



Fotovoltaik Hücrelerin Panel Açılarına Göre Enerji Verimliliği

Energy Efficiency of Photovoltaic Cells According to Panel Angles

Reşit KARA¹ , Merve EKİCİ¹ , Gürcan YILDIRIM^{1*} 

¹Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 14100, Bolu, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 25/10/2023 Kabul/Accepted: 06/02/2024 Çevrimiçi Basım/Published Online: 30/06/2024
Son Versiyon/Final Version: 30/06/2024

Öz

Özellikle enerji üretim aşamasında çevreye verilen katı atıklar ve gaz emisyonlarına bağlı çevresel sorunlardan dolayı karşılaşılan iklim değişikliği insanları üzerinde ciddi endişelerin artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden, bilim insanlarının ve araştırmacıların insanlığın ihtiyacı olan enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik faaliyetleri önem kazanmıştır. Bilindiği üzere insanlık için dünyanın en büyük enerji kaynağı güneştir. Güneş enerjisi tükenmeyen enerji kaynağı olması ve çevreye zararı diğer enerji kaynaklarına göre daha az olması nedeniyle, günümüz dünyasında sürdürülebilir enerji kaynağı olarak en önemlisidir. Diğer tüm enerji kaynakları arasında en önemli alternatiflerden biridir. Günümüzde güneş enerjisi ısı enerji ya da elektrik enerji üretiminde kullanılan en büyük kaynaklardır. Fotovoltaik hücreler, güneşten gelen foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Fotovoltaik hücrelerin verimli bir şekilde çalışmasında panel açıları önemli rol oynar. PV modüllerinin eğim açısını optimize etmek ve doğrudan güneşe bakacak optimum şekilde yönlendirmek sistemlerden üretilen elektrik enerji miktarını pozitif olarak etkiler. Bu bağlamda, fotovoltaik hücrelerin panel açılarına göre çalışma prensibi ve bu ölçümler neticesinde enerji verimliliğine dair etmenler titizlikle incelenecektir. Bu çalışmada Bolu ilinde güneş enerjisinden optimum faydalanmak için gerekli olan panel eğim açılarının belirlenmesi gelecekte yatırım yapacak firmalara yol gösterici nitelikte olacaktır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, güneşin gün boyu hareketi ve mevsimsel değişimlerin enerji üretimine olan etkileri ve özellikle panel açılarının dinamik olarak radyasyona yönelmesi, fotovoltaik hücrelerin elektrik enerji üretim verimini arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıyeten, gelişmiş teknolojilerin kullanımıyla daha esnek ve adaptif fotovoltaik sistemlerin nasıl tasarlanabileceği de tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Fotovoltaik (PV) Paneller, Elektrik Üretimi, Enerji Verimliliği, Sıcaklık”

Abstract

Climate change causes serious concerns for human beings due to environmental problems related to solid waste and gas emissions released into the environment during especially energy production phase. Therefore, activities of scientists and researchers on renewable energy sources have gained importance in producing the energy needed by humanity. As it is known, the world's largest energy source for humanity is the sun. Solar energy is the most important sustainable energy source in today's world as it is an inexhaustible energy source and is less harmful to the environment than other energy sources. It is one of the most important alternatives among all other energy sources. Today, solar energy is one of the largest sources used in the production of heat energy or electrical energy. Photovoltaic cells are systems that convert photon energy from the sun into electrical energy. Panel angles play an important role in the efficient operation of photovoltaic cells. Optimizing the tilt angle of the PV modules and optimally orienting them to face the sun positively affects the amount of electrical energy to be produced from the systems. In this context, the working principle of photovoltaic cells according to panel angles and the factors related to energy efficiency as a result of these measurements will be examined meticulously. In this study, determining the panel inclination angles required to make optimum use of solar energy in Bolu will be a guide for companies that will invest in the future. In line with the results obtained, it is observed that the effects of the sun's movement throughout the day and seasonal changes on energy production, and especially the dynamic orientation of the panel angles towards radiation, increase the electrical energy production efficiency of photovoltaic cells. Besides, it is also discussed how more flexible and adaptive photovoltaic systems can be designed with the use of advanced technologies.

