

Türkiye’de Elektrik Üretim Santrallerinin İç İhtiyaç Tüketimlerinin Yenilenebilir Kaynaklardan Karşılanabilmesi ve Emisyona Sağlayabileceği Katkı

İlker İLASLANER^{1,2} , Halil İbrahim VARİYENLİ^{3*} 

¹Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

²Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, Ankara, Turkey

³Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/12/2023
Düzeltilme: 21/02/2024
Kabul: 24/05/2024

Anahtar Kelimeler

Türkiye elektrik kurulu
gücü ve üretimi
Elektrik üretim maliyetleri
Elektrik şebekesi emisyon
faktörü
PV (fotovoltaik)
Yenilenebilir enerji
kaynaklarından elektrik
üretimi

Article Info

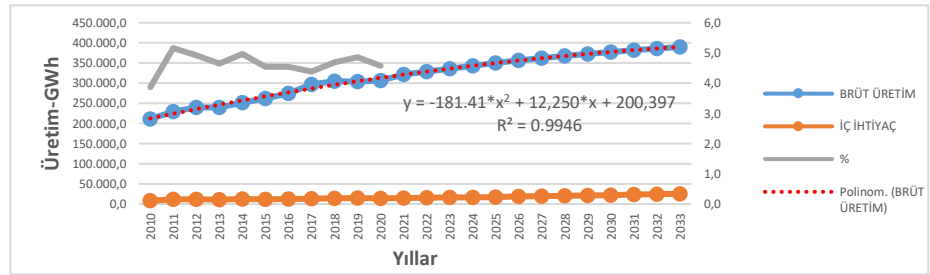
Research article
Received: 04/12/2023
Revision: 21/02/2024
Accepted: 24/05/2024

Keywords

Turkish electricity installed
capacity and generation
Electricity generation costs
Electricity grid emission
factor
PV (Photovoltaic)
Electricity generation from
renewable energy sources

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

2010-2020 yılları arasında Türkiye brüt elektrik üretim bilgileri kullanılarak tespit edilmiş olan eğriye bağlı kalmak kaydı ile ileriye dönük olarak 2033 yılına kadar oluşacak brüt üretim, iç ihtiyaç tüketim değerleri belirlenmiş olup hangi kaynak tipinin maliyet açısından iç ihtiyaca karşılık gelen tüketimi karşılama anlamında uygun olacağı hesaplaması yapılmıştır. / Providing that it adheres to the curve determined using Turkey's gross electricity generation information between 2010 and 2020, the gross generation and internal consumption values that will occur prospectively until 2033 have been determined and it has been calculated which source type will be suitable in terms of cost to meet the consumption corresponding to the internal consumption.



Şekil A: 2010-2033 Brüt üretim ve iç ihtiyaç değişimi / Figure A: 2010-2033 Gross production and internal consumption change

Önemli noktalar (Highlights)

- Elektrik üretim santrallerinde iç ihtiyaç tüketimlerinin karşılanabiliyor olması önemlidir ve bu iç tüketim yenilenebilir üretim kaynakları ile karşılanabilir. / It is important that internal consumption can be provided in electricity generation plants, and this internal consumption can be provided with renewable generation sources.
- Hibrit elektrik üretim uygulamalarına teşvik verimliliğe büyük katkı sağlayabilmektedir. / Encouraging hybrid electricity generation practices can make a great contribution to efficiency.
- Karbon emisyon değerlerinin hesaplanması ve katkısı ülkeler için önemlidir. / Calculation and contribution of carbon emission values are important for countries.

Amaç (Aim): Çalışmanın amacı, elektrik üretim santrallerine ait iç ihtiyacın PV (fotovoltaik) ile daha az maliyetle karşılanabileceğini ve bunun karbon emisyonuna da azaltıcı yönde etki yapacağını gösterebilmektir. / The aim of the study is to show that the internal consumptions of electricity generation plants can be provided at a lower cost with PV (photovoltaic) and that this will have a reducing effect on carbon emissions.

Özgünlük (Originality): Matematiksel model yaklaşımı ile elektrik üretim ve santral iç ihtiyaç tüketim tahmini yapılarak karbon emisyon miktarları belirlenmiştir. / Carbon emission amounts were determined by estimating electricity production and power plant internal consumption with a mathematical model approach.

Bulgular (Results): Çalışma, yenilenebilir elektrik üretim kaynak tipine göre sistemin kendisini geri ödeme sürelerini ortaya koymaktadır. / The study reveals the payback periods of the system according to the type of renewable electricity generation source.

Sonuç (Conclusion): 2033 yılı için PV (fotovoltaik) ile iç ihtiyaç tüketiminin karşılanması durumunda karbon emisyonuna azaltıcı yönde katkısı 16.55 Mt olacağı bulunmuştur. / It has been found that if domestic consumption is met with PV (photovoltaic) for 2033, its contribution to reducing carbon emissions will be 16.55 Mt.



Türkiye’de Elektrik Üretim Santrallerinin İç İhtiyaç Tüketimlerinin Yenilenebilir Kaynaklardan Karşılabilmesi ve Emisyona Sağlayabileceği Katkı

İlker İLASLANER^{1,2} , Halil İbrahim VARİYENLİ^{3*} 

¹Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

²Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, Ankara, Turkey

³Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/12/2023
Düzeltilme: 21/02/2024
Kabul: 24/05/2024

Anahtar Kelimeler

Türkiye elektrik kurulu
gücü ve üretimi
Elektrik üretim maliyetleri
Elektrik şebekesi emisyon
faktörü
PV (fotovoltaik)
Yenilenebilir enerji
kaynaklarından elektrik
üretimi

Öz

Bu çalışma, Türkiye’de elektrik üretimi için santrallerde kullanılan iç ihtiyacın yerli ve yenilenebilir kaynak tipi olan PV (fotovoltaik) ile üretilebileceği ve bu üretimin karbon emisyonuna olacak katkısı incelenmektedir. Bu amaçla Türkiye’de elektrik üretiminde yenilenebilir ve diğer kaynak tipinde kurulu güç değişimi yanında elektrik üretiminin 2010-2020 yılları arasındaki gelişimi incelenmiştir. Bununla birlikte ülke sınırları içindeki tüm elektrik üretim santrallerinin faaliyetinde kullanmış olduğu iç ihtiyaç tüketim miktarlarının yıllara göre değişimi belirlenmiştir. Belirlenen bu iç ihtiyaç tüketimine karşılık gelen karbon emisyon değerleri PV (fotovoltaik), rüzgar ve diğer yenilenebilir kaynak tiplerinde üretilerek karşılandığında emisyonu azaltıcı yönünde ne kadarlık bir katkı sağlayabileceği tespit edilmiştir. Elektrik üretim santrallerinde yıllık iç ihtiyaç tüketim miktarlarına bağlı olarak yenilenebilir kaynak tiplerine göre her yıl için kapasite faktörü ve buna göre karşılayabilecekleri kurulu güç miktarları tespit edilmiştir. 2010-2020 yılları arasında Türkiye brüt elektrik üretim bilgileri kullanılarak tespit edilmiş olan eğriye bağlı kalmak kaydı ile ileriye dönük olarak 2033 yılına kadar oluşacak brüt üretim, iç ihtiyaç tüketim değerleri belirlenmiştir. Ayrıca hangi kaynak tipinin maliyet açısından iç ihtiyaca karşılık gelen tüketimi karşılama anlamında uygun olacağı hesaplaması yapılmıştır. Bu çalışmada PV (fotovoltaik) ile sistemin kendini geri ödeme süresinin daha kısa olduğu sonucuna varılmıştır.

