



Güneş enerjisinin İç Anadolu bölgesinde kullanılabilirliği ve sistem analizi

Usability and system analysis of solar energy in the Central Anatolia region

Müjdat Öztürk^{1,*} , Ramazan Kayabaşı² 

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kaman Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

² Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 38900, Kayseri, Türkiye

Öz

Güneş enerjisinden maksimum elektrik üretimi için kurulumların ışınım şiddeti, berraklık indeksi, güneşli gün sayısı ve güneşlenme süresi yüksek illere yapılması oldukça önemlidir. Yapılan bu çalışmada, İç Anadolu Bölgesinde bulunan illerin güneş enerji potansiyeli ve güneş enerjisinden elektrik enerjisi olarak yararlanma potansiyeli araştırılmıştır. Half-cut PV panel kullanılan sistemin Ankara ve Konya iklim şartlarında TRNSYS programı ile modellenmesi yapılmıştır. Modellemesi yapılan iller ile diğer illerin potansiyelleri ve enerji üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Güneş enerjisinden Ankara ve Konya illerinin yıllık elektrik üretim değerleri sırasıyla 558 ve 584 kW'tır. En yüksek ışınım şiddeti 1660 kWh/m²-yıl, en yüksek güneşlenme süresi 3007 saat/yıl ve 0.54 ile en yüksek berraklık indeksine Karaman sahiptir. Konya'da bütün aylarda Ankara'dan daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan analizlerde Karaman ve Konya yatırım yapılabilirlik düzeyi en yüksek olan şehirlerdir. Karaman güneş enerjisi bakımından en avantajlı il durumunda olmasına rağmen Konya ili en yüksek kurulu güç oranına sahiptir.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, Güneş enerji santrali, İç Anadolu Bölgesi Güneş enerji potansiyeli, Berraklık indeksi, PV modelleme

1 Giriş

Enerji ve enerji kaynakları tüm dünyada önemi korumakta ve teknolojinin değişimi ve gelişimiyle birlikte enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle teknolojik olarak gelişmiş olan ülkeler daha fazla enerji altyapısına sahip ve enerji kaynaklarını daha verimli kullanmaktadır. Var olan kaynakların kullanılmaması bu kaynaklara sahip ülkeler için dış tehditlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle enerji kaynakları üzerine araştırmaların desteklenmesi ve enerji kaynaklarını verimli şekilde işletebilecek tesislerin kurulması önem olduğu kadar bağımsızlığında bir göstergesidir.

Elektrik enerjisi tüm enerji türlerine kolaylıkla dönüştürülebilir nihai ürün olduğu için teknolojik altyapının temel kaynağıdır. Bu nedenle elektrik enerjisi üretiminde kullanılan tüm enerji kaynaklarının verimli kullanılması ve işletilmesi son yıllarda araştırmaların odağında yer almaktadır [1]. Günümüzde artan nüfusun enerji ihtiyacı ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak artan enerji taleplerini

Abstract

For maximum electricity generation from solar energy, it is very important that the installations are made in cities with high radiation intensity, clearness index, number of sunny days and sunshine duration. In this study, the solar energy potential of the cities in the Central Anatolia Region and the potential to benefit from solar energy as electrical energy were investigated. The system using half-cut PV panels was modeled with TRNSYS program in Ankara and Konya climate conditions. The potentials and energy production values of the modeled cities and other cities were compared. Annual electricity generation values of Ankara and Konya cities from solar energy are 558 and 584 kW, respectively. Karaman has the highest radiation intensity of 1660 kWh/m²-year, the highest sunshine duration of 3007 hours/year and the highest clearness index of 0.54. Higher results were obtained in Konya than Ankara in all months. In the analyzes made, Karaman and Konya are the cities with the highest investment level. Although Karaman is the most advantageous city in terms of solar energy, Konya has the highest installed power ratio.

Keywords: Renewable energy sources, Solar power plant, Central Anatolia Region Solar energy potential, Clearness index, PV modelling

karşılama için artan fosil yakıtlarının kullanımı birçok çevresel sorunu beraberinde getirmektedir. Küresel ısınma ve iklim değişikliği nedeniyle sadece bölgesel değil tüm insanlık çevre sorunları ile karşı karşıya kalmaktadır. Fosil yakıtlardan kaynaklı oluşan hava kirliliği, sera etkisinin oluşmasına neden olmakta ve zararlı salınımlar nedeniyle asit yağmurları canlı yaşamını olumsuz etkilemektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları yüksek potansiyelle sahip olmasına rağmen dünyanın her yerinde enerji üretim süreçlerinde henüz yeterli kurulumla sahip olmaması, fosil kaynakların hakimiyetini sürdürmesini sağlamaktadır. Son yıllarda artan yenilenebilir enerji yatırımları ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi yüksek bir artış sağlamasına rağmen nüfus artışı ve refah artışına bağlı olarak, toplam üretilen enerji içindeki payı istenilen orana yükselmemiştir. Güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretimi son yıllarda yaygın olarak şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız olarak kurulmakta ve PV maliyetlerinin düşmesi ile yaygınlaşmaktadır [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mujdat.ozturk@ahievran.edu.tr (M. Öztürk)

Geliş / Received: 06.06.2023 Kabul / Accepted: 18.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1310627

Güneşlenme süresi, ışınım şiddeti ve berraklık indeksi gibi parametreler PV panellerin enerji üretimini etkilemektedir [3-5]. Güneş enerjisi potansiyeliyle ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Maham ve Akarslan yapmış oldukları çalışmada Mardin ilinin berraklık indeksi değerini tahmin etmek için YSA, NARX ağları ve Ridge regresyon yöntemleri kullanarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır [6]. Elibol vd. yapmış oldukları çalışmada üç farklı PV panel tipinin standart test koşullarındaki değerleri ile dış ortamdaki değerleri karşılaştırmıştır. Ayrıca PV panel tipleri, ortam sıcaklığı, panel sıcaklığı ve radyasyon miktarının verimlilik ve performans etkilerini istatistiksel olarak analiz etmişlerdir [7]. Kaynar vd. Amasya ilinin Karadeniz Bölgesinin en fazla güneş alan illerinden biri olması sebebi ile güneş enerjisi potansiyelini araştırmışlardır. Bu bölgede kurulması düşünülen güneş enerjisi sistemlerin daha verimli hale getirilmesi enerji üretimini artırarak ülkemize katkı sağlayacağını ifade etmişlerdir [8]. Çiftçi ve Altundağ yapmış oldukları çalışmada, Burdur ilinin güneş enerjisi potansiyelini ve elektrik üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan araştırmalar sonucunda güneş enerji santralleri için uygun bölgeler tespit edilmiş ve kurulacak olan yeni santraller için trafo merkezlerinin kapasitelerinin artırılması gerektiğini ifade etmişlerdir [9]. Kılıç vd. güneş enerjisi potansiyeli olarak iyi bir konumda olan, Diyarbakır ilinin güneşlenme süreleri ve ışınım değerlerini ölçerek ilin enerji üretimi bakımından uygunluğunu araştırmışlar ve yatırım yapılabilirliğinin uygun olduğunu savunmuşlardır [10]. Aksungur vd. güneş enerjisi potansiyelini Türkiye ve Dünya perspektifinden değerlendirmişler ve güneş ışınımı bakımından büyük farklar olmadığını Türkiye'nin tüm bölgelerinde güneş enerjisinin kullanılabilirliğini savunmuşlardır [11]. Ertuğrul ve Kurt Güneydoğu Anadolu Bölgesinin yenilenebilir enerji potansiyelini incelemişlerdir. Bölgede güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olması ve çevreye olumsuz etkisinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından daha az olması sebebi ile daha avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir [12]. Öztürk vd. TRNSYS simülasyon programı ile kapsamlı bir PV/T sisteminin enerji, ekserji ve ekonomik analizini yapmışlardır [13]. İşler ve Salihmuhsin yapmış oldukları çalışmada şebekeden bağımsız bir PV sistemini TRNSYS ile modellemişlerdir. TRNSYS sonuçlarının gerçek sonuçlar ile karşılaştırıldığında doğruluk payının yüksek olduğunu ifade etmişlerdir [14].

