



HANÖNÜ (KASTAMONU) GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN FARKLI SİMÜLASYON PROGRAMLARI İLE TASARIMI VE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Sefa KIRNAPCI¹, Nihat PAMUK^{2*}

¹Bulent Ecevit University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, 67100, Zonguldak, Türkiye

²Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 67100, Zonguldak, Türkiye

Özet: Elektrik üretimi için kullanılan fosil yakıtların çevreye olan olumsuz etkilerinden dolayı son dönemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında hızla artış yaşanmaktadır. 2015 yılında Paris'te düzenlenen BM İklim Değişikliği Zirvesi'nde alınan en önemli kararlardan biri olarak küresel ısınmanın 2 °C'nin altında tutulmasına yönelik bir eylem planının uygulanması konusu görüşülmüş olup bu konuda ülkeler arasında mutabakata varılmıştır. Bu bağlamda dünya genelinde yenilenebilir enerji üretiminde kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Ülkemizde Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yürütülen çalışmalar neticesinde 2011 yılında Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından yayımlanan yönetmelik ile küçük ölçekli üretim tesislerinin lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğü ortadan kaldırılmıştır. Lisanssız elektrik üretim yönetmeliğinin uygulanmaya başlamasıyla birlikte ülkemizde güneş enerjisinden fotovoltaik sistemler ile elektrik üretimi hız kazanmıştır. Güneş enerjisi santrallerinin kurulduğundan önceki tetkik ve fizibilite çalışmalarının yanı sıra simülasyon programlarından elde edilen detaylı analiz raporları sayesinde sağlıklı veriler elde edilebilmektedir. Fotovoltaik sistem simülasyonu üzerine PVsyst ve PV*SOL programları detaylı veri girişi olanağı sunması ve bu veriler üzerinden olumlu analizler yapabilmesi nedeniyle benzetim programları arasında ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada Hanönü (Kastamonu) Belediyesine ait 2021 yılında kurulumu yapılmış 276 kWp gücünde fotovoltaik güneş enerji santralinin PVsyst ve PV*SOL programları kullanılarak simülasyonları oluşturulmuş ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Tesisin işletmeye alındığı tarihten itibaren ürettiği elektrik enerjisi miktarı benzetim sonuçları ile karşılaştırılarak benzetim programlarının doğrulukları ve performansları değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik, Güneş enerjisi, Simülasyon programları, PVsyst, PV*SOL


Design of Hanönü (Kastamonu) Solar Power Plant with Different Simulation Programs and Evaluation of Electrical Energy Production Results


Abstract: Due to the negative environmental impacts of fossil fuels used for electricity generation, renewable energy sources have increased rapidly in recent years. In 2015, the implementation of an action plan to keep global warming below 2 degrees Celsius, which was one of the most important decisions taken at the UN Climate Change Summit held in Paris, was discussed and an agreement was reached between countries on this issue. In this context, extensive studies have been carried out in renewable energy production worldwide. As a result of the efforts carried out by the Ministry of Energy and Natural Resources in our country, the obligation to obtain a license and establish a company for small-scale generation facilities was eliminated with the regulation published by the Energy Market Regulatory Board in 2011. With the implementation of the unlicensed electricity generation regulation, electricity generation from solar energy with photovoltaic systems has gained momentum in our country. Before installing solar power plants, reliable data can be obtained through detailed analysis reports obtained from simulation programs as well as on-site surveys and feasibility studies. PVsyst and PV*SOL programs on photovoltaic simulation stand out among simulation programs because they offer detailed data entry and can perform positive analysis on the data. In this study, the performance analysis of the 276 kWp photovoltaic solar power plant of Hanönü (Kastamonu) Municipality, which was installed in 2021, was simulated with PVsyst and PV*SOL programs. The performance of the simulation programs was also evaluated by comparing the amount of electricity generated by the plant since its commissioning with the simulation results.

Keywords: Photovoltaics, Solar energy, Simulation programs, PVsyst, PV*SOL

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 67100, Zonguldak, Türkiye

E mail: nihatapamuk@gmail.com (N. PAMUK)

Sefa KIRNAPCI  <https://orcid.org/0000-0003-2236-4713>

Nihat PAMUK  <https://orcid.org/0000-0001-8980-6913>

Gönderi: 28 Mart 2024

Kabul: 03 Mayıs 2024

Yayınlanma: 15 Mayıs 2024

Received: March 28, 2024

Accepted: May 03, 2024

Published: May 15, 2024

Cite as: Kirnapci S, Pamuk N. 2024. Design of Hanönü (Kastamonu) solar power plant with different simulation programs and evaluation of electrical energy production results. BSJ Eng Sci, 7(3): 529-538.

1. Giriş

Enerji kaynakları ülkeler açısından ekonomide ve sosyal kalkınmada çok önemli bir rol oynamaktadır. Sanayi

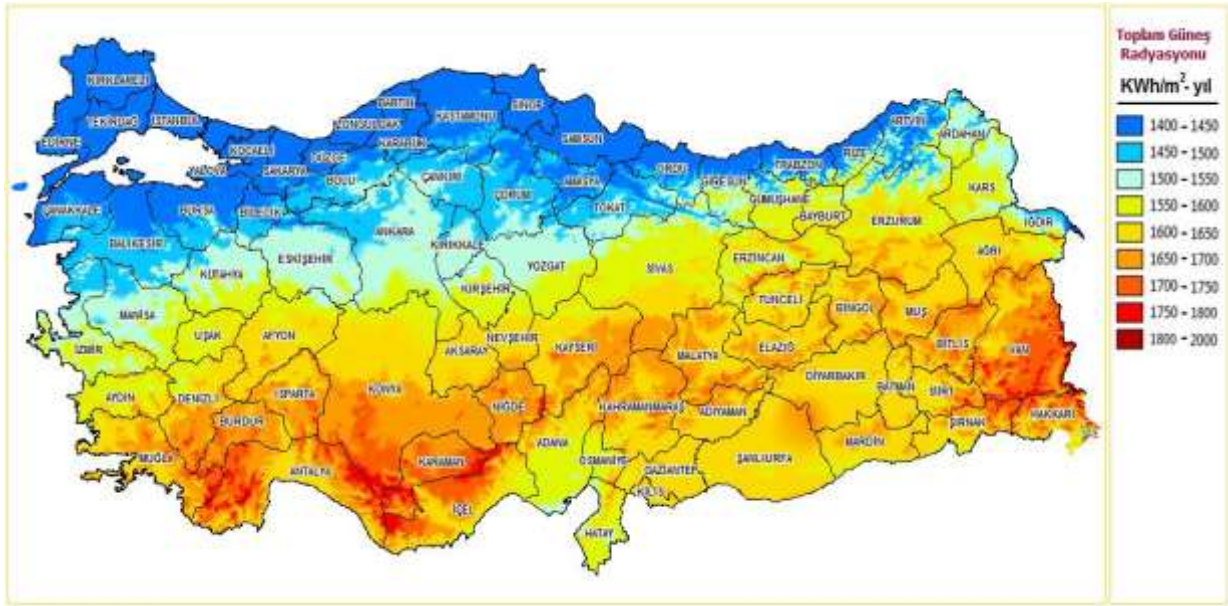
devriminden sonra dünya genelinde yükselen enerji talebi; gelişen teknoloji, ağır sanayi ve artan dünya nüfusu sebebiyle ortaya çıkan enerji ihtiyaçlarından