Ability to Afford Internal Consumption of Electricity Generation Power Plants in Turkey from Renewable Resources and Its Possible Contribution to Emissions

Article Info

Research article
Received: 04/12/2023
Revision: 21/02/2024
Accepted: 24/05/2024

Keywords

Turkish electricity
installed capacity and
generation
Electricity generation
costs
Electricity grid emission
factor
PV (Photovoltaic)
Electricity generation
from renewable energy
sources

Abstract

This study examines whether the domestic demand used in power plants for electricity generation in Turkey can be generated with PV (photovoltaic), a domestic and renewable resource type, and the contribution of this generation to carbon emissions. For this purpose, the development of electricity generation between 2010 and 2020 was examined, as well as the change in installed capacity in renewable and other resource types in electricity generation in Turkey. In addition, the change in internal consumption amounts used by all electricity generation plants within the country's borders over the years has been determined. It has been determined how much of a contribution it can make to reducing emissions when the carbon emission values corresponding to this determined domestic need consumption are met by producing PV (photovoltaic), wind and other renewable resource types. Depending on the annual internal consumption amounts in electricity generation plants, the capacity factor for each year according to renewable resource types and the installed power amounts they can meet accordingly have been determined. Prospectively, gross generation and internal consumption values that will occur until 2033 have been determined, provided that they adhere to the curve determined using Turkey's gross electricity generation information between 2010-2020. In addition, a calculation was made as to which resource type would be suitable in terms of cost to meet the consumption corresponding to the internal consumption. In this study, it was concluded that the payback period of the system with PV (photovoltaic) is shorter.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtlı kaynakların (baz yük santrali) tükenme riski, PV (fotovoltaik) kaynak tipi olarak kurulum maliyetlerindeki düşüş ve karbon emisyonun önemli olması sebebiyle Türkiye elektrik santrali kurulu gücü içindeki PV (fotovoltaik) payında ciddi artışlar olduğu tespit edilmektedir [1].

Gelişmiş ülke ekonomilerinde elektrik enerjisi üretim ve tüketim artışı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır, aynı zamanda bu elektrik tüketim talebinin karşılanması üretim kaynağı arzının alınabilir kapasitesinin artışı ile mümkün olabilmektedir [2,3]. Özellikle de elektrik sistemlerinde en fazla tüketim seviyesine ulaşılan saatlerde (puant olarak da ifade edilen) talebin arz kaynağı olan yenilenebilir üretim santrallerinden karşılanabilmesi, bunlardan da PV (fotovoltaik) ile sağlanabilmesinin kolay olduğu tespit edilebilmektedir. Bununla birlikte hibrit elektrik üretim uygulamalarına teşvik verimliliğe büyük katkı sağlayabilmektedir [4].

Elektrik enerjisi üretiminde birincil (primer) kaynakların kullanımı ile yapılan üretimler her ne kadar güvenli görünse de elektrik sistemi işletmeciliği uygulamalarında sistem oturması (blackout) durumları her an yaşanabilmektedir. Elektrik sistem işletmecileri her karşılaştıkları sistem oturması için toparlanma eylem planları hazırlarlar ve bu planlar hayata geçirilirken elektrik üretim santral baraları enerjisiz olduğunda bunu yeniden çalışmaya müsait (black start özelliği) olan elektrik santralleri ile yapılabilmektedir. Bu tip santrallerin özellikleri iç ihtiyaç tüketimlerini kendileri sağlayabiliyor olmalarıdır. Fakat bu durum her santral için mümkün olmamaktadır, mümkün olanlarda ise çok uzun çalıştırılmama durumlarında iç ihtiyaç tüketimini sağlayamama risklerini barındırmaktadır.

Bu amaçla arz kaynaklarını temsil eden güç santrallerinde iç ihtiyaç kullanımı esnasında üretilen enerjinin bir kısmını kendi tesisinde sekonder teçhizat (koruma röleleri, diğer elektronik kontrol kumanda unsurları) ve tesisteki mesken tüketim unsurlarını ayakta tutabilmek için gereklidir. İç ihtiyaç olarak adlandırılan, elektrik güç santraline ait öz tüketimin yenilenebilir kaynak türü olan PV (fotovoltaik) ile karşılanabileceği farklı çalışmalarda incelenmiştir [4]. Ayrıca üretim

tesisleri iç ihtiyacı karşılama hususunda elektrik şebeke yönetmeliği kapsamında belirlenen tüm kriterleri ve test kabiliyetlerini de ihtiva etmekle sorumlu tutulurlar [5].

Yapılan çalışmada Türkiye geneli elektrik üretim santralleri iç ihtiyaç tüketim oranı 2010-2020 yılları arası ortalama %4.7 olarak tespit edilmiştir [6]. Tespit edilen bu seviyedeki iç tüketim oranı yenilenebilir kaynak olan PV (fotovoltaik) ile karşılandığında emisyonu azaltıcı yönde katkısının ne olacağı ve maliyetinin ne kadar sürede karşılanabileceği bununla birlikte diğer yenilenebilir kaynak türlerine göre de kıyaslaması yapılmıştır [7].

Elektrik enerjisi üretiminde birincil kaynaklarla faaliyet gösteren santrallerde yüksek kapasite faktörü %40 ve üzeri olanlar baz yük santraller olup termik özellikleri ön planda olanlardır. Bunun yanında orta kademedeki kapasite faktörü %20-%40 arası olanlar hidrolik kaynakların olduğu tesislerdir. Hem baz yük hem de orta kademe olan elektrik üretim tesislerinde iç ihtiyaç tüketimi yoğunluk taşımaktadır. Dolayısı ile %20 ve üzeri kapasite faktörüne sahip santrallerde hibritleşmenin sağlanması uygun görülebilir durumu doğurmaktadır [8]. Üretilen elektriğin bir kısmının kendi tesisinde iç ihtiyaç için tüketilmesi durumunda tüketimin yenilenebilir kaynak ile üretilerek karşılanması verimliliğin desteklenmiş olduğunun da kanıtını oluşturmaktadır.