Yapılan bu çalışmada Türkiye'nin ortasında ve güneş enerjisi potansiyeli bakımında oldukça avantajlı bir konumda olan İç Anadolu Bölgesi'nin güneş enerjisi potansiyeli, kurulu güneş enerji santralleri ve half-cut PV sisteminin TRNSYS ile analizi yapılmıştır. Gerçek hava verileri kullanılarak TRNSYS simülasyon programı ile half-cut monokristal bir PV panel sistemi modellenmiştir. Modellenen bu sistemin bir yıllık enerji üretim değerleri TRNSYS programı ile elde edilerek sonuçlar iller bazında karşılaştırılmıştır. Ayrıca illerin berraklık indeksi değerleri yeni ölçümler ile analiz edilerek illerin güneş enerjisi potansiyellerine göre kurulu güç oranlarının yeterlilikleri ve ticari olarak yatırım yapılması uygun iller belirlenmiştir.

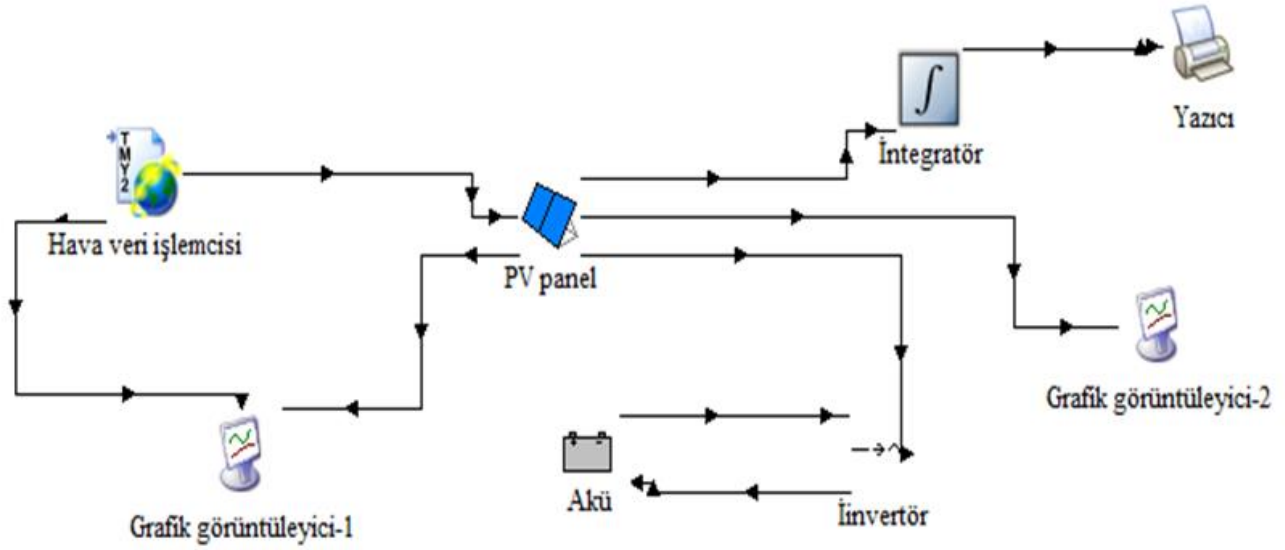
Literatürde iller bazında yapılan çalışmalar bölgenin tamamı hakkında fikir vermektense uzak olmakla birlikte bölgede bulunan tüm iller için ayrıntılı araştırmalar yapılmamış ve berraklık indeksi hesaplanmamıştır. Bu kapsamda iller bazında yapılan çalışmalardan farklı olarak çalışmamız bölge bazında yapılmış ve tüm illerin berraklık indeksi hesaplanmıştır. Ayrıca TRNSYS programı içerisinde bulunan Ankara ve Konya ili için simülasyon programı çalıştırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Meteoroloji ve Enerji Bakanlığı verileri ile tek bir çalışmada bölgenin potansiyeli ve simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak literatüre kazandırılmıştır. Bölgenin Türkiye'de bulunan bölgelerin ortalaması üzerinde güneş radyasyonuna sahip olması ve bölgenin coğrafi yapısının uygunluğu güneş enerjisi yatırımlarının yapılmasına fırsat oluşturmada ve çalışmamızın temelini oluşturmaktadır.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada İç Anadolu Bölgesinde bulunan 13 ilin güneş enerji potansiyelleri analiz edilmiştir. Güneş potansiyeli ve sanayi olarak gelişmişlik düzeyleri göz önüne alınarak seçilen Ankara ve Konya illeri iklim şartlarında 550 W değerinde half-cut PV sistemi TRNSYS programı ile modellenmiştir. İç Anadolu bölgesinde bulunan diğer illerin TRNSYS programında yer almaması nedeni ile modellemede Ankara ve Konya kullanılmıştır. Modellenen half-cut PV sisteminin her iki il için bir yıllık elektrik üretim değerleri TRNSYS simülasyon programı çalıştırılarak elde edilmiştir.