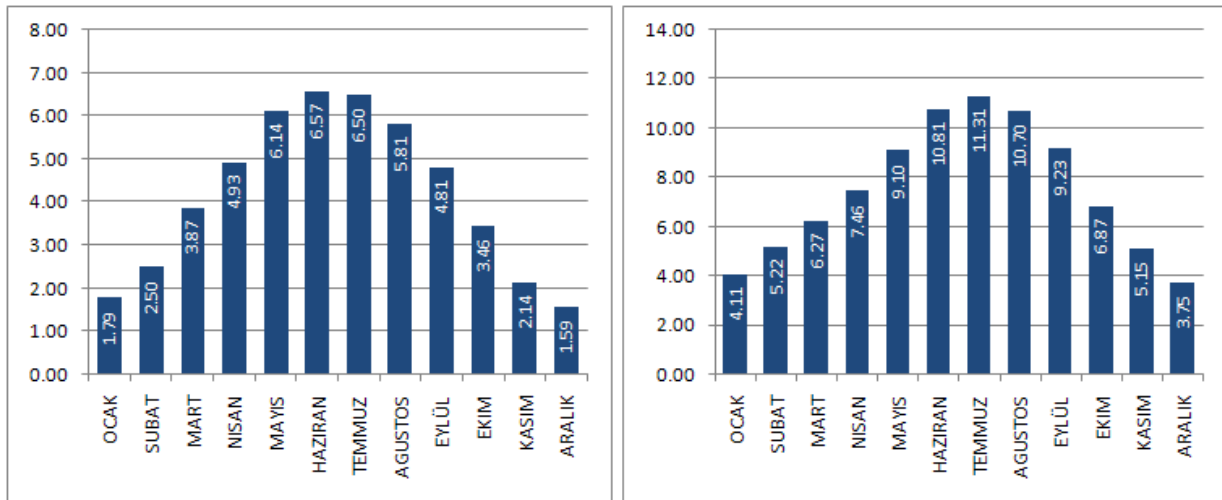
dolayı her geçen gün daha da artmaktadır. Dünya üzerinde ihtiyaç duyulan enerjinin büyük bir kısmı fosil kaynaklardan (kömür, petrol ve doğal gaz) sağlanmaktadır (Aktacı ve Yeşilata, 2011). Fosil yakıtların çevreye vermiş olduğu zararlar ve tükenen bir enerji türü olması sebebiyle kullanımı her geçen gün azalmaktadır. Fosil yakıtların kullanımının azalması ile ortaya çıkan enerji üretim açığı temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları ile kapatılmıştır. Fosil kaynaklar bakımından fakir olan Avrupa Birliği ülkeleri ve Uzak Doğu'nun sanayileşmiş ülkeleri ile enerji tüketimi çok yüksek olan Amerika Birleşik Devletleri yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesinde ve yaygınlaştırılmasında öncülük etmişlerdir. Aralık 2015'te Fransa'nın başkenti Paris'te düzenlenen B.M. İklim Değişikliği Zirvesi'nde küresel sıcaklık artışının 2 °C sınırının altında kalınması amaçlanarak ülkelerin stratejik çalışmalar ışığında geliştirici politikalar izlemesi genel anlamda kabul edilmiştir (UNFCCC Conference of

the Parties (COP) (Bali, 2015). Bu çerçevede birçok ülke yenilenebilir enerji alanında iyileştirici ve yapıcı politikalar izlemeye başlamıştır.

Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin bir coğrafyaya sahiptir. Dünya üzerinde bulunduğu jeopolitik konumundan ve ülkenin coğrafik yapısından dolayı Türkiye sürdürülebilir enerji türlerinden güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisinde ön plana çıkmaktadır. Türkiye coğrafi olarak 36°-42° kuzey enlemleri ile 26°-45° doğu boylamları arasında bulunmaktadır. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasından (GEPA) yapılmış olan çalışmalar neticesinde Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat olarak elde edilmiş, ortalama yıllık toplam ışınım değeri ise 1.527,46 kWh/m² olarak değerlendirilmiştir (ETKB - Bilgi Merkezi, 2023). Şekil 1'de Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyel haritası gösterilmiştir. Şekil 2'de Türkiye'nin global radyasyon verileri ve güneşlenme periyot süreleri gösterilmiştir. (GEPA – Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, 2023).



Şekil 1. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası.



Şekil 2. Türkiye global radyasyon verileri (KWh/m²*gün) ve güneşlenme periyotları (saat).