Nihayetinde; bu çalışma hem baz yük santrallerde hem de diğerlerinde elektrik üretimi yaparken harcanan iç ihtiyaç tüketiminin PV (fotovoltaik) ile daha uygun biçimde karşılanabileceğini göstermektedir. Yani elektrik üretiminin hibrit hale getirilmesinin güç santraline ilişkin üretim verimliliği artışı sağlamada, karbon emisyonunu azaltmakta ve yedek güç kapasitesi oluşturmada ciddi katkılar sağlayacağı sonuç değerlerle ortaya konularak literatüre de bu yönde katkı sağlanmış olacaktır. İleride oluşturulması hedeflenen karbon piyasasında gerçekleşecek olan döngüde çevreye karbon emisyonu yükselişi ile verilen zararın yenilenebilir üretim kaynağı artışı sebebi ile azaltılıyor olması çalışma sonuçlarında da ortaya konabilmiştir.

2. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Yapılan çalışmada istatistiki amaçla kullanılmak üzere veri olarak elektrik enerjisi üretimine dair katkı sunan tüm kaynaklardan faydalanılmıştır. Bu kaynaklar, Resmi İstatistik Programına (RİP) dahilinde yurt içi ve yurt dışı paydaşları olan kurumların 2021 yılı için yayınlamış olduğu 2020 yıl sonu kesinleşmiş olan veriler içerisinden alınmıştır [8]. Mevcutta yapılan bu çalışma, geriye dönük 2010 yılından başlanarak önümüzdeki 2033 yılına kadarki süreci izlemek amacıyla (brüt elektrik üretim tahmini için) kullanılmıştır.

Elektrik enerjisi kurulu güç ve üretim miktarlarının kaynak tiplerine göre 2010-2020 yılları arasında nasıl gerçekleştiğinin kıyaslaması da yapılmıştır. Ayrıca PV (fotovoltaik) ile elektrik üretim faaliyetleri de 2010-2020 yılları için yokluğu ve varlığı arasındaki farkın nasıl gerçekleştiğini gözlemlene açısından uygun bir seçim olmuştur. Santrallerin kapasite faktörleri ise kaynak tipine bağlı kalmak kaydı ile yıl içindeki elektrik üretim değerleri ve kurulu güçlerinin 8,760 saat içinde ne kadar faaliyette bulunduğu üzerine hesaplanarak tablo haline getirilmiştir [8].

Karbon emisyonları hesabında ise Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın birleşik emisyon değerleri dikkate alınmış olup kaynak tipine bağlı olarak düzenli olarak paylaşılmış veriler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Emisyona katkı değerlerinin hesaplaması; birleşik emisyon değeri ve yıllık olarak yapılan üretim değerinin çarpımı ile yapılmıştır [9].

Zaman serisi analizinde en sık kullanılan yöntem trend analizi olup bağımsız değişken zaman, bağımlı değişken öngörülmesi istenen değer olarak elektrik üretim miktarıdır. Eğilim fonksiyonu tahmini uygulaması ile geçmiş yıllara ait veriler çerçevesinde ikinci dereceden polinomal fonksiyon

yaklaşımı kullanılmıştır [10]. Polinomal fonksiyon yaklaşımı ile verilerin geriye dönük (elektrik üretim miktarlarının 2010-2020 yılları arası) eğilimi de dikkate alınması sonucu elde edilen eğilim sonucu $y = -181.41 * x^2 + 12,250 * x + 200,397$ denkleminin kullanılmasını gerektirmiştir.

Elektrik üretiminde geriye dönük trend eğilimi dikkate alınarak bu çalışmada oluşturulan fonksiyonel yaklaşımla ileriye dönük yapılan tahminde R^2 değerinin 0.9946 olduğu gözlemlendi. Elektrik üretiminde iç ihtiyaç tüketiminin payını belirlemede son on yılın (2010-2020 yılları arası) ortalaması alınmıştır [11]. 2010-2020 arası ortalaması alınan bu değere ilişkin ileriki yıllara karşılık gelen iç ihtiyaç miktarları 2023 yılına kadar belirlenmiştir. Yenilenebilir kaynak tipine göre kurulu güç karşılıkları (iç ihtiyacı karşılama anlamında); ileriye dönük belirlenmiş olan iç ihtiyaç miktarlarının seviyesine bağlı kalınarak kapasite faktörleri de dikkate alınarak belirlenmiştir.

3. TÜRKİYE'DE ELEKTRİK KURULU GÜCÜNDEKİ VE ÜRETİMİNDEKİ GELİŞİM (DEVELOPMENT IN ELECTRICITY INSTALLED CAPACITY AND PRODUCTION IN TURKEY)

Türkiye elektrik kurulu gücü; 2010-2020 yılları arası için incelendiğinde 2010 yıl sonu 49,524.05 MW'tan 2020 yıl sonu 95,890.57 MW'a yükselmiştir. PV (fotovoltaik) kurulu güç değişimi 2010 yılında hiç yokken 2020 yıl sonu %6.95 seviyelerine yükselmiştir.

Kurulu gücün 2010 yılında en büyük payı %37.19 ile doğal gaz santrallerinde iken 2020 yılında en büyük pay %32.31 ile hidrolik santrallerindedir. Yenilenebilir kurulu gücünde pozitif gelişim olduğu Tablo 1'de ifade edilmektedir.

Tablo 1. 2010-2020 Kurulu güç karşılaştırması [6] (2010-2020 Installed capacity comparison)

Kaynak Tipi	2010 (MW)	%	2020 (MW)	%
Kömür	11,978.20	24.19	19,801.15	20.65
Sıvı Yakıtlar	1,772.66	3.58	372.26	0.39
Doğal Gaz	18,420.39	37.19	26,117.46	27.24
Yenilenebilir Atık+Atık Isı	107.20	0.22	1,502.80	1.57
Hidrolik	15,831.20	31.97	30,983.90	32.31
Jeotermal	94.20	0.19	1,613.20	1.68
Rüzgar	1,320.20	2.67	8,832.40	9.21
PV	-	-	6,667.40	6.95

Toplam	49,524.05	100	95,890.57	100
---------------	-----------	-----	-----------	-----

2010-2020 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç içerisindeki payı %35'ten %51.71 seviyesine ulaşmıştır. Yenilenebilir kurulu güç içerisinde kaynak tipine göre; hidrolik, rüzgar, jeotermal, PV (fotovoltaik), biyokütle bulunmaktadır [8].