Key Words

“Photovoltaic (PV) Panels, Electricity Generation, Energy Efficiency, Temperature”

1. Giriş

Dünya nüfusu yılda ortalama 28000 teravat-saat (TWh) enerji tüketmektedir. Nüfus artışının mevcut oranda artışa devam etmesi (2050 yılına kadar tahmini 9 milyar), teknolojinin gelişmesi, yaşam standartlarında iyileşme/gelişme ve özellikle ileri teknolojik araçların keşfi ile teknolojiye olan bağımlılığımızda ciddi artışlar, küresel nüfusun enerji talebi 45000 TWh'a yükseleceğini göstermektedir. Bilindiği üzere, küresel enerji talebinin önemli bir kısmının (yaklaşık %70) fosil hidrokarbon kaynaklardan (kömür, petrol ve doğalgaz) karşılanması, buhar makinesinin icadından bu yana var olan küresel ısınma sorununu tetiklemiştir (Güner, 2023). Sanayi devrimi öncesi yeryüzü yaklaşık olarak 13.5 °C iken artan sera gazlarının etkisiyle zaman içinde dünya sıcaklığı artmaya devam etmiş ve şu anda yaklaşık 14 °C civarındadır. Eğer enerji üretiminde yeni, sürdürülebilir (kullanılabilir, mevcudiyet ve uygulanabilir), yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynakları kullanılmaması durumunda yeryüzünün ısınmaya devam edecek olması insanlık için ciddi bir tehdit oluşturacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda, insanoğlunun 50 yıl sonra karşılaşılabileceği sorunların başında enerji sorunu olacağı aşikardır (Smalley, 2005). Özellikle Çin (iki haftada iki adet 500 MW'lık kömürle çalışan termik santral inşa eden) ve Hindistan gibi gelişmekte olan büyük nüfuslu ülkelerin enerji taleplerinin çok hızlı artması, mevcut koşulları zorlamaya (daha fazla hidrokarbon fosil yakıt tüketimine) neden olacaktır. Hidrokarbon esaslı kömür, petrol ve doğalgaz yakıtlarının tüketimi ve bu durumdan kaynaklanan küresel ısınma (yani iklim değişikliği), dünyada sürdürülebilir enerji gelişimine karşı önemli bir sorun oluşturmaktadır. Tartışılan sorunun çözümünün, enerji yönetimi başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanımı ile üstesinden gelineceği açıktır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyüğü, yılda toplam 174,000 TWh güneş ışınım enerjisine sahip güneştir. Bu yüzden enerji ve çevresel sorunlara çözüm bulmada başlıca kaynak olarak görülmektedir. Yılda 174,000 TWh ışınım enerji değerinin %20-%30'unun yansıma yoluyla kaybedilmesi durumunda, bu ışınım enerjisinden saatte 20 TWh enerji elde edilebilir. Diğer bir deyişle, saatlik enerji talebinin (3.5 TWh) şu anda var olan küresel enerji talebinden daha büyüktür. İşte tam da bu yüzden, hidrokarbon yakıt kullanımına dur demek için fotovoltaik (PV) enerji sistemlerinden elektrik enerjisi üretimine ihtiyaç duyarız (Branker ve ark., 2011a; Singh ve Singh, 2010; Pearce, 2002; Branker ve ark., 2011b; Fang ve ark., 2011). Yine, PV sistemlere kurulu enerji üretiminde daha fazla yer almasının nedenlerinden biri de üretilen enerjinin daha ucuza ve daha temiz olarak üretilmesidir (Karaağaç ve ark., 2020). Yani, PV sistemleri güneş ışığını herhangi bir katı/gaz emisyon vermeden ve herhangi bir kirletici madde oluşturmadan doğrudan elektrığe dönüştüren sistemlerdir. Fosil yakıtlar ile üretilen elektrik enerjinin çevreye verdiği zararlar düşünülürse, PV sistemlerin elektrik üretiminde kullanımı düşük karbonlu bir geleceğe geçişin önemli bir parçası olması kaçınılmazdır. Benzer olarak, ülkelerin PV sistemlerin kullanımı ile ülkelerin enerji arz güvenliğini artırıp ithal fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmada önemli rol oynar. Bu bağlamda, ülkelerin genel enerji üretimi görünümünde, sürdürülebilir kaynaklardan enerji üretimi, ülkelerin elini hem sosyal devlet olma (enerji çeşitliğine dayalı bir politika ile ülkede yaşayan vatandaşlar tarafından her ne zaman enerji talep edilirse arzın anında sağlanması) konusunda hem kalkınmada/gelişimde hem de evrensel çevre programı doğrultusunda rahatlatır.