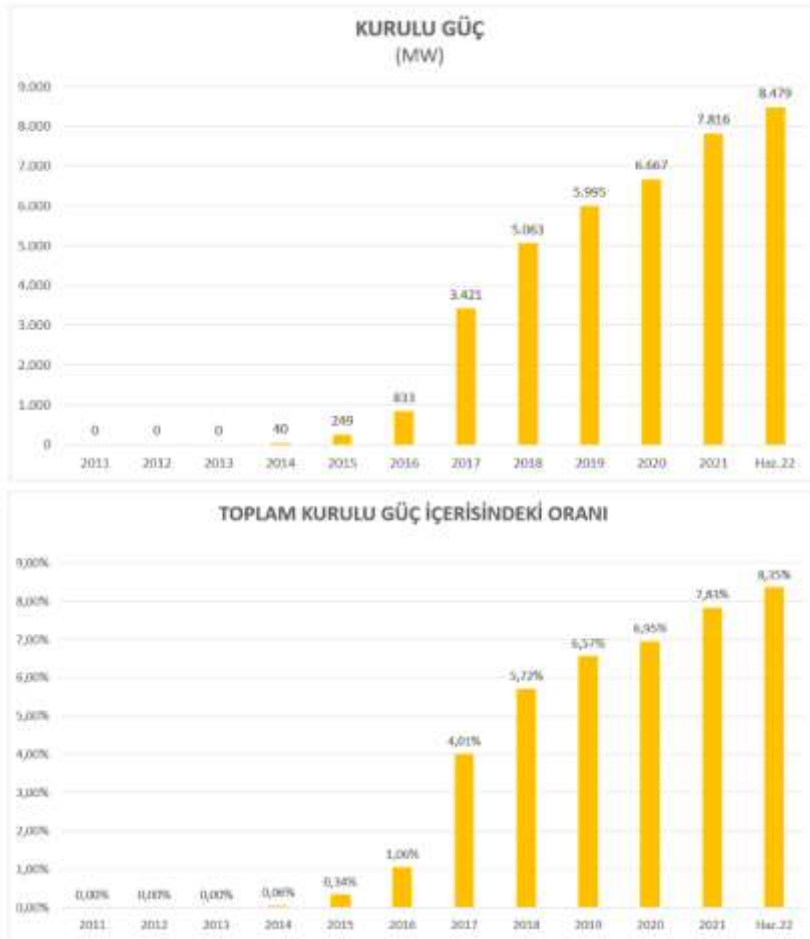
Ülkemizde oldukça iyi seviyede bulunan güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi için Bakanlık düzeyinde yürütülen çalışmalar son yıllarda giderek artmıştır. Bu kapsamda ülke genelinde özel şirketler, kamu kurumları, Belediyeler, küçük-orta-büyük işletmeler güneş enerjisinden elektrik üretimi konusunda bilinçlendirilerek maddi destek (kredi, hibe) sağlanmıştır. Ayrıca güneş enerjisinden elektrik üretiminin küçük ölçekte bile olsa yararlanılabilmesi amacıyla 2013 yılında “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kanunu” kapsamında “Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik” yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik ile güneş enerjisinden elektrik üreten santrallerin sayısı hızla artmıştır.

Haziran 2022 sonunda, güneş enerji sistemlerine bağlı elektrik kurulu gücümüz 8,479 MW'tır ve toplam kurulu gücün %8,35'ini oluşturmaktadır. Şekil 3'te yıllara göre kurulu güç değerleri ve toplam kurulu gücün yüzdesel karşılıkları gösterilmiştir. (EİGM – Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2023).

Dünyada güneş enerjisinden elektrik üretimi gerçekleştirebilmek için fotovoltaik sistemler geliştirilmiştir. Güneş panelleri, Fotovoltaik sistemlerin merkezi olmasına rağmen, çalışma düzeni içerisinde başka bileşenlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Fotovoltaik sistemler güneş panelleri ile akü, solar invertör, şarj regülatörü gibi başka bileşenlerden de oluşmaktadır.

Fotovoltaik sistemler elektrik şebekesine bağlı olup olmamasına veya bağımsız bir sistem olarak tasarlanıp tasarlanmamasına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Fotovoltaik sistemlerin başlıca temel bileşenleri ve görevleri aşağıda verilmiştir.

- Fotovoltaik sistemlerde PV modüllerini sabitlemek ve güneşi doğru yönlendirmek amacıyla montaj yapıları kullanılmaktadır.
- Enerji depolama, bağımsız sistemler için kritik bir bileşen olarak kabul edilmektedir. Çünkü bu yapı, fotovoltaik sistemin gece saatlerinde ve kötü hava koşullarında dahi elektrik sağlayabilmesini mümkün kılmaktadır. Aküler enerji depolama birimleri olarak tercih edilmektedir.
- DC-DC dönüştürücüler, modül çıkışının zamana ve hava koşullarına bağlı olarak değişecek gerilim seviyelerinde olmasını sağlamaktadır.
- Şebekeye bağlı sistemlerde, PV modüllerinden elde edilen doğru akım elektrik enerjisini, alternatif akım elektrik enerjisine dönüştürmek için invertörler veya DC-AC dönüştürücüler kullanılmaktadır.
- Kablolar, fotovoltaik sistemlerin farklı bileşenlerini birbirine veya elektrik yüküne bağlamak için kullanılmaktadır. Direnç kayıplarını en aza indirmek için uygun kalınlıkta kabloların seçilmesi son derece önemlidir.



Şekil 3. Türkiye'nin yıllara göre kurulu güç değerleri ve yüzde değişimleri.

Güneş enerjisi santrallerinin amortisman sürelerini belirlemek için, kurulum öncesi detaylı fizibilite çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Yatırım öncesinde gerçekleştirilen bu çalışma, yatırımın uygulanabilirliğini değerlendirmek ve projenin ekonomik açıdan başarılı olup olmadığını belirlemek adına büyük bir öneme sahiptir.

Bu çerçevede, yatırımcılar, yapılması düşünülen güneş enerjisi sisteminin masraf analizini, üretim-verim kapasitesini ve amortisman süresini analiz etmektedirler. Bu analizler gerçekleştirilirken çeşitli benzetim programlarından faydalanılmaktadır. Bu programlar, sistemin kurulum maliyetini, enerji üretim potansiyelini ve amortisman süresini hesaplamak için kullanılır. Bu analizler, gerçekleştirilecek olan yatırımın ne kadar sürede geri ödeneceğini ve projeden ne kadar sürede kar sağlanacağını belirlemek açısından oldukça önemlidir.

Bu benzetim programları, yatırımcıların doğru kararlar alabilmeleri için güçlü bir veri analizi sunmaktadır. Ayrıca farklı senaryoları değerlendirmek ve projenin çeşitli değişkenlere nasıl tepki vereceğini anlamak için kullanılabilirler. Fotovoltaik sistemlerin enerji üretim değerlerini etkili bir şekilde tahmin edebilmenin yanı sıra, sistemlerin çalışma davranışını öngörebilme konusunda da önemli bir rol oynamaktadır. 3D sistem tasarımını benzetim programları üzerinde gerçekleştirerek güneş panellerine düşen gölgelenmeleri gerçek zamanlı olarak gözlemlene imkânı sağlamaktadır. Benzetim programları, fotovoltaik sistem tasarımcılarına kurulumun yapılacağı coğrafi bölgeye, enerji talebine ve sistem güvenilirliği gibi parametrelerle uyumlu çalışacak farklı bileşenleri en uygun şekilde seçme özgürlüğü sağlamaktadır (Kıyanççek, 2013). PVsyst ve PV*SOL benzetim programları fotovoltaik sistem tasarımcılarına, sistem bileşenlerini en uygun şekilde seçme ve enerji üretimi tahminlerini yapma konusunda gelişmiş araçlar sunmaktadır.