Türkiye elektrik enerjisinde üretimi; 2010-2020 yılları arasında incelendiğinde 2010 yılı sonu

211,207.73 GWh'ten 2020 yıl sonu 306,703.09 GWh olarak artış sağlayarak değişmiştir. PV (fotovoltaik) elektrik üretimi 2010 yılında hiç yokken 2020 yıl sonu %3.57 seviyelerine yükselmiştir. 2010-2020 yılları arasında kaynak tipine göre üretim sınıflandırması yaptığımızda PV (fotovoltaik) santralleri üretimi 2020 yılında 10,950.18 GWh olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 2. 2010-2020 Elektrik üretim karşılaştırması [6] (2010-2020 Electricity generation comparison)

Kaynak Tipi	2010 (MW)	%	2020 (MW)	%
Kömür	55,046.36	26.06	105,812.00	34.5
Sıvı Yakıtlar	2,180.02	1.03	322.66	0.11
Doğal Gaz	98,143.72	46.47	70,931.33	23.13
Yenilenebilir Atık+Atık Isı	457.51	0.22	5,736.63	1.87
Hidrolik	51,795.48	24.52	78,094.37	25.46
Jeotermal	668.21	0.32	10,027.70	3.27
Rüzgar	2,916.42	1.38	24,828.22	8.1
PV	-	-	10,950.18	3.57
Toplam	211,207.73	100	306,703.09	100

2010-2020 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin tüm kaynaklar içerisindeki payı 2010 yılında %26.38 olarak tespit edilmiş olup bu değer 2020 yılında %41.85 seviyelerine ulaşmıştır. Yenilenebilir kurulu güç içerisinde kaynak tipine göre; hidrolik, rüzgar, jeotermal, PV (fotovoltaik), biyokütleden oluşan toplam değer dikkate alınmıştır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı stratejik planlarında uzun dönem üretim gelişim değerleri incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretim payı %50 değerinin üzerinde olacağı açık bir şekilde gözlemlenmektedir.

Ayrıca yenilenebilir atık olarak ifade edilen kaynak tipinin içerisinde biogaz, çöp gazı, katı bio, endüstriyel atık, bitkisel atık yağ ve protolitik yağ bulunmaktadır. Atık ısı kaynak türünde ise özellikle çimento ve cam sanayi işleyişi gereği atıkları ısıları değerlendirmek için buhar türbinleri yardımı ile elektrik üretilmektedir.

4. KAPASİTE FAKTÖRÜNÜN VE İÇ İHTİYACA KARŞILIK GELEN KURULU GÜCÜN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF THE CAPACITY FACTOR AND THE INSTALLED POWER CORRESPONDING TO THE INTERNAL CONSUMPTION)

2010-2020 yılları arasında Türkiye elektrik üretiminde faaliyette bulunan güç santrallerine ilişkin olarak ihtiyaç duydukları iç ihtiyaç tüketim miktarları yıllık olarak belirlenmiştir. Her santral kendi tesisine ait olan iç ihtiyaç tüketimini yıllık toplu şekilde ilgili kurumlara (satış sözleşmesi yaptığı birimlere) bildirmektedir. Elde edilen bu değerler yılına ilişkin olarak her kaynak türüne ait belirlenmiş yıl içindeki kapasite faktörü de dikkate alınarak hidrolik, jeotermal, PV (fotovoltaik) ve rüzgar kaynak tipine göre ne kadar kurulu güçle sağlanabileceği oranlanarak hesaplanmıştır [8].

Kapasite faktörü (CF); santralin belirli zaman periyodu (bir yılda 8,760 saat) içerisindeki çalışma saatinde (t) toplam üretmiş olduğu enerji miktarının (E) santral kurulu gücüne (P) oranı şeklinde ifade edilmektedir[8].

$$CF = \frac{E}{t \cdot P} \quad (1)$$

Hesaplanmış bu kurulu güç ve kapasite faktörüne bağlı olarak kaynak tipine göre üretilmesi gereken enerji miktarları hesaplanmıştır. Daha sonra da hesaplanan bu üretim değerine bağlı olarak kaynak tipine göre karbon emisyonuna katkısı hesaplanmıştır [9].

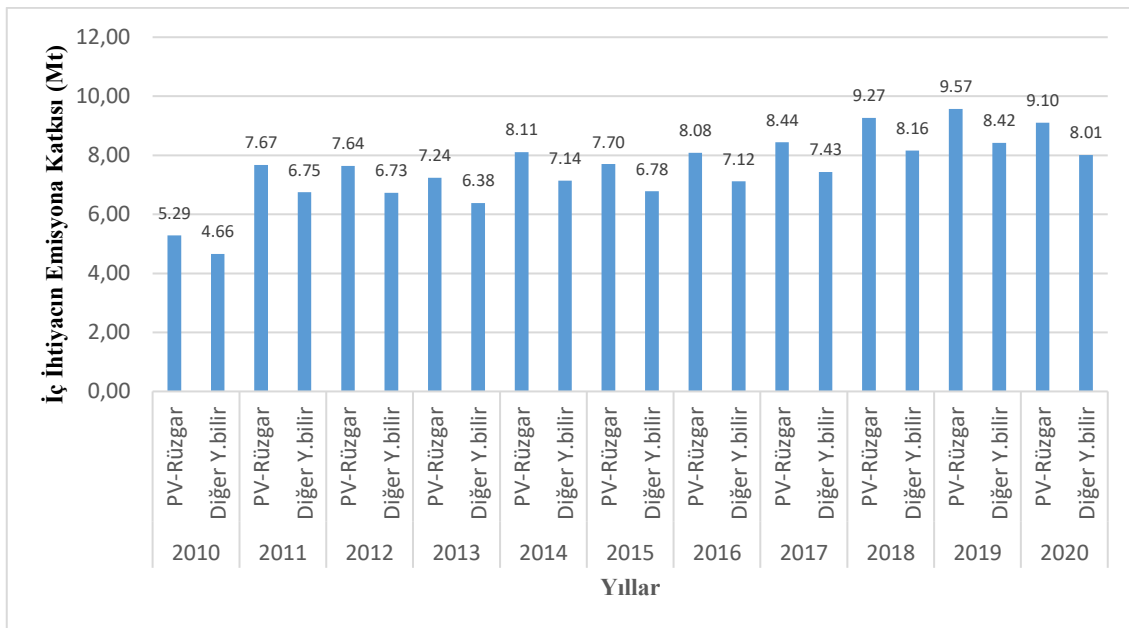
Yıl içerisinde toplam iç ihtiyaç tüketim miktarına bağlı olarak enerji üretiminin kurulu güce oranlanması ile kaynak tipine göre ortalama çalışma saatleri belirlenmiştir. Ortalama çalışma saatleri; Şekil 1’de ifade edilen biçimde olduğu gibi iç ihtiyaç tüketimini sağlayabilecek kadar elektrik üretimi PV (fotovoltaik), rüzgar ve diğer yenilenebilir üretim santralleri ile üretildiğinde emisyonu azaltıcı yönünde ne kadar katkı sağlayabileceği görselleştirilmiştir. Daha sonra da hesaplanan bu üretim değerine bağlı olarak kaynak tipine göre karbon emisyonuna azaltıcı yönde katkısı hesaplanmıştır. Hesaplama da emisyon katkısı katsayısının (Türkiye’de birleşik marj emisyon faktörü olarak) belirlenmiş olması da önem arz etmektedir. Üretim kaynak tipine göre çalışma saati de belirlenerek kapasite faktörü ile ne kadarlık kurulu güç ihtiyacı doğacağı iç ihtiyaç tüketimine karşılık kurulu güç olarak tespit edilip Şekil 2’de gösterilmektedir.