İllerde bulunan kurulu güç ile nüfus ve kurulu güç ile illerin güneş enerjisi potansiyelleri karşılaştırılmıştır. Bölgede bulunan illerin berraklık indeksleri yeni ölçümler ile hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan half-cut güneş panelleri gölgelenme sorununa bir çözüm olarak geliştirilen PV panellerdir. Half-cut PV paneller standart panellere göre çoklu hücreli yapıdadır. Half-cut PV panellerinin öne çıkan özelliği gölge sorununa çözüm bulmaktır. Standart PV panellerde bir sırada tek bir hücre gölgelendiği zaman tüm sıranın elektrik üretimi durmaktadır. Böylece panelden elde edilen elektrik üretimi azalmaktadır. Half-cut paneller bu soruna bir çözüm olarak geliştirilmiştir. Gölgeleme durumunda tüm sıranın elektrik üretimi durmadığı için daha yüksek enerji çıkışı olmakta ve daha az verim kaybı oluşmaktadır [15].

TRNSYS simülasyon programı geniş bir bileşen kütüphanesi ve grafiksel bir ara yüz ile yenilenebilir enerji uygulamaları ve birçok enerji sisteminin analiz edilebildiği ve yaygın olarak akademik çalışmalarda kullanılan bir simülasyon programdır [16]. Şekil 1'de PV sisteminin TRNSYS modeli verilmiştir. Sistem hava veri işlemcisi, PV panel, akü, invertör, integratör, yazıcı ve grafik dönüştürücü bileşenlerinden oluşmaktadır. Sistemde seçilen tüm bileşenler 550W PV panel özellikleri referans alınarak seçilmiştir. PV sisteminin elektrik üretim değerleri Ankara ve Konya için aylık olarak bir yıl boyunca elde edilerek analiz edilmiştir. Günlük elde edilen veriler mevsim koşullarından etkilenmediği için tüm yılın simülasyonu TRNSYS simülasyon programı ile yapılarak yılın dört mevsim koşullarına göre sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 1. Half-cut PV sisteminin TRNSYS modeli

PV panel 550 W gücünde yaklaşık 2.58 m² boyutunda ve %21.28 oranında verime sahiptir. Half-cut PV panelin diğer özellikleri detaylı olarak Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Half-cut PV panel özellikleri

Özellikler	Değerler
Tipi/Hücre Oryantasyonu	Monokristal / 144 hücre
Maksimum Güç (Wp)	550 W
Güç Toleransı	ile +5
Açık Devre Voltajı (Voc)	50.35 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	13.11 A
Yükteki Maksimum Voltaj (Vpm)	41.96 V
Yükteki Maksimum Akım (Imp)	13.83 A
Maksimum Sistem Voltajı	1500 V
Modül Verimi	% 21.28
Boyutlar	(2279x1134x35) mm
Ağırlık / Bağlantı	28 kg / IP68
Sıcaklık Katsayısı Pmax	-0.35/°C
Sıcaklık Katsayısı Voc	-0.28/°C
Sıcaklık Katsayısı Isc	+0.048/°C

Direkt ve yayılı ışınım değerlerinin belirlenmesi berraklık indeksi değerlerine göre hesaplanabilir. İncelenen illerin aylık ortalama berraklık indeksi değerlerini hesaplamak için Denklem (1) kullanılmıştır [13].

$$K_T = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

Burada I (kW/m²-gün) yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışınım şiddetinin aylık ortalama değeri ve I₀ (kW/m²-gün) atmosfer dışından gelen günlük toplam güneş ışınım değeri olup ve Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_0 = \frac{24}{\pi} I_{gs} \cdot f(\cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\omega + \frac{\pi}{180} \cdot \omega \cdot \sin\delta \cdot \sin\phi) \quad (2)$$

Denklemden kullanılan I_{gs} güneş sabiti (I_{gs} = 1.367 kW/m²), φ seçilen şehrin enlemi, f güneş sabitini düzeltme faktörü, δ denklasyon açısı ve ω gün batımı saat açısıdır.

$$f = 1 + 0.0333 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \quad (3)$$

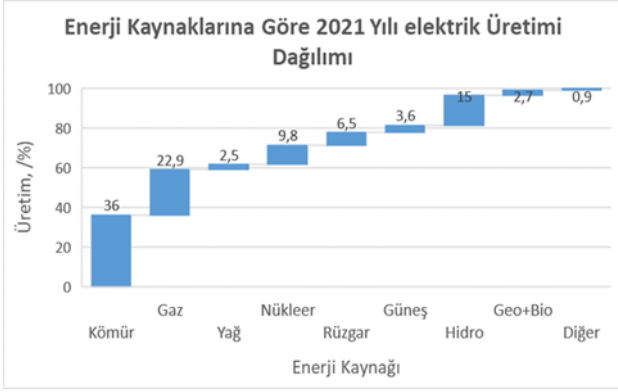
$$\omega = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (4)$$

Burada n, yılın gün sayısıdır.

$$\delta = 23.45^\circ \left[\sin \left(\frac{360 \cdot (n + 284)}{365} \right) \right] \quad (5)$$

2.1 Dünyada enerji üretimi

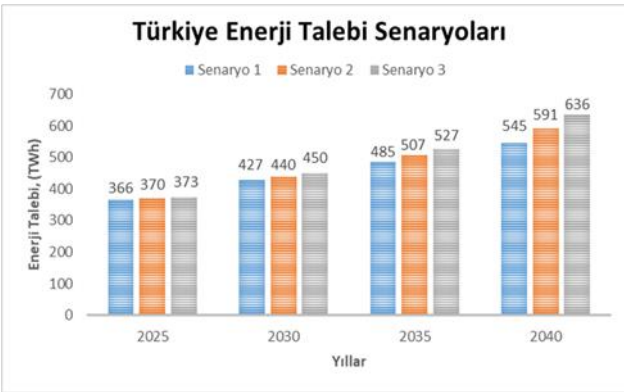
Artan enerji ihtiyacı ve çevresel sorunlara bağlı olarak yenilenebilir güç santrallerinin kurulumları artarak devam etmektedir. Fakat mevcut durum incelendiğinde dünyada fosil kaynaklı yakıtların yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Çevreci olmamalarına rağmen enerji krizleri karşısında fosil yakıtlı güç santralleri aktif hale getirilmektedir. Bu durum artan çevre sorunlarını etkilemesi sonucu olarak küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi tüm dünyayı tehdit eden sorunlara yol açmaktadır. Dünyada Şekil 2’de görülen 2021 yılı elektrik enerjisi üretim verilerine göre; üretilen elektrik enerjisinin %36’sı kömür ve %22.9’u doğalgaz gibi fosil yakıtlardan elde edilmiş, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim ise %23.9 oranında gerçekleşmiştir [17].