Her iki program da coğrafi bölgeye özgü parametrelerle çalışabilme yeteneğine sahiptir, bu da sistemin kurulacağı konumun iklim koşullarını ve güneş ışınımını dikkate alarak daha gerçekçi benzetim sonuçları elde etmeyi sağlamaktadır. PVsyst ve PV*SOL'un detaylı analiz özellikleri, sistem tasarımcılarına enerji talebine, güvenilirliğe ve bölgesel özelliklere bağlı olarak en uygun bileşenleri seçme konusunda önemli bir rehberlik sunmaktadır (Ay ve Pamuk, 2023).

Bu benzetimler, sistemin kurulumu sırasında olası maliyetleri minimize etmeye ve enerji üretimini optimize etmeye yönelik stratejiler geliştirmeye olanak tanımaktadır. Ayrıca, gerçek ortam verilerine daha yakın benzetim sonuçları elde etmek için programların güncel tutulması ve teknik özelliklerinin laboratuvar testlerine dayandırılması gibi faktörlere dikkat edilmesi, sistemin performansını iyileştirmeye yönelik daha kesin bilgiler sağlanmasına olanak tanımaktadır. Akademik alanda, güneş enerji santralleriyle ilgili yapılan çalışmalar genellikle çevresel ve/veya maliyet analizlerine odaklanmaktadır.

Bu araştırma, 276 kWp kurulu gücüne sahip güneş enerjisi santralının faaliyete alınması sonrası elde edilen üretim değerlerini benzetim programlarından elde edilen veri analizleri ile karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu çerçevede, üretim gücü, yapılan tesislerin etkinliği, verimliliği ve maliyet analizi gibi konulara odaklanan çalışmalar incelenmiştir. Bu konuda daha önceden yapılmış bilimsel ve akademik çalışmaların bazıları aşağıda tarihsel sıra ile sunulmuştur.

(Çelebi, 2002), "Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkeleri" başlıklı çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan fotovoltaik panellerin önemi üzerinde durmuş olup fotovoltaik sistemleri tercih edecek kullanıcıların panellerin yerleştirilmesindeki eğitim açısı ve güneş ışınlarının en elverişli şekilde kullanılmasının önemi vurgulanmaktadır. (Tozlu, 2004), tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi bünyesinde kurularak faaliyete geçen güneş enerji sisteminin gerçek üretim verileri ile benzetim programından elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırmıştır. Ortaya çıkan veriler, benzetim programının sunduğu değerlere yakınlık göstermektedir, bu durum benzetim programının tutarlılığını ortaya koymaktadır. (Lalwani, ve ark., 2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, güneş enerji sistemlerinde fizibilite amacıyla kullanılan fotovoltaik sistem benzetim programlarından RET Screen, PV F-Chart, Solar Design Tool, INSEL, TRNSYS, NREL Solar Advisor Model, ESP-r 11.5, PVSYST 4.33, Solar Pro, PV Design Pro-G, PV*SOL Expert, HOMER gibi 12 farklı benzetim programı, işletim maliyeti, kolay kullanım, platform uyumluluğu, verimlilik, içerik ve güncellenebilirlik kriterleri açısından incelenmiştir.

Keskin (2012) tarafından yapılan çalışma ile şebekeden bağımsız (Off Grid) 5 kW kapasiteli bir fotovoltaik sistem modellemesi oluşturmuştur. Çalışma kapsamında yürütülen model PYSyst programı ile oluşturularak panel türlerinden monokristal modüllerden daha fazla verimlilik elde edilebileceği tespit edilmiştir. (Sekçuloğlu, 2012) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile yenilenebilir enerji türlerinden olan güneş enerjisi sistemi, rüzgâr enerjisi sistemi ve hibrit sistemlerden elektrik enerjisinin üretimi detaylı olarak incelenmiş, sistemlerin tasarımları HOMER Pro (Pamuk, 2024) ve PVsyst benzetim programları ile gerçekleştirilerek türler arasında elde edilen veriler karşılaştırılmış ve ekonomik parametreler çerçevesinde incelenmiştir. (Haydaroglu, 2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Dicle Üniversitesi tarafından kurulumu yapılarak enerji üretimine başlayan 250 kWp kurulu gücüne sahip güneş enerjisi santralının PVsyst benzetim programı ile benzetimi gerçekleştirilmiştir. Santralin uluslararası standart olan IEC 61724 (Fotovoltaik Enerji Sistemleri Performansı Monitörleme - Genel Prensipler ve Ölçümler) kapsamında belirtilen performans kriterlerine uygun olup olmadığı incelenmiştir. Santralin gerçek üretim değerleri ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında Aralık ve Ocak aylarında uyumsuzluk

görülmüştür. Ancak finansal inceleme kapsamında kar/yatırım dengesinin olumlu sonuç vermesi söz konusu projenin ekonomik açıdan uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Çiftçi (2016) tarafından yapılan çalışmada, fotovoltaik sistemlerin en önemli parametrelerinden santral gücü, maliyet analizi ve sistem tasarımı üzerine farklı senaryolar kurulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tasarım aşamasındaki önemli verilerin santral kurulmadan elde edilebildiği ve öngörü oluşturabildiği kanıtlanmıştır. Bu çalışmada PVSOL programı ile tasarımların analizi gerçekleştirilmiştir. Aldudak (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, PVsyst benzetim programı ile çeşitli illerde faaliyet gösteren güneş enerjisi santrallerinin reel üretim değerleri incelemiştir. Benzetim sonuçları ile gerçek üretim sonuçları karşılaştırıldığında önemli ölçüde birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

Şimşek (2018), tarafından yapılan çalışmada, Ankara'nın Gölbaşı ilçesinde ve İzmir'in Torbalı ilçesinde kurulan Güneş Enerji Santralleri için PVsyst benzetim programı aracılığı ile hazırlanan benzetim sonuçları gerçek değerler ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçlarının gerçek üretim değerlerine yakın sonuçlar verdiği gösterilmiştir. (Bolat ve ark., 2020) tarafından yapılan çalışmada ise, Lebit Güneş Enerji Santralinin benzetim programlarından elde edilen benzetim sonuçları ile gerçek santral enerji üretim değerleri karşılaştırılmıştır. PVsyst program sonuçlarının uygunluk değerlendirilmesi yapılmıştır. Benzetim sonuçları ile elde edilen üretim değerleri arasında neredeyse hiçbir fark oluşmadığı gösterilmiştir. Bu bağlamda, PVsyst programından gerçeğe yakın veriler elde edildiği kanıtlanmıştır.