Emisyon değerlerinin hesaplamasında Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın belirlemiş olduğu; birleşik marj emisyon faktörünün hesaplanmasında mutlak surette faaliyet temelli marj ve gelişim temelli marj emisyon faktörü rakamları kullanılmaktadır. Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hesaplanan faaliyet temelli marj ve gelişim temelli marj kullanılarak PV (fotovoltaik), rüzgâr kaynaklı elektrik üretim santralleri ve diğer yenilenebilir enerji santralleri için iki farklı birleşik marj emisyon faktörü belirlenmiştir [9].

Tablo 3. Birleşik marj emisyon faktörü [9]
(Combined margin emission factor)

Faktör Türü	Yılı	Değeri (tCO ₂ /MWh)
Birleşik marj emisyon faktörü (PV ve rüzgâr)	2020	0.6488
Birleşik marj emisyon faktörü (diğer yenilenebilir)	2020	0.5552

Yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi ile sağlanacak sera gazı salım (SGS) **azaltım hesaplamalarında** kaynak türüne göre hesaplanan **birleşik marj emisyon faktörleri iç ihtiyaç tüketim miktarlarına bağlı olarak yıllara sair belirlenebilmiştir**. Şekil 1’de ise 2010-2020 iç ihtiyaç tüketiminin emisyon katkısı ifade edilmiş olup bu değer; referans değerlere bağlı kalınarak (yılına ait olan iç ihtiyaç tüketiminin birleşik marj emisyon faktörü ile çarpımının sonucunda) hesaplanmıştır.



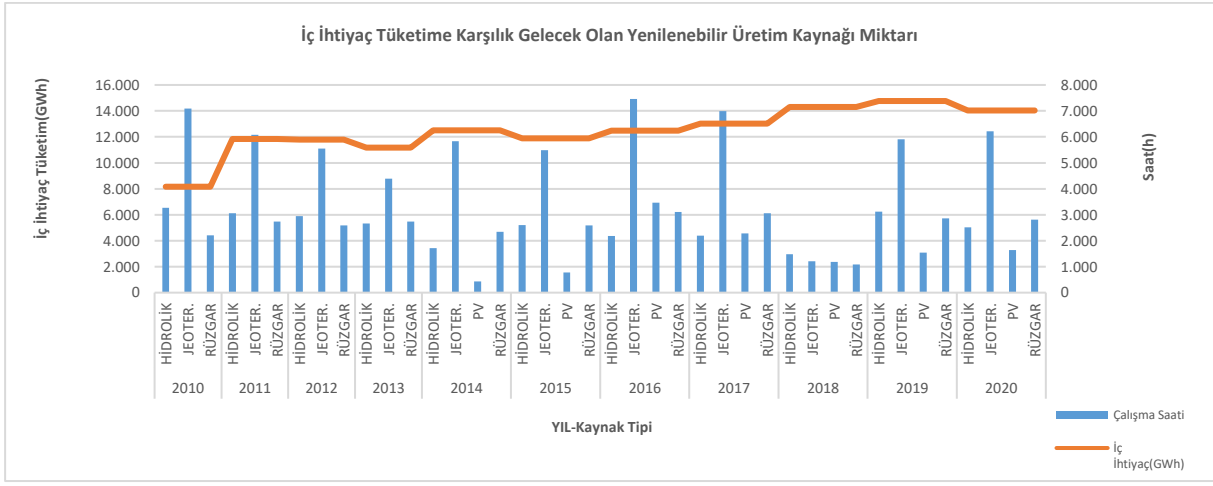
Şekil 1. 2010-2020 İç ihtiyaç tüketiminin yenilenebilir kaynak tipi üretimle karşılanmasında emisyon değerlerine azaltıcı yönde katkısı (Reducing contribution to emission values in meeting 2010-2020 domestic consumption with renewable resource type production)

Şekil 1’de ifade edilen biçimde olduğu gibi iç ihtiyaç tüketimini sağlayabilecek kadar üretimi PV (fotovoltaik), rüzgar ve diğer yenilenebilir üretim santralleri ile üretildiğinde emisyonu azaltıcı yönünde ne kadar katkı sağlayabileceği görselleştirilmiştir.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yapılan düzenlemelerle hibrit üretime ilişkin teşvik edici uygulamaların da önü açılmıştır.

Bu sebeple elektrik sisteminde kurulu güç dikkate alındığında üretimde hibritleşmeyi 2021 yılı sonunda sağlayan elektrik üretim santrallerinin olduğu saha uygulamalarında gözlemlenmiştir.

Şekil 2’de 2010 ile 2020 yılları arasında bu çalışmada tahmin yapmak amacıyla eğilim değerler ile derlenmiş brüt elektrik üretim miktarı ve üretim santrallerinin iç ihtiyaç miktarında oluşan değişim ortaya konabilmektedir.