Şekil 2. Dünyada elektrik üretiminin enerji kaynaklarına göre yaklaşık olarak dağılımı [17]

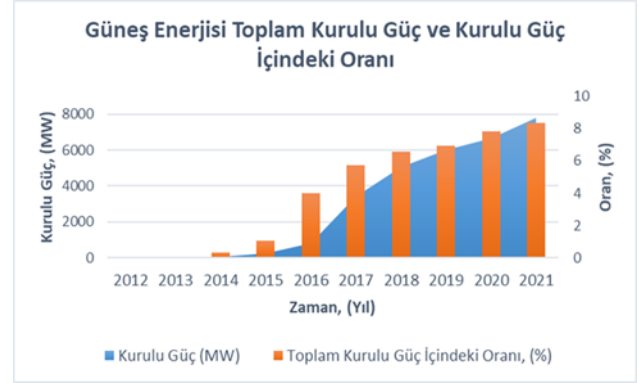
2.2 Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli

Türkiye gelişmeye devam eden ve yıllara bağlı olarak enerji talepleri artan bir ülkedir. Bu nedenle yıllar içerisinde enerji taleplerini karşılamak için önemli araştırmalar yürütülmekle birlikte önemli enerji yatırımları da yapılmaktadır [18]. Şekil 3'te 2025 yılında 366 TWh olarak tahmin edilen elektrik talebi önümüzdeki 15 yıllık dönemde de artış göstermektedir. Tüm senaryolara göre, yıllık ortalama %2.9 ile %3.7 arasındaki artış göstereceği öngörülmektedir. Referans senaryo olan senaryo 2'ye göre beklenen talep artışı %3.4 ve elektrik talebi 591 TWh'tir.



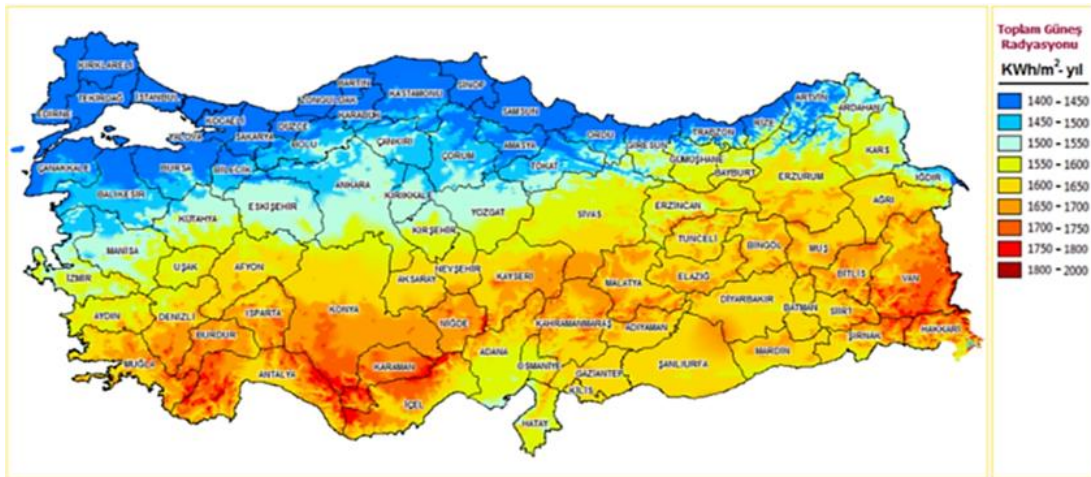
Şekil 3. Türkiye'nin elektrik enerjisi talep senaryosu [19]

Türkiye'de 2012 yılı öncesi güneş enerji yatırımları neredeyse yok denecek kadar az ve küçük ölçekli iken yıllara bağlı olarak artış göstermiş ve ülke genelinde 2021 yılında toplam enerji üretimindeki payı %8'in üzerine çıkmıştır. Son yıllarda toplam elektrik üretimi sürekli artmıştır. Şekil 4'te verilen değerlere göre 2020 yılında toplam kurulu güç 6667 MW iken 2022 yılında %17 artarak 7816 MW olmuştur.



Şekil 4. Türkiye'de güneş enerji santrallerinin kurulu gücü ve kurulu güç içerisindeki oranları [19]

Türkiye'nin coğrafi konumu ve özellikler incelendiğinde güneş enerjisi potansiyeli bakımından birçok ülkeye göre oldukça avantajlı durumdadır [20]. Güneş enerjisi teknolojilerinin giderek artması ve PV panellerinin verimliliklerindeki artış ülkemizde bu alanda yatırımların artmasını sağlamıştır. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında bulunabilirlik, kullanılabilirlik ve ekonomik olması sebebi ile en çok rağbet gören kaynak olma özelliğini taşımaktadır. Ülkemizin sahip olduğu güneş potansiyelinin Şekil 5'te Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlasında iller bazında görülmektedir. Bu potansiyelin daha etkin kullanılabilmesi için kurulu santrallerin ve kurulabilecek santrallerin detaylı analizini yapmak fayda sağlayacaktır. Güneş enerjisi potansiyelinin güneye inildikçe arttığı görülmektedir. Ülkemizin güneş enerjisi global radyasyon değeri 1400-2000 kWh/m²-yıl arasında değişmektedir [21].



Şekil 5. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA) [21]

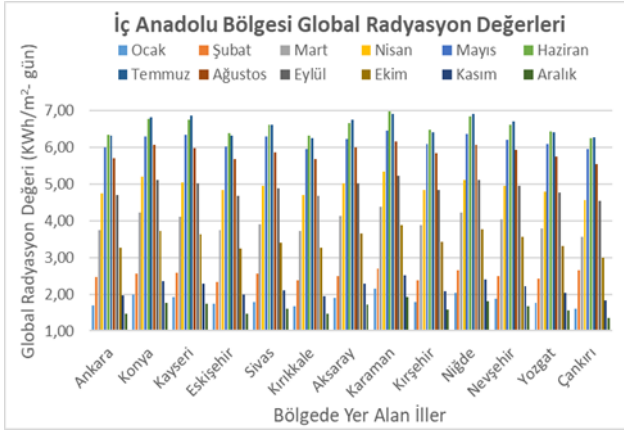
Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli Tablo 2'de görüldüğü üzere Güneydoğu Anadolu Bölgesi en yüksek değere sahipken Karadeniz Bölgesi en düşük değere sahiptir. İç Anadolu Bölgesi bölgeler içerisinde dördüncü sırada yer almaktadır ve bu değer bile Avrupa ortalamasının çok üstünde bir potansiyel demektir.