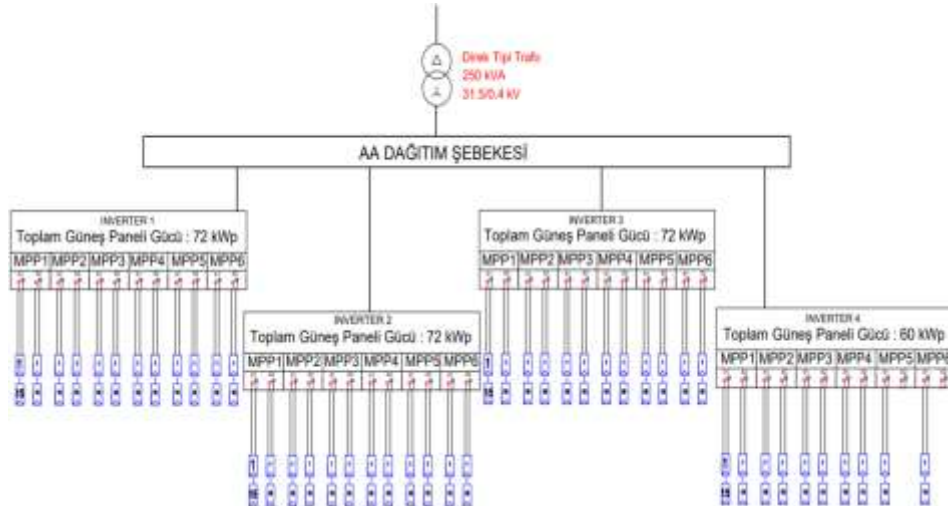
Bu çalışmada, Hanönü (Kastamonu) Belediyesine ait Güneş Enerjisi Santralinin fotovoltaik sistem tasarımı, PVsyst ve PV*SOL benzetim programları kullanılarak analiz edilmiştir. Benzetim sonuçları, Hanönü güneş enerjisi santralinin işletmeye başlayarak üretim yaptığı 2021, 2022, 2023 yıllarına ait üretim verileri ile karşılaştırılmış, her iki programın gerçek üretim verilerine yaklaşımları karşılaştırılmıştır. Tüm bu

analizler ışığında, Hanönü (Kastamonu) Belediyesine ait Güneş Enerji Santralinin performans değerleri incelenmiştir.

2. Hanönü (Kastamonu) Belediyesi Güneş Enerji Santrali'nin PV*SOL ve PVsyst Benzetim Programları ile Enerji Analizi

Güneş enerjisi santrali Hanönü (Kastamonu) Belediyesinin elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla, Kastamonu ili, Hanönü ilçesi Bağdere Mevkii 262 ada 1 parsel 41.6197° enlem, 34.4710° boylam coğrafi koordinatlarında kurularak faaliyete geçirilmiştir. Tesisin maksimum güç üretim kapasitesi 276 kWp'dir. Üretim santralinin kurulu olmuş olduğu bölgede yıllık en düşük ve en yüksek hava sıcaklığı ortalamaları 28.1 °C ile - 4.5 °C arasında değişmektedir (ÇŞİDB - Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023).

Santralde 690 adet yerli üretim yapan Alfa Solar firmasına ait A3S72M400 marka monokristal güneş panelleri tercih edilmiştir. 400 Wp gücünde 690 adet panel içeren bu fotovoltaik sistem 30° eğim açısı ile güney yönünde konumlandırılarak imalatı yapılmıştır. Santral 3 tane 72 kWp ve 1 tane 60 kWp güçlerinde 4 diziden oluşmaktadır. 72 kWp gücündeki dizilerde 12 adet panel dizisi bulunmaktadır. Her iki dize 72 kWp'lık inverterlerin maksimum güç noktası takip girişine bağlıdır. 60 kWp'lik dizide ise 10 adet panel dizisi bulunmaktadır. Bu dizilerin de her biri 60 kWp'lık inverterlerin maksimum güç noktası takip girişine bağlıdır. Her dizide 15 adet fotovoltaik modül seri şekilde bağlanmıştır. Santralde Growatt New Energy firmasının MAX 60KTL3 LV modeli kullanılmıştır. Hanönü (Kastamonu) Belediyesi Güneş Enerji Santrali 31,5 kV hat gerilimine sahip şebeke hattı ile enterkonnekte sisteme irtibatlandırılmıştır. İnverter çıkışlarındaki alçak gerilim, üç fazlı 0,4/31,5 Kv 50 Hz, 250 kVA'lık direk tipi transformatör aracılığıyla orta gerilim dağıtım şebekesine bağlanmıştır. Şekil 4'te Hanönü (Kastamonu) Belediyesi Güneş Enerji Santralinin tek hat şeması gösterilmiştir.



Şekil 4. Hanönü (Kastamonu) güneş enerji santralinin tek hat bağlantı şeması.

2.1 PV*SOL Benzetim Programı

PV*SOL benzetim programı yardımıyla 5000 adet fotovoltaik modül içerecek şekilde sistem tasarımları gölgelenme biçimleri de dikkate alınmak kaydıyla hesaplanabilmektedir. Program sayesinde güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı, optimize edilmesi ve ekonomik değerlendirme sağlanması olmak üzere birçok çalışma yapılabilmektedir. Detaylı analiz yapabilme yeteneği programın veri tabanı genişliği ile ilgilidir. PV*SOL benzetim programı güneş ışığı açıları ve süresi, iklim verileri, gölgelenme durumları, modül, inverter ve diğer montaj ekipmanlarına ait geniş bir veri tabanına sahiptir. Bu durum program kapasitesini ve verimini arttırmaktadır. Çalışmada iklim veri tabanı olarak MeteoSyn ile entegre olacak şekilde çalışma yapılmış olup, analizler detaylı olarak gerçekleştirilmiştir.

