airlines. *Journal of Air Transport Management*, 14, 20-26. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2007.10.002>
- Makas, Y., ve Karaatlı, M. (2016). Multi-Period Estimation of Hydroelectric Power Generation With Artificial Neural Network. *Süleyman Demirel University The Journal of Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 21(3), 757-772. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/227675>
- Malaslı, M. Z., Çelik, A., ve Çelik, Ş. (2015). Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin toprak işleme alet ve makinaları projeksiyonunun regresyon analizi yöntemiyle belirlenmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 2(1), 126-132. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/issue-file/2996>
- Maleki, H., Sorooshian, A., Goudarzi, G., Baboli, Z., ve Birgani, Y. (2019). Rahmati, M. Air pollution prediction by using an artificial neural network model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(6), 1341-1352. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01709-w>
- Martins F., ve Smitkovác, M. (2017). Mathematical modeling of Portuguese hydroelectric energy system. *Energy Procedia*. 136, 213-218. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.241>
- Meyers, L. S., Gamst, G., ve Guarino, A. J. (2016). Applied multivariate research: Design and interpretation. Sage publications. 1st ed., New York, USA. Doi: <https://doi.org/10.4135/9781071802687>
- Moreno, J. J. M., Pol, A. P., Abad, A. S., ve Blasco, B. C. (2013). Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy. *Psicothema*, 25(4), 500-506. Erişim adresi:
- Ostertagová, E. (2012). Modeling using polynomial regression. *Procedia Engineering*, 48, 500-506. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.545>

- Önöz B. ve Albostan A. (2007). *Hidroelektrik santral planlama ve işletmesinde yüksek akımların mevsimselliğinin belirlenmesi*, TMMOB Türkiye VI. Enerji Sempozyumunda sunulmuş bildiri, Ankara.
- Özcan, N. A., Bulut, M., Özcan, E. C., ve Eren, T. (2022). Enerji Üretim Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin İstatistiksel ve Analitik Olarak Karşılaştırması: Türkiye Örneği. *Politeknik Dergisi*, 25(2), 519-531. Doi: <https://doi.org/10.2339/politeknik.763579>
- Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., ve Eren, T. (2017). A combined goal programming-AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1410-1423. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.039>
- Özen, N. S., Saraç, S., ve Koyuncu, M. (2021). Prediction of COVID-19 cases in the United States of America with machine learning algorithms. *European Journal of Science and Technology*, 22, 134-139. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1492256>
- Pata, U. K. (2018). The influence of coal and noncarbohydrate energy consumption on CO₂ Emissions: Revisiting The Environmental Kuznets Curve Hypothesis for Turkey. *Energy*, 160, 1115-1123. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.095>
- Pujades, E., Poulain, A., Orban, P., Goderniaux, P., ve Dassargues, A. (2021). The impact of hydrogeological features on the performance of underground pumped-storage hydropower (UPSH). *Applied Sciences*, 11(4), 1760. Doi: <https://doi.org/10.3390/app11041760>
- Stefenon, S. F., Ribeiro, M. H. D. M., Nied, A., Yow, K. C., Mariani, V. C., dos Santos Coelho, L., ve Seman, L. O. (2022). Time series forecasting using ensemble learning methods for emergency prevention in hydroelectric power plants with dam. *Electric Power Systems Research*, 202, 107584. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2021.107584>
- Suvitha, K., Narayanamoorthy, S., Sandra, M., Pamucar, D., Simic, V., ve Kang, D. (2024). Effective hydropower renewable energy source selection using fuzzy neutrosophic boundary approximate area. *Renewable Energy Focus*, 48, 100537. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100537>
- Şahin, U. (2020). Projections of Turkey's electricity generation and installed capacity from total renewable and hydro energy using fractional nonlinear grey Bernoulli model and its reduced forms. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 52-62. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.04.004>
- TÜİK. (2024). İstatistik Veri Portalı. Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Cevre-ve-Enerji-103>

- Uzlu, E., Akpınar, A., Öztürk, H. T., Nacar, S., ve Kankal, M. (2014). Estimates of hydroelectric generation using neural networks with the artificial bee colony algorithm for Turkey. *Energy*, 69, 638-647. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.059>
- Varol, B., Ömürlü, İ. K., ve Türe, M. (2020). Comparison of piecewise regression and polynomial regression analyses in health and simulation data sets. *Süleyman Demirel University Journal of Health Sciences*, 11(2), 144-151. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/sdusbed/issue/54917/636203>
- Yurtkuran, S. ve Terzi, H. (2018). Empirical analyses of environmental kuznets curve: Mexican Case. *International Journal of Economics and Administrative Studies*, 20, 267-284. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/406544>
- Yadav, V. ve Nath, S. (2020). Novel Application of Artificial Neural Network Techniques for Prediction of Air Pollutants Using Stochastic Variables for Health Monitoring: A Review. *Soft Computing in Condition Monitoring and Diagnostics of Electrical and Mechanical Systems: Novel Methods for Condition Monitoring and Diagnostics*, 3rd ed.; Malik, H., Iqbal, A., Yadav, A.K., Springe: Singapore, 231-245. Doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1532-3_10
- Yavuz, S. (2009). Regresyon analizinde doğrusala dönüştürme yöntemleri ve bir uygulama. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23(1), 165-179. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/30223>
- Yerel S. ve Ersen T. (2013) Prediction of the Calorific Value of Coal Deposit Using Linear Regression Analysis, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(10), 976-980. Doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.514595>
- Zanoli, S. M., Pepe, C., Astolfi, G., ve Luzi, F. (2023). Reservoir advanced process control for hydroelectric power production. *Processes*, 11(2), 300. Doi: <https://doi.org/10.3390/pr11020300>
- Wei, L., Jiheng, L., Junhong, G., Zhe, B., Lingbo, F., ve Baodeng, H. (2020). The effect of precipitation on hydropower generation capacity: a perspective of climate change. *Frontiers in Earth Science*, 8, 268. Doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00268>
- Wu, W. W., ve Lee, Y.T. (2007). Developing Global Managers' Competencies Using The Fuzzy DEMATEL Method. *Expert Systems with Applications*, 32, 499-507. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.12.005>