Tablo 2. Türkiye'nin bölgelerinin ışıma şiddetleri ve güneşlenme süreleri [21]

Türkiye'nin Bölgeleri	İşınım Şiddeti (kWh/m ² -yıl)	Güneşlenme Süreleri (saat/yıl)
Güneydoğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

2.3 İç Anadolu bölgesinin güneş enerjisi potansiyeli

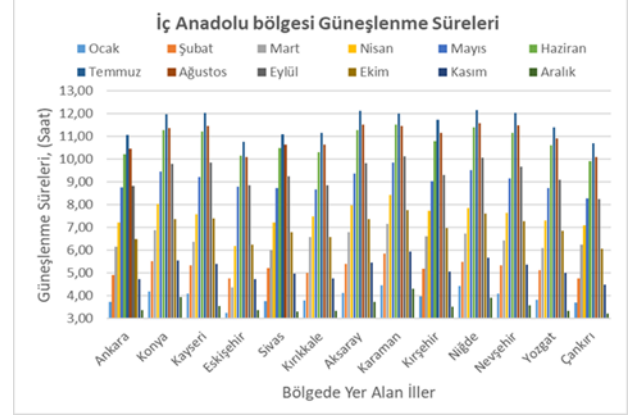
İç Anadolu Bölgesi Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli bakımından dördüncü bölgesidir. Bu potansiyelin son yıllarda yapılan yatırımlar ile değerlendirilmesi, bölgenin kalkınması ve yenilenebilir enerji alanında istihdam sağlaması açısından oldukça önemlidir. Türkiye'nin ortalama global radyasyon değeri Haziran ve Aralık aylarında sırası ile 6.57 ve 1.59 kWh/m²-gün olarak Şekil 6'da verilmiştir. Bu veriler, ülkemizi güneş enerjisi alanında ticari yatırımlar için oldukça cazip hale getirmektedir.



Şekil 6. İç Anadolu global radyasyon değerleri [21]

Bölgede yer alan illerin aylık ortalama günlük güneşlenme süreleri saatlik olarak Şekil 7'de verilmiştir. Ülkemizde güneşlenme süresi maksimum 11.31 saat ile Temmuz ayında ve minimum 3.75 saat ile Aralık ayındadır. Aylık olarak günlük ortalama güneşlenme süresi 7.49 saat/gün ve yıllık ortalama güneşlenme süresi 2736 saat/yıl olarak hesaplanmıştır. Bölgedeki iller açısından güneşlenme süresi değerlendirildiğinde bölgenin güneyinde kalan Kayseri, Aksaray, Niğde, Karaman ve Nevşehir Temmuz

ayında ortalama 12 saatin üzerinde güneşlenme süresine sahiptir. İç Anadolu Bölgesinde ışıma şiddeti en yüksek Karaman 1660 kWh/m²-yıl ve en düşük Çankırı 1432 kWh/m²-yıl değerindedir. Güneşlenme süresi en yüksek Karaman 3007 saat/yıl ve en düşük Eskişehir 2479 saat/yıl değerindedir [21].



Şekil 7. İç Anadolu Bölgesi illeri aylık ortalama güneşlenme süreleri [21]

2.4 Türkiye'nin elektrik üretimi

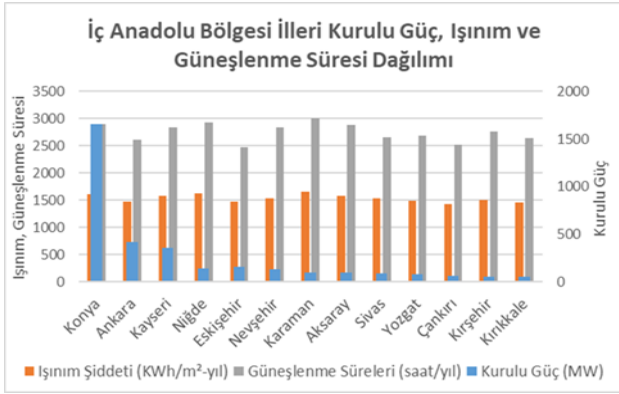
Nüfus artışı ve insanlığın konfor artışı, dünya enerji ihtiyacını sürekli olarak artırmaktadır. Türkiye'nin kalkınmasına bağlı olarak enerji talebi hızlı bir artış göstermektedir. Artan talebi karşılamak için büyük ölçüde fosil yakıt ve son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Son yıllarda Türkiye'nin enerji politikası, ithal yakıt miktarını azaltmak üzerine kuruludur. Bu kapsamda gelecekte rüzgâr ve güneş enerjisi, fosil yakıt miktarını azaltmada önemli bir rol oynayacaktır [22]. 2022 yılında Türkiye'de elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş, rüzgâr, hidrolik ve jeotermal enerjiden sırasıyla %4.7, %10.8, %20.6 ve %3.3 olarak elde edilmiştir. Fosil kaynaklar olan kömür ve doğalgazdan sırasıyla %34.6 ve %22.2 olarak elde edilmiştir. %3.7'si ise diğer kaynaklardan elde edilmiştir. 2023 yılı Şubat ayı sonu itibarıyla elektrik üretimi güneş, rüzgâr, hidrolik ve jeotermal, kömür, doğalgaz ve diğer enerji kaynaklarından sırasıyla %9.3, %11, %30.3, %1.6, %20.9, %24.4 ve %2.5 olarak elde edilmiştir [23].

3 Bulgular

Bu çalışmada İç Anadolu Bölgesinde bulunan 13 ilin güneş enerji potansiyelleri ve kurulu güç santralleri incelenmiştir. Güneş enerji potansiyellerinin yüksek olması ve sanayi gelişmişlikleri göz önünde bulundurularak seçilen Ankara ve Konya illeri iklim şartlarında TRNSYS programı ile 550 W değerinde half-cut PV sistemi modellenmiştir.

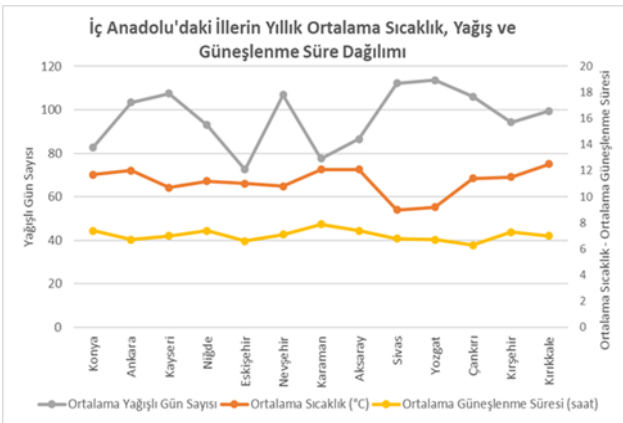
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın enerji istatistikleri incelenerek hazırlanan illere göre ışıma şiddeti, güneşlenme süreleri ve güneş enerji santralleri verileri Şekil 8'de verilmiş olup güneşlenme süresi bölge ortalaması yıllık 2628 saattir. Konya, Kayseri, Niğde, Nevşehir, Karaman, Aksaray ve Kırşehir bu ortalamasının üstünde bir değere sahiptir. Güneşlenme süresi açısından Karaman 3007 saat ile

en yüksek değere sahiptir. Yıllık toplam ışıınım şiddeti değerinin bölge ortalaması 1314 kWh/m²-yıl değerindedir. Konya, Kayseri, Niğde, Nevşehir, Karaman, Aksaray, bu ortalamanın üstünde ışıınım şiddeti değerine sahiptir. Karaman ışıınım şiddeti 1660 kWh/m²-yıl ile en yüksek ışıınıma sahip ildir. İç Anadolu Bölgesinin güneş enerjisi santrallerinin kurulu güç ortalaması 261.77 MW'tır. Konya, Ankara ve Kayseri ortalamanın üstünde kurulu güce sahiptir. Diğer iller ortalaması bölge ortalamasının altında kalmaktadır. En yüksek kurulu güç ile Konya 1652.19 MW güç ile bölge sıralamasında ilk sırada, Kırıkkale 53 MW kurulu güç ile son sırada yer almaktadır.