PV*SOL programı, güneş ışınımı, sıcaklık ve gölgelenme etkileri gibi değişkenleri dikkate alarak fotovoltaik sistemin çıkış gücünü ve enerji verimini tahmin etmektedir. Program, tasarımcılara PV sistemlerinin beklenen performansını farklı iklim koşulları ve coğrafi konumlarda değerlendirme imkânı sağlamaktadır (Dondariya ve ark., 2018; Milosavljević ve ark., 2022). PV*SOL programı, fotovoltaik sistemin en uygun tasarımını ve konfigürasyonunu gerçekleştirmektedir. Bu durum, panel modüllerinin boyutlandırılması, seçimi, inverterler, bataryalar ve diğer bileşenlerin seçimi gibi unsurları içermektedir (Mohanty ve ark., 2016; Alsadi ve Khatib, 2018; Abo-Khalil ve ark., 2023).

PVSOL, dünya çapında mühendisler, planlamacılar, mimarlar, montaj uzmanları ve nitelikli teknisyenler tarafından yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. PVSOL Premium ile fotovoltaik performans üzerindeki gölgeleme etkilerini doğru bir şekilde değerlendirmek için 3D nesnelere yerleştirmek ve tahmin etmek mümkündür (Cavalcante ve ark., 2019). PV*SOL sayesinde, birkaç modülden oluşan küçük çatı sistemlerinden ticari çatılardaki orta ölçekli sistemlere ve 100.000 modüle kadar olan büyük güneş parklarına kadar farklı büyüklükteki modern güneş enerjisi sistemleri tasarlanabilmekte ve simüle edilebilmektedir.

2.2 PVsyst Benzetim Programı

PVsyst, İsviçre'nin Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilen bir fotovoltaik sistem benzetim programıdır. Bu program, şebekeye bağlantılı veya şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem tasarımlarının sonuçlarını üretmeye ve incelemeye yardımcı olmaktadır. Bu program, On Grid (şebeke bağlantılı) veya Off Grid (şebekeden bağımsız) güneş enerjisi sistemleri ve güneş enerjili sulama sistemlerinin tasarımını gerçekleştirmek için kullanılmaktadır (Yadav, 2015). PVsyst güneş enerjisi benzetim programı, 3 boyutlu modellemeler oluşturarak gölgelenme durumlarını analiz etme imkânı sunmaktadır. Tasarlanan güneş enerji sisteminde, güneş panellerine düşen gölgeleri gerçek zamanlı olarak gözleme olanağı sağlamaktadır. Ayrıca, çeşitli güç, gerilim ve markalardaki inverterler ile panel bilgilerini ara yüzünde bulundurarak kurulması planlanan sistemin yıl içerisindeki ortalama performans çıkarımını gerçekleştirmektedir. (Bouzuenda ve ark., 2014; Freeman ve ark., 2014; Fisher ve ark., 2014).

PVsyst, benzer programlardan daha detaylı hesaplamalara ve farklı parametrelerin kullanımına imkân tanımaktadır. PVsyst, iklim verilerini bir düzine farklı kaynaktan ve kişisel verilerden içerebilir (Azam ve ark., 2024).

3. Bulgular

Hanönü (Kastamonu) Belediyesi Güneş Enerjisi Santralini uygulama projesi Haziran 2021 yılında tamamlanmıştır. Santralde kullanılan tüm ekipmanların teknik ve fiziki özelliklerine bağlı olarak PVSOL ile PVsyst programlarında modellemesi yapılarak sistem simüle edilmiştir. Benzetim sonuçlarından sisteme ait elektrik enerjisi üretim değerleri, enerji kayıp değerleri ve bu sonuçlara bağlı olarak performans parametreleri elde edilmiştir. Şekil 5'te Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santralini kurulu alan gösterilmiştir. Şekil 6'da Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santralini kurulu hali gösterilmiştir. Tablo 1'de Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santraline ait aylık elektrik enerjisi üretim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5. Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santralini kurulu alanı.



Şekil 6. Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santrali kurulu hali.

Tablo 1. Hanönü güneş enerji santralinde üretilen elektrik enerjisinin aylık dağılımı

Dönem	Üretim Değeri (kWh)
Ocak	10.122
Şubat	15.362
Mart	24.096
Nisan	30.286
Mayıs	33.205
Haziran	36.914
Temmuz	38.711
Ağustos	33.266
Eylül	31.175
Ekim	31.868
Kasım	15.637
Aralık	11.301

Proje kapsamında her iki benzetim programında sahada imalatı tamamlanarak geçici kabulü gerçekleştirilmiş olan ekipmanların marka, model ve teknik verileri aynı olan malzemeler tercih edilmiştir. Böylelikle ekipman özellikleri ve üretim kalitesinden doğabilecek olan verim kayıpları ve oluşacak olan farklar ortadan kaldırılmıştır (Pamuk, 2023).

Pvsyst 7.4.4 programında yapılan benzetim çalışması kapsamında;

- Program içerisinde bulunan harita veri tabanından projenin koordinatlandırılması yapılarak hem lokasyon seçimi hem de lokasyona ait yıllık hava durumu verileri (Meteonorm) seçilmiştir.
- 276 kWp kurulu gücü kapsamında 690 adet monokristal panel kullanılmıştır.
- Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerjisi Santralinin uygulamasında kullanılan Alfa Solar firmasına ait A3S72M400 modeli program veri tabanında mevcut olmadığından aynı teknik özelliklere sahip CW Enerji firmasına ait 400 Wp gücünde CWT400 model 690 adet monokristal FV panel kullanılmıştır.
- Sistemde Growatt New Energy markasına ait 60 kW nominal güce sahip MAX 60KTL3 LV model 4 adet invertör kullanılmıştır.

- Fotovoltaik panellerin montajı zemine sabit montajlı olacak şekilde 30° montaj eğimi ve 0° yatay azimut açısı ile tam güney yönünde konumlandırılmıştır.

Tablo 2’te Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santralinin Pvsyst programı yardımıyla simüle edilen aylık elektrik enerjisi üretim değerleri gösterilmiştir.