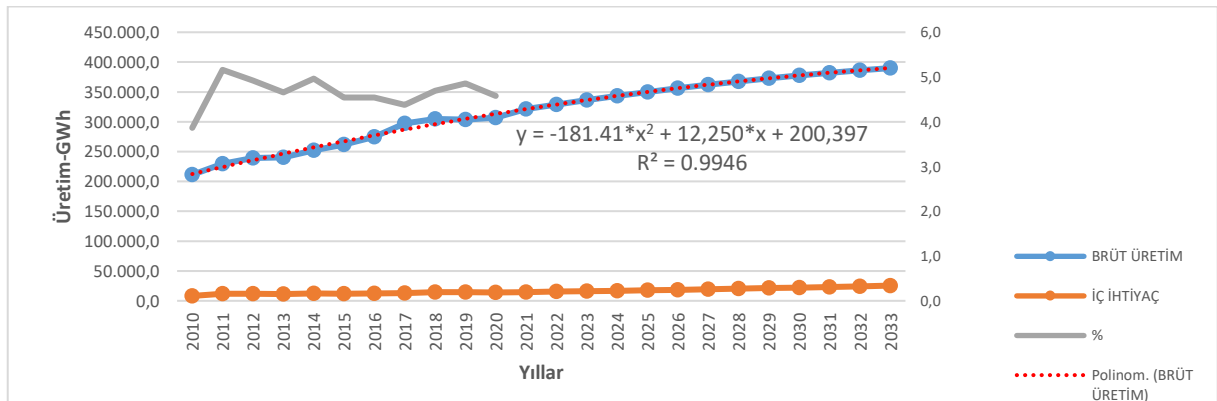


Şekil 2. 2010-2020 İç ihtiyaç tüketim değişimi (2010-2020 internal consumption change)

2010-2020 yılları arasında gerçekleşmiş olan gerçek üretim değerleri veri serisi değişim eğilimi dikkate alınarak polinomal denklem elde edilmiştir. Bu çalışmada, eğilim fonksiyonu tahminleme uygulaması ile geçmiş yıllara ait verilere göre ikinci dereceden polinomal fonksiyon yaklaşımı neticesinde elde edilerek kullanılan $y = -181.41 * x^2 + 12,250 * x + 200,397$ denklemdir. Fonksiyonel yaklaşım vasıtası ile ileriye dönük yapmış olduğumuz tahminde $R^2 = 0.9946$ olduğu Şekil 3’teki gibi gözlemlenmiştir.

R^2 “belirleme katsayısı” regresyon denkleminin başarısını ölçme yanında, denklemin “tahmin gücü”nü de yansıtır ve artıkların toplamının ortalamaların toplamına olan oranı ne kadar küçük ise R^2 değeri o kadar yüksek olacaktır ve 1’e yaklaşacaktır [13].

Fonksiyonel yaklaşımda iç ihtiyacın 2010-2020 yılları arasında ortalama olarak % 4.7 ortalama değere sahip olduğu, büyük miktarda sapmaların olmadığı gözlemlenmiş olup ortalamanın korunacağı öngörülmüştür.



Şekil 3. 2010-2033 Brüt üretim ve iç ihtiyaç değişimi (2010-2033 Gross production and internal consumption change)

PV (fotovoltaik) ve rüzgar türbinlerinin çok modüler doğasına rağmen maliyetler, tipik olarak rüzgar veya PV (fotovoltaik) çiftlikleri inşa sayısındaki artışlarla ciddi oranlarda azalma eğilimini sürdürmektedir. Kullanılan teçhizat arz miktarında oluşan artışlarla birlikte uygulama sahalarının gelişmesini karşılama yönünde pozitif artış sağlayarak kurulum maliyet miktarlarını aşağı çekecektir [14].

Elektrik üretme maliyetlerinin ana etkenleri tipik olarak inşaat, yakıt (CO₂ emisyonları için yapılan harcamalar dahil), işletme ve bakım maliyetleri. Bütün bu faktörler tipik olarak maliyetleri düşüren ölçek ekonomileri ile santral büyüklüğünden etkilenirler [15]. Tablo 4’te Dünya Enerji Konseyi (DEK) yenilenebilir enerji üretim maliyetleri rapor çalışması sonucu elde edilen maliyet değişim tablosu oluşturulmuştur.

Tablo 4. Kaynak tipine göre maliyet değişimleri [15] (Cost variations by source type)

Teknoloji	Net Kapasite (MWe)				Fiyat (USD/kWe)			
	Min	Temel	Orta	Maks	Min	Temel	Orta	Maks
Nükleer	1,000	1,000	1,000	1,000	391	504	497.00	629
Pompa HES	175	458	200	1,000	563	1,962	897	4,426
Solar PV(yüzer)	8	8	8	8	860	860	860	860
Solar PV(kamusal)	0.83	26	20	100	534	995	923	2,006
Solar PV(ticari)	0.05	0.25	0.24	0.50	846	1,065	1,085	1,357
Solar PV(konut)	0.00	0.01	0.01	0.02	719	1,583	1,653	2,597
Solar Termal(CSP)	100	125	125	150	5,238	5,857	5,857	6,475
Rüzgar (Açık deniz)	11.25	186	100	600	1,721	2,876	2,740	4,039
Rüzgar (Karasal ≥1)	1.00	58	40	280	877	1,391	1,439	3,022
Rüzgar (Karasal <1)	0.01	0.19	0.19	0.90	1,782	2,852	2,852	5,539

4.1 Maliyet Analizi (Cost Analysis)

Türkiye’ de elektrik üretim santrallerinin üretim işleyişleri kademelerinde kullanmış olduğu santral iç ihtiyaç tüketimini PV (fotovoltaik), rüzgar ve jeotermal kaynak tipi ile karşılandığında birim 1 MW kurulu güç başına sistemin kendini geri ödeme süresinin kaç yılda sağlanabileceği hesabı [7];

PV (fotovoltaik) kurulum maliyeti ilk durumda; 1 MW için yaklaşık olarak 534,000 USD kurulum maliyeti(BC) çıkmaktadır. 1 MW’lık bir sistem yıllık Dünya Enerji Konseyi (DEK) Türkiye verilerine göre %16 kapasite faktörü(CF) ile ortalama 1,400,000 kWh elektrik enerjisi (E) üretir. Elektrik alış piyasa fiyatını (MC) koşullarına göre 0.09 USD / kWh’den hesaplırsak, yıllık 126,000 USD kazanç (R) sağlar ve bu sistemin kendini geri ödeme süresi (T) ise ;

$$R = MC * 1,000 * CF * 8,760 \quad (2)$$

Kazanç R değeri için eşitlik (2);

$$R = 0.09 * 1,000 * 0.16 * 8,760$$

$$R = 126,144 \text{ (USD)}$$

$$T = \frac{BC}{R} \quad (3)$$

Sistemin kendini geri ödeme süresi T için eşitlik (3);

$$T = \frac{534,000}{126,144} = 4.23 \text{ yıl}$$

Rüzgar(onshore) enerjisi kurulum maliyeti; 1 MW gücünde %35 kapasite faktörü ile 3,066,000 kWh elektrik enerjisi (E) üretebilir bir noktada kurulan rüzgar gülüne göre hesaplamada üretilen elektriğin YEK kapsamında satılması durumunda satış bedeli 0.0713 USD /kWh ayrıca işletme maliyeti 0.01296 USD /kWh olup elektrik alış piyasa fiyatını (MC) koşullarına göre 0,05834 USD / kWh olduğu belirlenerek; kurulum maliyeti 1,750 USD/kW (yatırım bedeli ve lisans bedeli dahildir). Bu bedelin bulunmasında günümüzde 1MW ve üstü rüzgar türbinlerinde yaklaşık türbin fiyatı 1,400 USD/kW’dır. Montaj edeli ve diğer masraflar rüzgar analizi, projelendirme fiyatın %25’i olarak 350 USD/kW (toplam kurulum maliyeti 1,750 USD/kW olarak alınmıştır).