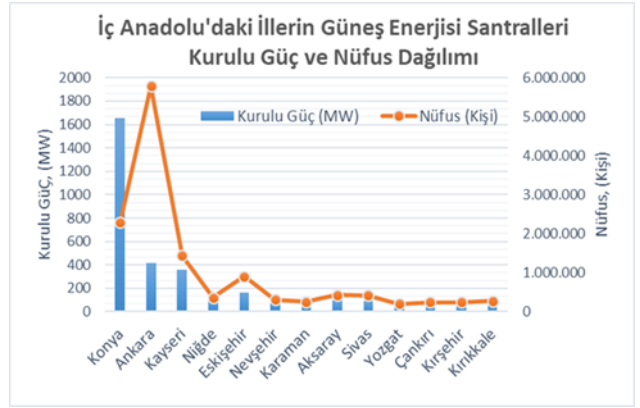
Şekil 8. İllere göre ışıınım şiddeti, güneşlenme süreleri ve güneş enerji santralleri [21]

İç Anadolu Bölgesinde bulunan illerin yıllık ortalama sıcaklık, yağışlı gün sayısı ve güneşlenme süreleri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü istatistiklerinden elde edilerek Şekil 9'da verilmiştir. İllerin yıllık ortalama sıcaklık değeri Konya 11,7 °C, Ankara 12 °C ve Kayseri 10,7 °C'dir. Yıllık yağışlı gün sayısı ortalaması Konya 82,8 gün, Ankara 103,3 gün ve Kayseri 107,4 gündür. İllerin günlük ortalama güneşlenme gün sayısı Konya 7,4 saat, Ankara 6,7 saat ve Kayseri 7 saattir. İllerin ortalama güneşlenme süresi doğrudan PV panel yüzeyine gelen ışıınım süresini etkilemesi nedeniyle önem oluşturmakta ve elektrik üretimini etkilemektedir. Bu nedenle bölgede bulunan tüm illerin verileri grafik haline getirilerek potansiyelleri açıklanmıştır.



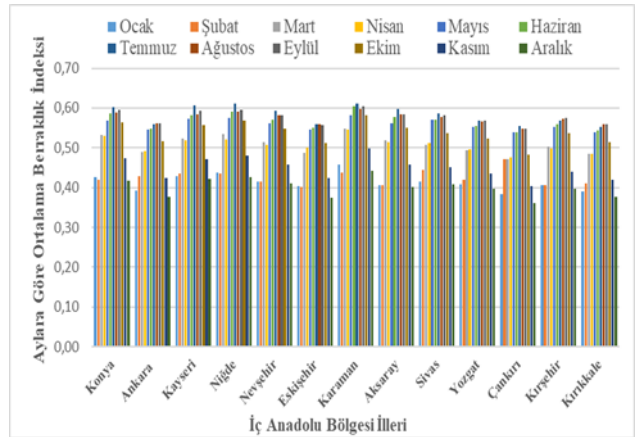
Şekil 9. İllerin yıllık ortalama yağışlı gün sayısı, sıcaklık ve güneşlenme süreleri [24]

İç Anadolu Bölgesinin nüfus oranı en fazla iller sırasıyla Ankara, Konya ve Kayseri'dir. İllerin kurulu güç sıralaması yüksekten düşüğe doğru sırasıyla Konya, Ankara ve Kayseri'dir. Şekil 10'da görüldüğü gibi Konya dışındaki iller kurulu güç dağılımı bakımından nüfus ile paralellik oluşturmaktadır. Nüfus yoğunluğu fazla olan illerde enerji tüketimi arttığı gibi sanayileşme ve kentleşmede artmaktadır. Ayrıca bu iller yüzölçümü olarak bölgede yer alan diğer illere göre daha büyük yüz ölçümüne sahiptir. Konya 40.838 km², Ankara 25.632 km² ve Kayseri 16.970 km²'dir. Sivas 28.164 km² yüz ölçümü büyüklüğü ile bölgede ikinci sırada olmasına rağmen güneş enerjisi kurulu güç sıralamasında 88.06 MW ile 9. sırada yer almakta ve nüfus yoğunluğu sıralamasında 418.442 kişi ile 6. sırada yer almaktadır.



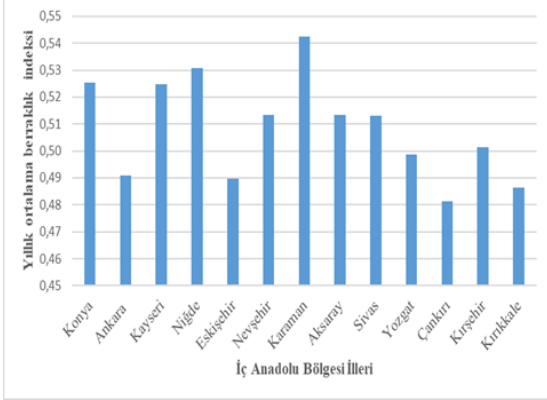
Şekil 10. İç Anadolu Bölgesi illeri kurulu güç ve nüfus dağılımı [21]

Şekil 11'de İç Anadolu Bölgesinde bulunan illerin aylık ortalama berraklık indeksi değerleri verilmiştir. Bölgede bulunan illerin berraklık indeksi değerleri Denklem 1-5 kullanılarak hesaplanmıştır. Berraklık indeksi bütün illerde Mayıs-Ekim ayları arasında güneşlenme süresinin uzun olması, yağışlı gün sayısının az olması, ışıınım şiddetinin yüksek olması gibi etkenlerden dolayı daha yüksek çıkmaktadır.