Tablo 2. Pvsyst programı üzerinde üretilen elektrik enerjisinin aylık dağılımı

Dönem	Üretim Değeri (kWh)
Ocak	22.199
Şubat	23.923
Mart	30.204
Nisan	35.308
Mayıs	39.249
Haziran	39.779
Temmuz	37.569
Ağustos	38.136
Eylül	36.285
Ekim	28.284
Kasım	21.321
Aralık	19.908

PVSOL programında yapılan benzetim çalışması kapsamında;

- Program içerisinde bulunan harita veri tabanından projenin koordinatlandırılması yapılarak hem lokasyon seçimi hem de lokasyona ait yıllık hava durumu verileri (Meteonorm) seçilmiştir.
- 3D görselleştirme özelliği sayesinde sistemin planlanması gerçekleştirilmiş ve güneş santralinin 3 boyutlu tasarımı yapılmıştır.
- 276 kWp kurulu güç kapsamında 690 adet monokristal panel kullanılmıştır.
- Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerjisi Santralinin uygulamasında kullanılan Alfa Solar firmasına ait A3S72M400 modeli program veri tabanında mevcut olmadığından aynı teknik özelliklere sahip CW Enerji firmasına ait 400 Wp gücünde CWT400 model 690 adet monokristal panel kullanılmıştır.

- Sistemde Growatt New Energy markasına ait 60 kW nominal güce sahip MAX 60KTL3 LV model 4 adet invertör kullanılmıştır.
- Fotovoltaik panellerin montajı zemine sabit montajlı olarak 30° montaj eğimi ve 0° yatay azimut açısı ile tam güney yönünde konumlandırılmıştır.

Tablo 3'te Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santralının PVSOL programı yardımıyla simüle edilen aylık elektrik enerjisi üretim değerleri gösterilmiştir.

Tablo 3. PVSOL programı üzerinde üretilen elektrik enerjisinin aylık dağılımı

Dönem	Üretim Değeri (kWh)
Ocak	11.658
Şubat	15.744
Mart	21.741
Nisan	26.484
Mayıs	36.520
Haziran	40.003
Temmuz	40.669
Ağustos	35.011
Eylül	25.081
Ekim	18.466
Kasım	12.822
Aralık	8.584

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu araştırma kapsamında güneş enerjisi ile enerji üretimi kapsamında projelendirilmiş ve devreye alınmış olan bir santralin gerçek verileri ile benzetim programlarından elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerji Santrali'nin üretime başladığı tarih olan Temmuz 2021 ile Ekim 2023 yılları arasındaki üretim verileri aylık bazda kayıt altına alınmıştır. Söz

konusu aylık üretim verilerinin aynı dönemlerdeki üretim değerlerinin ortalaması alınarak benzetim sonuçları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Aylık üretilen enerji miktarları karşılaştırıldığında direkt güneş açısının azaldığı ve güneşlenme süresinin kısaldığı kış ve sonbahar dönemlerinde PVsyst benzetim programının sonuçları gerçeğe uzak, PV*SOL benzetim programının sonuçları gerçeğe daha yakın olduğu görülmektedir. Güneş açısının ve güneşlenme süresinin arttığı yaz dönemlerinde ise her iki benzetim programının gerçek üretim değerlerine daha yakın sonuç verdiği tespit edilmiştir. Tablo 4'te Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santralının gerçek, PVSOL ve PVsyst programları yardımıyla simüle edilen aylık elektrik enerjisi üretim değerleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 5'te Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santralının gerçek, PVSOL ve PVsyst programları yardımıyla simüle edilen yıllık elektrik enerjisi üretim değerleri gösterilmiştir.

Benzetim programlarından elde edilen yıllık toplam enerji üretim değerleri ile gerçek üretim değerleri karşılaştırıldığında % 6.15 sapma oranı ile PV*SOL gerçek üretim değerine daha yakın sonuçlar vermiştir. PVsyst programında ise %19,3 sapma oranı ile gerçek değerlere uzak sonuçlar elde edilmiştir.

Güneş enerji sistemlerinin planlanması ve değerlendirilmesinde benzetim programlarının kullanımı büyük bir öneme sahiptir. Fotovoltaik sistem tasarımcıları, coğrafi bölge, enerji talebi ve sistem güvenilirliği gibi faktörlere bağlı olarak, sistem bileşenlerini en uygun şekilde seçmek için benzetim programlarından faydalanabilirler. Bu yaklaşım, maliyetleri düşürerek fazla masraftan kaçınmayı ve sistem tasarımını optimize etmeyi mümkün kılmaktadır (Raj ve ark., 2016).

Tablo 4. Aylık bazda toplam enerji üretim miktarları

Dönem	Hanönü GES Üretim Değeri (kWh)	PVsyst Programı Benzetim Değeri (kWh)	PVSOL Programı Benzetim Değeri (kWh)
Ocak	10.122	22.199	11.658
Şubat	15.362	23.923	15.744
Mart	24.096	30.204	21.741
Nisan	30.286	35.308	26.484
Mayıs	33.205	39.249	36.520
Haziran	36.914	39.779	40.003
Temmuz	38.711	37.569	40.669
Ağustos	33.266	38.136	35.011
Eylül	31.175	36.285	25.081
Ekim	31.868	28.284	18.466
Kasım	15.637	21.321	12.822
Aralık	11.301	19.908	8.584

Tablo 5. Yıl boyunca üretilen toplam enerji üretim miktarları

	Hanönü GES Üretim Değeri (kWh)	PVsyst Programı Benzetim Değeri (kWh)	PVSOL Programı Benzetim Değeri (kWh)
Toplam	311.943	372.165	292.783

Ayrıca, benzetim programlarının detaylı analiz yetenekleri sayesinde sonraki bilimsel çalışmalar detaylandırılabilir. Gerçekleştirilen analizler ile, seçilen parametrelerin enerji üretimi üzerindeki etkisini incelenerek, sistem performansı artırılabilir. Aynı zamanda, benzetim programlarının gerçek ortam verilerine daha yakın sonuçlar üretebilmesi için, enerji üretimi sapma oranları azaltılabilir. Bu bağlamda, benzetim programlarındaki parametre seçenekleri arasında, güneş enerjisi sisteminin haftalık, aylık ve yıllık bakımlarını doğrudan etkileyen sekmelerin bulunması, harita veri tabanlarının sürekli gelişim içinde tutulması ve fotovoltaik sistem ekipmanlarının laboratuvar testlerine tabi tutularak teknik özelliklerinin sağlanması gibi detaylar, gerçek ortam enerji üretimi verilerine daha yakın benzetim sonuçları elde etmede yardımcı olacaktır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazar(lar)ın katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Tüm yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	S.K.	N.P.
K	50	50
T	50	50
Y	50	50
VTI	50	50
VAY	50	50
KT	50	50
YZ	50	50
KI	50	50
GR	50	50
PY	50	50
FA	50	50