Kazanç R değeri için eşitlik (2);

$$R = 0.05834 * 1,000 * 0.35 * 8,760$$

$$R = 178,870 \text{ (USD)}$$

Sistemin kendini geri ödeme süresi T için eşitlik (3);

$$T = \frac{1,750,000}{178,870} = 9.78 \text{ yıl}$$

Jeotermal enerjisi kurulum maliyeti; ikili çevrim jeotermal santralleri en sık kullanılan türbin türüdür. 1 MW gücünde %85 kadar kapasite faktörü ile yıllık 7,446,000 kWh elektrik enerjisi (E) üretebilir bir noktada kurulan santral için üretilen elektriğin YEK kapsamında satılması durumunda satış bedeli 0.0713 USD / kWh ayrıca işletme maliyetleri 0.0129 USD / kWh olup elektrik alış piyasa fiyatını (MC) koşullarına göre 0,0584 USD / kWh olduğu belirlenerek; kurulum maliyeti 2,500 USD/kW'dır (yatırım bedeli ve lisans bedelleri dahildir.)

Kazanç R değeri için eşitlik (2);

$$R = 0.0584 * 1,000 * 0.85 * 8,760$$

$$R = 434,846 \text{ (USD)}$$

Sistemin kendini geri ödeme süresi T için eşitlik (3);

$$T = \frac{2,500,000}{434,846} = 5.75 \text{ yıl}$$

Tablo 5. Kaynak tipine göre maliyet değişimleri
(Cost variations by source type)

Kaynaklar	Maliyet(USD/MW)	Sistemin Kendini Geri Ödeme Süresi(Yıl)
PV	534,000	4.23
Rüzgar (Karasal)	1,750,000	9.78
Jeotermal	2,500,000	5.75

Yenilenebilir kaynak türleri içerisinde PV (fotovoltaik) ile yapılacak olan sistemin kendini geri ödeme süresi 4.23 yıl kadar iken diğer kaynak tiplerinde süresinin Tablo 5'te de görüldüğü gibi daha uzun olduğu görülebilmektedir.

Yapılan araştırmalarda da PV (fotovoltaik) kaynak tipinde sistemin kendini geri ödeme süresinin diğer

kaynak tiplerine göre daha kısa olduğu tespit edilmiştir [16].

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Türkiye elektrik enerjisinde 2010-2020 yılları arasında PV (fotovoltaik) kurulu gücünde ve elektrik üretiminde ciddi artışlar sağlayarak dünya standartlarında işletme koşulları oluşturup faaliyet gösterdiği istatistiki verilerde açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Kurulu güçteki artışla birlikte maliyetlerde düşüşün olduğu bunda sonuç olarak elektrik piyasasına yansımış olduğu PV (fotovoltaik) elektrik üretim artışları ile kendini göstermektedir [17].

Türkiye genelinde elektrik üretim santrallerinin iç ihtiyaç miktarları üretim içindeki payı 2010 – 2020 yılları arasında ortalama %4.7 olarak gerçekleşmiştir. Bu miktarı maliyetleri sürekli ucuzlayan PV (fotovoltaik) santralleri ile daha karbonsuz ve daha az maliyetle (534,000 USD/MW kurulum maliyeti) 4.23 yıl gibi kısa sürede (jeotermal santral için 1,750,000 USD/MW kurulum maliyeti ile 5.75 yılda, rüzgar santrali için 2,500,000 USD/MW kurulum maliyeti ile 9.78 yılda) karşılanabilirliği bu çalışmada açıkça ifade edilmiştir. İç ihtiyaç tüketiminin diğer yenilenebilir kaynak tipleri (jeotermal, rüzgar kaynak tipleri) ile karşılanması oldukça uzun süreli sistemin kendini geri ödeme süresinin olması sonucunu doğurmaktadır. Ayrıca hidrolik potansiyelin inşaa süresi uzunluğu da göz önüne alındığında elektrik üretiminde hibrit yapılaşan model projelerde PV (fotovoltaik) uygulamaları; diğer yenilenebilir uygulamalar içerisinde daha pratik hatta sisteme entegrasyonu işletme/bakım maliyetleri açısından ucuz, çevreci model olarak uygulandığı istatistiklerde görülmektedir [18]. İlerde karbon piyasası oluşturulduğunda hibrit yapıları üretimlerin ciddi anlamda emisyon değerlerine azaltıcı yönde pozitif katkı sunacağı bu çalışmada gözlemlenmektedir [19].

Gelişmiş ülkelerde yenilenebilir enerji tüketimi tahmininde lineer eğri uygulamalı gayrisafı milli hasılanın da etkisinin hesaba katıldığı çalışmada R² değerinin 0.792891 olduğu belirtilmektedir [20]. Bununla birlikte elektrik dağıtım bölgesinde tüketim üzerinden yapılan lineer eğri uygulamalı yaklaşımda R² değerinin 0.859 aynı çalışmada polinomal ikinci dereceden denklem yaklaşımında

ise R^2 değerinin 0.864 olduğu tespit edilmektedir [21].