Ayrıyeten, anlık dünyanın enerjisinin %63'ü fosil kaynaklardan, %26,5'i yenilenebilir enerji kaynaklarından ve %10,5'i de nükleer enerji sistemlerinden karşılanmaktadır. Buran görüleceği üzere fosil kaynakların kullanımı ile atmosfere, iklim değişikliğine neden olan, sera gazlarının salınımı sürekli olarak artmaktadır (Kocalmış ve Emikönel, 2021). Bu yüzden, hava kalitesini iyileştirme amacı ile hükümetler yönlerini yenilenebilir enerji kaynaklarına çevirmişlerdir. Kısaca, fosil yakıtların kullanılması ile kirletici maddelerin havaya salınmasına bağlı hava kalitesinde düşüş, canlıların solunum yolu rahatsızlıkları başta olmak üzere diğer sağlık sorunlarına neden olacaktır. Hidrokarbon kaynakların kullanılmasıyla karşılaşılabilecek diğer önemli bir sorun fosil kaynakların ömrünün sınırlı olup kısa zaman içerisinde tükenen olmasıdır. Bu yüzden fosil kaynakların kullanımının sürdürülebilirlik açısından önünde bulunan problemlerden biridir. Bunun yanı sıra, fosil yakıtların ücretlerinde hızlı değişimler ülkeleri gelir/gider dağılım politikalarını zorlamakta ve küresel krizlere neden olmaktadır. Ülkemizde kullanılan hidrokarbon esaslı kömür, petrol ve doğalgaz yakıtlarının %70'inden fazlasının ithal edildiği düşünülürse (hem enerji arzımız kesintilere karşı savunmasız hale gelir hem de ülkemiz üzerine 70 milyar dolardan fazla yük getirir) herhangi bir küresel kriz durumunda cari açık giderek artmakta ve ülkemizin gelir/gider dağılımları olumsuz etkilenmektedir. Ayrıyeten, karbon ticareti yapan ülkeler arasında ister istemez organik bir bağ oluşmakta bu da ithalatçı ülkelerin diplomatik karar alma noktasında zora sokmaktadır. Keza, PV sistemlerinin enerji üretiminde daha fazla kullanılmasıyla, fosil yakıtlara olan bağımlılık azalacaktır. Benzer olarak, ülkemiz daha kolay, doğru ve daha hür diplomatik kararlar alabilecek, sürdürülebilir politika için enerji çeşitliliğinde eli güçlenecek, fosil yakıtlardaki piyasa dengesizliğinden etkilenmeyecek ve daha temiz bir enerji geleceğine geçiş yapılmasına olanak sağlanacaktır. Böylece, ülkemiz enerjide kendi öz yeterliliğini sağlaması üzerine plan ve stratejisi geliştirip, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarını milli değere dönüştürülüp yerli ve milli kaynaklara dayalı dengeli bir portföy sağlayarak enerjide bağımsız, büyük ve güçlü bir ülke olacaktır. PV sistemlerinin diğer bir faydası da ülkemizde iş istihdamı sağlayıp ekonomik büyümeye katkı sağlamaktır. PV sistemlerine dayalı endüstrileri, ülke ekonomisinin büyüyen bir sektördür ve bu bağlamda imalat, kurulum ve bakım alanlarında istihdam yaratır. Böylece, PV sistemleri ülke ekonomisini güçlendirmeye ve daha sürdürülebilir bir gelecek yaratmaya yardımcı olabileceği aşikardır.

Ülke olarak 2013 yılından sonra hızlı güneş enerji santralleri kurulum sistemine geçse de özellikle son 2 yılda kurulu enerji güç santrallerimize hatırı sayılır yeni eklemeler yapılmıştır. Ancak, güneş enerji ışınım potansiyeli yüksek ülkemiz için yeterli değildir. Bu bağlamda tüm dünya ülkelerinde (gelişmiş, gelişmekte olan ve gelişmemiş) olduğu gibi ülkemizde de yeni, büyük güneş enerji santralleri kurulacaktır.

Bunun yanı sıra, gelişmekte olan ülkelerde, kırsal ve uzak bölgelere elektrik sağlamak için PV enerji sistemleri kurulmaktadır. Bu durum, gelişmekte olan ülkelerin eğitim ve sağlık gibi temel hizmetlere erişimin iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Benzer olarak, afete yatkın bölgelerde, elektrik kesintileri sırasında yedek güç sağlamak için PV sistemler kriz yönetimi için stepne görevini

görmektedir. Bu durum kritik altyapının korunmasına ve insanların güvende tutulmasına yardımcı olmaktadır. Sonuç olarak, PV enerji sistemleri, problemler karşısında çok yönlü ve güçlü bir teknolojidir. PV sistemlerinin maliyeti düşmeye devam ettikçe, bu temiz ve sürdürülebilir enerji kaynağının daha da yaygın olarak kullanılacaktır (Branker ve ark., 2011a).