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Abo-Khalil AG, Sayed K, Radwan A, El-Sharkawy IA. 2023. Analysis of the PV system sizing and economic feasibility study in a grid-connected PV system. *Case Stud Thermal Eng*, 45: 102903.
- Aktacir MA, Yeşilata B. 2011. Harran Üniversitesi kampüsü için fotovoltaik sistem uygulamaları. *Tesisat Müh*, 111: 41-46.
- Aldudak M. 2018. Türkiye'nin farklı şehirlerinde pv sistemlerinin ekonomik analizi ve verimliliği değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, pp: 94.
- Alsadi S, Khatib T. 2018. Photovoltaic power systems optimization research status: A review of criteria, constrains,

- models, techniques, and software tools. *Appl Sci*, 8(10): 10. <https://doi.org/10.3390/app8101761>.
- Ay E, Pamuk N. 2023. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Farabi yerleşkesindeki elektrik enerjisi ihtiyacının güneş enerjisi santralleri kurularak elde edilmesi ve ekonomik analizi. *BSJ Eng Sci*, 6(3): 173-184.
- Azam MS, Bhattacharjee A, Hassan M, Rahaman M, Aziz S, Shaikh MAA, Islam MS. 2024. Performance enhancement of solar PV system introducing semi-continuous tracking algorithm based solar tracker. *Energy*, 289: 129989.
- Bali S. 2015. Güneş enerjisi sektöründe kullanılan bilgisayar destekli benzetim programları; PV*SOL Expert programı incelemesi. VIII. Yenilebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 15-16 Ekim, Adana, Türkiye, pp: 127-132.
- Bolat M, Arifoğlu U, Demiryürek H. 2020. Lebit enerji güneş santralinin Pvsyst programı ile analizi. *Bitlis Eren Üniv Fen Bil Derg*, 9(3): 1351-1363. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.650786>.
- Bouzguenda M, Al Omair A, Al Naeem A, Al Muthaffar M, Ba Wazir O. 2014. Design of an off-grid 2 kW solar PV system. 9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, March 25-27, Monte-Carlo, Monaco, pp:1-6.
- Cavalcante MM, De Souza Silva JL, Villalva MG, Lins MPF. 2019. Performance analysis of a Solar Photovoltaic Power Plant. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America), September 15-18, Gramado, Brazil, pp: 1-5, <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2019.8894937>.
- Çelebi G. 2002. Bina düzeyi kabuğunda fotovoltaik panellerin kullanım ilkeleri. *Gazi Üniv Müh Mim Fak Derg*, 17(3): 17-33.
- Çiftçi F. 2016. Güneş enerji sistemlerinde farklı cins panellerle maliyet ve güç analizinin yapılması. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, pp: 96.
- ÇŞİDB. 2023. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü İstatistik Verileri URL: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=KASTAMONU> (erişim tarihi: 01 Aralık 2023).
- Dondariya C, Porwal D, Awasthi A, Shukla AK, Sudhakar K, Bhimta A. 2018. Performance simulation of grid-connected rooftop solar PV system for small households: A case study of Ujjain, India. *Energy Rep*, 4: 546-553. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.08.002>.
- EİGM. 2023. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü URL: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> (erişim tarihi: 19 Aralık 2023).
- ETKB. 2023. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Bilgi Merkezi URL: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (erişim tarihi: 19 Aralık 2023).
- Fisher B, Ghosal K, Riley D, Hansen C, King B, Burroughs S. 2014. Field performance modeling of Semprius CPV systems. 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conf., June 8-13, Denver, US, pp: 759-765.
- Freeman J, Whitmore J, Blair N, Dobos AP. 2014. Validation of multiple tools for flat plate photovoltaic modeling against measured data. IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, June 8-13, Denver, US, pp: 1932-1937.
- GEPA. 2023. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası URL: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (erişim tarihi: 19 Aralık 2023).
- Haydaroglu C. 2017. Dicle Üniversitesi güneş enerjisi santralının

- performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, Türkiye, pp: 109.
- Keskin E. 2012. Türkiye iklim koşullarında fotovoltaik güç sistemlerinin tasarımı ve maliyet analizi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, pp: 114.
- Kıyanççek E. 2013. Fotovoltaik sistemlerin boyutlandırılması için pvs2 paket programının gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, pp: 75.
- Lalwani M, Kothari DP, Singh M. 2010. Investigation of solar photovoltaic simulation softwares. *Int J Appl Eng Res Dindigul*, 3(1): 87-92.
- Milosavljević DD, Kevkić TS, Jovanović SJ. 2022. Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/ software based on case study. *Open Physics*, 20(1): 431-451. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0042>.
- Mohanty P, Muneer T, Gago EJ, Kotak Y. 2016. Solar radiation fundamentals and PV system components. In P. Mohanty, T. Muneer, & M. Kolhe (Eds.), *Solar Photovoltaic System Applications: A Guidebook for OffGrid Electrification*, Springer, Berlin, Germany, pp: 7-47. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14663-8_2.
- Pamuk N. 2023. Performance analysis of different optimization algorithms for MPPT control techniques under complex partial shading conditions in PV systems. *Energies*, 16(8): 3358.
- Pamuk N. 2024. Techno-economic feasibility analysis of grid configuration sizing for hybrid renewable energy system in Turkey using different optimization techniques. *Ain Shams Eng J*, 15(3): 102474.
- Raj A, Gupta M, Panda S. 2016. Design simulation and performance assessment of yield and loss forecasting for 100 Kw grid connected solar PV system. *Next Gener Comput Technol*, 3(5): 528-533.
- Sekçuloğlu SA. 2012. Fotovoltaik (PV), rüzgâr ve hibrit sistemlerin tasarımı ve ekonomik analizi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, pp: 120.
- Şimşek S. 2018. Fotovoltaik sistemlerde verimliliği etkileyen faktörlerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, pp: 147.
- Tozlu C. 2004. Muğla Üniversitesinde kurulu şebekeye bağlı fotovoltaik güç sistemlerinin performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, Türkiye, pp: 114.
- Yadav P. 2015. Simulation and performance analysis of a 1 kWp photovoltaic system using PVsyst. 2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), April 22-23, Melmaruvathur, India, pp: 358-363.