Yapılan bu çalışmada; 2010-2020 yılları arasında Türkiye elektrik üretimindeki veriler kullanılarak ileriye dönük (2033 yılına kadar olacak şekilde) polinomal ikinci dereceden denklem yaklaşımı ile yapılan tahminde R^2 değerinin 0.9946 olduğu gözlemlenmiştir. 2021 yılı için gerçekleşen brüt üretim değeri 321,274.40 GWh (iç ihtiyaç tüketimi 14,698.90 GWh- PV ile üretilseydi emisyonu azaltıcı yönde katkısı 9.54 Mt) tahmin yaklaşımında ise brüt üretim 306,703.1 GWh (iç ihtiyaç tüketimi 14,039 GWh-PV ile üretilseydi emisyonu azaltıcı yönde katkısı 9.11 Mt) olarak ve 2022 yılı için gerçekleşen brüt üretim değeri 328,989.40 GWh (iç ihtiyaç tüketimi 15,389.70 GWh-PV ile üretilseydi emisyonu azaltıcı yönde katkısı 9.98 Mt) tahmin yaklaşımında ise brüt üretim 334,723.10 GWh (iç ihtiyaç tüketimi 15,183.10 GWh-PV ile üretilseydi emisyonu azaltıcı yönde katkısı 9.85 Mt) olarak tespit edilmiştir. İç ihtiyaç tüketim ve brüt üretim tahmini gerçekleşen değerlere oldukça yakın olmuştur arkasında yatan en büyük sebep sadece tüketim değerlerinin değil de aynı zamanda iç ihtiyacın da dikkate alınması olarak belirtilebilir. Elektrik enerjisinde tahmin ve hesaplamalar yapılırken mutlaka kayıp niteliği taşıyan, özellikle iç ihtiyaç tüketim değerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Nihai olarak; çalışmada 2033 yılı için elektrik üretiminde gerçekleşmesi beklenen brüt üretim değeri 389,909.60 GWh, bunun yanında iç ihtiyaç tüketiminin de üretimin ortalama %4.7'si ile 25,506.10 GWh olacağı tespiti yapılmıştır. Yenilenebilir kaynak türlerinden PV (fotovoltaik) ile diğer yenilenebilir kaynak türlerine kıyasla daha kısa sistemin kendini geri ödeme süresinde (4.23 yılda) karşılanabileceği tespiti yapılabilmektedir. 2033 yılı için PV (fotovoltaik) ile iç ihtiyaç tüketiminin karşılanması durumunda karbon emisyonuna azaltıcı yönde katkısı 16.55 Mt olacağı da sonuç olarak ortaya konulabilmektedir. Elektrik santrali iç ihtiyaç tüketimi enerji miktarının PV (fotovoltaik) ile karşılandığında emisyonu azaltıcı yönde katkısının yüksek olacağı tespit edilebilmektedir.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

BC : Kurulum Maliyeti
CF : Kapasite Faktörü

DEK : Dünya Enerji Konseyi
E : Enerji Miktarı
EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
MC : Piyasa Fiyatı
P : Kurulu Güç
PV : Fotovoltaik
R : Kazanç
SGS : Sera Gazı Salınımı
t : Çalışma Saati
T : Sistemin Kendini Geri Ödeme Süresi

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal- özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

İlker İLASLANER: Literatür araştırması, senaryoların oluşturulması ve analiz edilmesi ile çalışmanın yazımında rol almıştır.

He played a role in the writing of the study by conducting literature research, creating and analyzing scenarios.

Halil İbrahim VARIYENLİ: Çalışmanın kontrolü ve yayınlanma sürecinin takibinde rol almıştır.

He played a role in the control and follow-up of the study's publication process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.
There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Duman, S., Yörükeren, N., & Altaş, İ. H. (2014). Fotovoltaik Enerji Sistemlerinin Modellenmesi, Benzetimi ve Uygulaması. Düzce Üniversitesi İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 3(1), 9-23.
- [2] Kyzym, M., Khaustova, V., Shpilevskiy, V., Salashenko, T., Hrynkevych, S., & Kruchinina, O. (2023). Consistency of Trends in The Economic and Energy Development of Ukraine: Assessment and Analysis. *International Conference on Sustainable, Circular Management and Environmental*

- Engineering* (s.13)
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340801018>.
- [3] Berksoy, T., & Akdoğan, D. A. (2018). Yenilenebilir Enerjide Kamu Politikaları ve Türkiye. *Ratingacademy*, 19-42.
- [4] Economic and Social Commission for Asia and the Pasific. (2011). "Hybrid energy system". Bangkok: ESCAP.
- [5] Kurumu, E. P. (2014, 05 28). Elektrik Şebeke Yönetmeliği. *Elektrik Şebeke Yönetmeliği*. Ankara, Ankara, TR: EPDK.
- [6] TEİAŞ (2021). <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- [7] Kurt, M. B., & Ertuğrul, Ö. F. (2009). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Maliyet Analizi ve Sürdürülebilir YEK Uygulamaları. V. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu* (s. 37-41). Diyarbakır: EMO.
- [8] IAEA. (1980). *Expansion Planning for Electrical Generation Systems*. Vienna: IAEA.
- [9] ETKB. (2023). <https://enerji.gov.tr>. ETKB.
- [10] Akgül, I. (1994). Zaman Serisi Analizi Ve Öngörü Modelleri. *Öneri Dergisi*, 1(1), 52-69. <https://doi.org/10.14783/maruoneri>.
- [11] Yüceci, S. M. (2013). Sismik Tehlikenin Tahmini: Olasılık ve İstatistik Yöntemler. *İstatistik Araştırma Dergisi-Journal of Statistical Research*, 42-27.
- [12] Kaya, M. (2009). Birleşik Isı-Güç Santralının Enerji Üretimi ve Maliyet Açısından İncelenmesi. *C.B. Üniversitesi SMY Teknik Bilimler Dergisi*. www.researchgate.net/publication/344540751.
- [13] Günel, A. (2003). Regresyon Denklemine Başarısını Ölçmede Kullanılan Belirleme Katsayısı ve Kritiği . *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 133-140.
- [14] Eryılmaz, F. (2022, Mayıs). *Kriter Dergi*. <https://kriterdergi.com/dosya-enerjide-donusum/yuksek-kurulum-maliyetinden-dusuk-kullanim-maliyetine-evrilen-yeni-nis-yenilenebilir-enerji>.
- [15] World Energy Council. (2021). *2020 Yenilenebilir Enerji Üretim Maliyetleri Raporu Özeti*. Dünya Enerji Konseyi Türkiye.
- [16] Güven, A. F. (2017). Bahçelievler Belediye Başkanlık Binasının Enerji İhtiyacının Güneş ve Rüzgar Sistemi ile Karşılınması, Optimizasyonu ve Maliyet Analizi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 24-36.
- [17] Özbay, H., & Karafıl, A. (2019). Bilecik İli için Güneş Enerji Santrali Maliyet Analizi. *BŞEÜ Fen Bilimleri (Özbay & Karafıl, 2019) Dergisi*, e-ISSN: 2458-7575 (<http://dergipark.gov.tr/bseufbd>).
- [18] Mandi, R. P., & Yaragatti, U. R. (2013). Optimal Hybridization of Renewable Energy Systems to Improve Energy Efficiency. *The Journal of CPRI*, 521-532.
- [19] Ding, J. J., & Buckeridge, J. S. (2000). Design Considerations for a Sustainable Hybrid Energy System. *IPENZ Transactions*, 1-5.
- [20] Hadi, D., & Varedi, S. (2018). Assessment of the contemporaneous impacts of gross domestic product and renewable energy consumption, applying the dynamic panel data: Evidence from developed countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 159-166.
- [21] Alkan, Ö., Genç, A., Oktay, E., & Çelik, A. K. (2013). Electricity Consumption Analysis Using Spline Regression Models: The Case of a Turkish Province. *Asian Social Science*, 231-240.