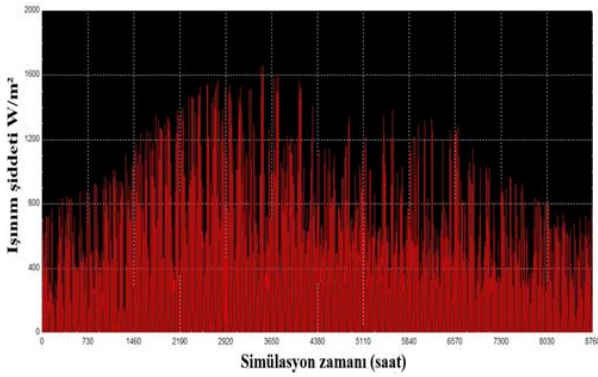
Şekil 11. Aylık ortalama berraklık indeksi

Şekil 12’de İç Anadolu Bölgesinde bulunan illerin yıllık ortalama berraklık indeksi değerleri verilmiştir. Yıllık ortalama en yüksek berraklık indeksi değeri 0.54 ile Karaman ilinde en düşük değer ise 0.48 ile Çankırı ilinde hesaplanmıştır. Güneşlenme süresinin artması PV panelin elektrik üretim periyodunu artırmaktadır. Işınım şiddeti ve berraklık indeksinin yüksek olması PV panellerde enerji üretimini artırmaktadır.

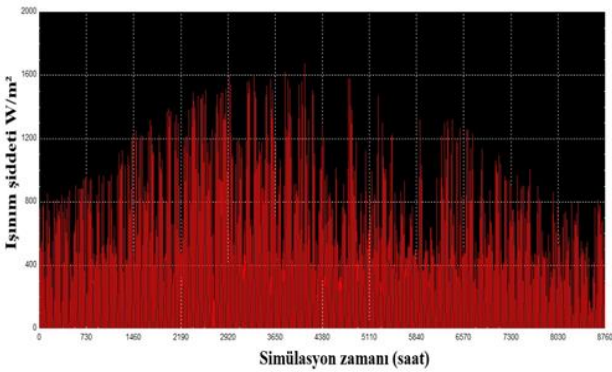


Şekil 12. Yıllık ortalama berraklık indeksi

550 W değerinde half-cut PV panel sistemi gerçek hava verileri kullanarak TRNSYS programı ile modellenmiştir. Modellenen sistemin Ankara ve Konya illeri şartlarında bir yıllık elektrik üretim değerleri elde edilmiştir. Şekil 13 ve Şekil 14’te Ankara ve Konya illerinin bir yıllık TRNSYS programı ile elde edilen ışınım değerleri verilmiştir.

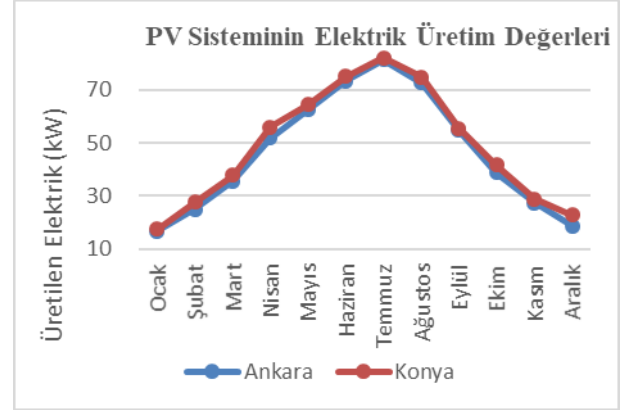


Şekil 13. Ankara ilinin bir yıllık ışınım şiddeti



Şekil 14. Konya ilinin bir yıllık ışınım şiddeti

Şekil 15’te Ankara ve Konya illerinin bir yıllık TRNSYS sonuçlarına göre elektrik üretim değerleri verilmiştir. Yılın bütün aylarında Konya’da Ankara’dan daha yüksek bir elektrik üretimi gerçekleşmiştir. Yaz ayları uzun güneşlenme süresi ve yüksek ışınım şiddetinden dolayı yüksek üretim gerçekleşmiştir. Ayrıca Konya 0.53 ile 0.54 değerine sahip Karaman ilinden sonra İç Anadolu Bölgesinin berraklık indeksi değeri bakımından en yüksek değere sahip ilidir. Berraklık indeksinin yüksek çıkması ilin elektrik üretim potansiyelini artırmaktadır.



Şekil 15. Ankara ve Konya illerinin TRNSYS modeli ile aylara göre elektrik üretimi

4 Tartışma ve sonuç

Yapılan bu çalışmada, güneş enerji potansiyelleri birbirinden farklı olan İç Anadolu Bölgesi illerinin güneş enerji potansiyelleri ve kurulu güç santralleri incelenmiştir. Güneş potansiyelleri ve sanayi gelişmişlikleri göz önünde bulundurularak seçilen Ankara ve Konya illeri iklim şartlarında TRNSYS programı ile modellenen 550 W değerinde half-cut PV sistemi modellenerek incelenmiştir. Bölgede bulunan illerin berraklık indeksi değerleri yeni ölçümler ile analiz edilerek güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti değerlerine göre güneş enerji potansiyelleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca illerde bulunan kurulu güç ile nüfus, kurulu güç ile illerin potansiyelleri karşılaştırılmıştır. İllerin aylık ve yıllık berraklık indeksi değerleri Denklem (1-5) kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Hesaplanan berraklık indeksi değerleri bütün illerde Mayıs-Ekim ayları arasında güneşlenme süresinin uzun olması, yağışlı gün sayısının az olması ve ışınım şiddetinin yüksek olması gibi etkenlerden dolayı daha yüksek çıkmıştır. Karaman ili 3007 saat/yıl ile en yüksek güneşlenme süresine sahip iken, Eskişehir 2479 saat/yıl ile en düşük güneşlenme süresine sahiptir. Berraklık indeksi yaz aylarında yüksek kış aylarında düşüktür. Bölgede bulunan illerde en yüksek ve en düşük berraklık indeksi aylara göre Ankara’da 0.561 ve 0.377, Konya’da 0.602 ve 0.416, Kayseri’de 0.607 ve 0.422, Eskişehir’de 0.558 ve 0.375, Sivas’ta 0.586 ve 0.408, Kırıkkale’de 0.559 ve 0.376, Aksaray’da 0.598 ve 0.400, Karaman’da 0.611 ve 0.442 Kırşehir’de 0.574 ve 0.397, Niğde’de 0.612 ve 0.427, Nevşehir’de 0.593 ve 0.409, Yozgat’ta

0.567 ve 0.396 ve Çankırı'da 0.555 ve 0.361 olarak hesaplanmıştır.

- Yıllık ortalama en yüksek berraklık indeksi değeri 0.54 ile Karaman ilinde en düşük 0.48 ile Çankırı ilinde hesaplanmıştır.
- Bölge illerinin ortalama güneş enerji santrali kurulu güç ve kişi başına düşen ortalama güneş enerji santrali kurulu güç değerleri sırası ile 261,774 MW ve 258 W olarak hesaplanmıştır.
- Ortalama kurulu güç en yüksek ve düşük iller sırası ile Konya ve Kırıkkale'dir. Ortalama kişi başına düşen kurulu güç en düşük 0.072 ile Ankara ve en yüksek il 0.72 ile Konya ili olarak hesaplanmıştır.
- Ankara ve Konya illeri iklim şartlarında TRNSYS ile modellenen PV sisteminin bir yıllık sonuçlarına göre Konya bütün aylarda Ankara'dan daha yüksek elektrik üretimine sahiptir. Sırası ile Ankara ve Konya illerinin yıllık elektrik üretim değerleri 558 ve 584 kW olarak elde edilmiştir. Ankara ve Konya bölge ortalamasının üzerinde berraklık indeksine sahiptir bu durum enerji yatırımlarının yapılması ile paralellik oluşturmaktadır. Bu illerin yüzölçümünün geniş olması ve bölgede nüfus yoğunluğu bakımından ilk iki sırada bulunması bu şehirlerin enerji taleplerinin ve yatırımlarının da yüksek olmasını sağlamaktadır.
- Karaman ve Konya illerinin yüksek berraklık indeksi, ışınım şiddeti ve güneşlenme süresi değerlerinden dolayı yatırım yapılabilirlik düzeyleri oldukça yüksek bulunmuştur. Konya ili İç Anadolu Bölgesinde en yüksek kurulu güç oranına sahiptir.
- Bölge illeri içerisinde en yüksek ışınım şiddeti 1660 kWh/m²-yıl, en yüksek güneşlenme süresi 3007 saat/yıl ve 0.54 ile en yüksek berraklık indeksi değerine sahip olan Karaman bölge ortalamasının altında kurulu güce sahiptir.

Güneş radyasyonu, berraklık indeksi, günlük güneşlenme süresi ve yıllık güneşli gün sayısı yüksek olan iller güneş enerjisinden elektrik üretim potansiyelinin yüksek olduğu illerdir. Sonuçlara göre güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan Karaman haricinde diğer illerde yatırım oranı bölge ortalamasını yakalamaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretim değerleri yüksek olan illerin ikinci bir ortak özelliği geniş bir yüz ölçümüne ve nüfus yoğunluğuna sahip olmasıdır. Bu durum sanayi gelişmişliğini artırırken enerji yatırımlarına da fırsat oluşturmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] Ç. Aydoğdu, Yenilenebilir enerji sektöründe ve enerji verimliliğinde kamusal destekler ve Türkiye'de yansımaları. Akademik İzdüşüm Dergisi, 6(1), 52-74, 2021.
- [2] G. Duran ve S. Çelikkaya, Batı Akdeniz Bölgesi güneş enerji sistemleri kümelenme düzey analizi. İktisadi

İdari ve Siyasal Araştırmalar Dergisi, 4(9), 171-187, 2019.

- [3] Y. Nakada, H. Takahashi, K. Ichida, T. Minemoto and H. Takakura, Influence of clearness index and airmass on sunlight and outdoor performance of photovoltaic modules. Current Applied Physics, 10(2), 261-264, 2010.
- [4] A. N. Celik, A simplified model based on clearness index for estimating yearly performance of hybrid PV energy systems. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 10(8), 545-554, 2002. <https://doi.org/10.1002/pip.450>
- [5] B. S. Lai, X. Li, L. L. Lai and M. D. McCulloch, Daily clearness index profile and weather conditions studies for photovoltaic systems. Energy Procedia, 142, 77-82, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.013>
- [6] F. E. Maham ve E. Akarslan, Güneş ışınım tahmini için farklı güneşlenme durumlarından faydalanan hibrit bir yöntem tasarımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(3), 588-596, 2022. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1074290>
- [7] E. Elibol, Ö. T. Özmen, N. Tutkun and O. Köysal, Outdoor performance analysis of different PV panel types. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, 651-661, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.051>
- [8] N. K. Kaynar, Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin Amasya ilindeki potansiyeli. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 4(2), 48-54, 2020.
- [9] A. Çıfci ve E. Altundağ, Burdur bölgesi güneş enerjisi potansiyelinin elektrik üretiminde kullanılabilirliği. Mesleki Bilimler Dergisi, 6(2), 111-120, 2017.
- [10] H. Kılıç, B. Gümüş ve M. Yılmaz, Diyarbakır ili için güneş enerjisi verilerinin meteorolojik standartlarda ölçülmesi ve analizi. EMO Bilimsel Dergi, 5(10), 15-19, 2016.
- [11] K. M. Aksungur, M. Kurban ve Ü. B. Filik, Türkiye'nin farklı bölgelerindeki güneş ışınım verilerinin analizi ve değerlendirilmesi, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 1-4, 2011.
- [12] Ö. F. Ertuğrul ve M. B. Kurt, Güneydoğu Anadolu bölgesinin yenilenebilir enerji kaynakları yönünden değerlendirilmesi. V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, sayfa 232-237, Diyarbakır, Türkiye, 2009.
- [13] M. Öztürk, O. Çalışır and G. Genç, Energy, exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic/thermal collector-assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 145, 1431-1443, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10675-9>
- [14] Y. S. İşler ve M. Salihmuhsin, Şebekeden bağımsız bir PV sistemin TRNSYS ile gerçek zamanlı modellenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(1), 66-76, 2018.
- [15] S. Duman ve M. Alçı, Yarım ve tam fotovoltaik hücreleri ile tasarlanan güneş enerjisi panellerinin

- toplam verimliliğini etkileyen parametrelerinin incelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(3), 592-600, 2022. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1073976>
- [16] TRNSYS. 2006. TRNSYS 16, a transient system simulation program. The Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, U.S.A.
- [17] World Final Energy, Statistics Trends and Impacts. <https://www.worldenergydata.org/world-final-energy/>, Accessed 05 April 2023.
- [18] M. B. Ağırkaya, Türkiye ekonomik büyümesinde yenilenebilir enerji: mevcut durum, gelecek beklentileri, istihdam ve yatırım fırsatları. Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 12(3), 2327-2350, 2022. <https://doi.org/10.48146/odusobiad.1103005>
- [19] Anonim, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Türkiye elektrik talebi projeksiyon raporu, EIGM, Ankara, Aralık 2021.
- [20] N. Celik and E. Özgür, Review of Turkey's photovoltaic energy status: Legal structure, existing installed power and comparative analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110344>
- [21] T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İstatistikleri. <https://www.enerji.gov.tr/en-S/Pages/Solar>, Accessed 01 March 2023.
- [22] U. K. Das, K. S. Tey, M. Seyedmahmoudian, S. Mekhilef, M. Y. I. Idris, W. Van Deventer and A. Stojcevski, Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 912-928, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.017>
- [23] T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Elektrik. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, Accessed 08 April 2023.
- [24] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/>, Accessed 12 April 2023.