Tüm avantajları doğrultusunda, PV kurulumları dünyanın her bölgesinde hızla büyümektedir. Hatta rüzgâr ve biokütle enerjisi ile birlikte güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarından en yaygın olarak kullanılan enerji türleridir (Koç ve Kaya 2015). Son yapılan eklemelerle, PV enerji sistemleri yenilenebilir enerji kapasitesi ilavelerinde hâkim konumdadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre küresel PV kurulum kapasitesi 2022 sonunda 1.185 gigawatt (GW) değerine kadar ulaştı. Bu değer küresel enerji kurulum kapasitesinin yaklaşık %15'ini ve yenilenebilir enerji kurulum kapasitesinin yaklaşık %27'sini temsil etmektedir. Ayrıca, bir önceki yıla nazaran PV kurulum kapasitedeki artış %24 olarak gerçekleşmiştir. Bu değer yenilenebilir enerji teknolojileri arasında en hızlı büyüme oranıdır. Çin, 2022 yılı sonu itibarıyla 306,9 GW kümülatif kapasiteyle PV kurulumunda dünya lideridir. İkinci sırada 95,2 GW ile ABD yer alırken, onu Japonya (74,2 GW), Almanya (58,5 GW) ve Hindistan (49,7 GW) takip etmektedir. Özellikle Çin, Hindistan ve Brezilya gibi gelişmekte olan ülkeler, artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak için PV enerji sistemlerine yoğun yatırım yapmaktadır. Ülkemizin kurulum gücü 2023 yılı Aralık ayı sonu itibarıyla yaklaşık 106.668 GW'a ulaşmıştır. Tüm kaynaklar arasında güneşe bağlı elektrik enerji kurulum gücü kapasitesi %10,6 olarak gerçekleşmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı). Dünyanın enerji sektöründe ilerlediği yönde ülkemiz de kendine ciddi bir yer almıştır. Benzer olarak PV sistemlerin enerji verimliliği üzerine de ülkemizin birçok bölgesinde birçok bilim insanı farklı materyaller üstüne çalışmalar yapmaktadır.

PV sistemlerin elektrik enerji ve elektrik akımı üretimi çalışma prensibine gelecek olursak, fotovoltaik hücrelerin yapısı, yarı iletken diyotların yapısına benzer ve çıkış karakteristiği de diyotlar gibi doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Daha detaylı olarak, PV hücrenin yapısı, silikon temel malzeme (substrate), P tipi (pozitif yük içerir) ve N tipi (negatif yük içerir) silikon katmanlar (birleşip elektrik alan oluşturur), deplasman bölgesi (P-N junction), metal elektrotlar ve antirefleks kaplamadan (yüzeğe düşen güneş radyasyonunun yansımaları azaltıp gelen fotondan daha fazla radyasyon emilimini sağlayıp verimi artırır) oluşmaktadır.

PV hücrelerin çalışma prensibini anlamak için özellikle önemli iki karakteristik bulunmaktadır: Bunlardan ilki, fotovoltaik hücre akımının gerilim değişimine göre olan I-V (akım-gerilim) karakteristiğidir. Bu karakteristik, fotovoltaik hücrenin çıkış akımının, üzerine uygulanan gerilime bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. İkinci önemli karakteristik ise PV hücre gücünün gerilime göre değişimi olan PV (güç-gerilim) karakteristiğidir. Bu karakteristik, PV hücrenin çıkış gücünün (güç = gerilim x akım) hücre üzerine uygulanan gerilime göre nasıl değiştiğini gösterir. PV karakteristiği, hücrenin en verimli çalışma noktasını belirlemek için büyük öneme sahiptir ve genellikle Maksimum Güç Noktası (MPP) olarak adlandırılan noktayı ifade eder. MPP, fotovoltaik hücrenin en yüksek verimlilikle güç ürettiği çalışma noktasını temsil eder. Bu iki karakteristik, PV hücrelerin performansını anlamak ve optimize etmek için kritik önem taşımaktadır. PV hücreler, güneş panelleri ve güneş enerjisi sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır, bu nedenle I-V ve PV karakteristikleri, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve verimliliğinin değerlendirilmesi açısından hayati öneme sahiptir. PV hücrelerin çalışma karakteristiklerini anlamak için, uçlarına ayarlı bir yük bağlayarak yükü minimum ve maksimum değer aralığında değiştiririz. Bu süreçte, hücrenin akım gerilim karakteristiğini (I-V karakteristiği) elde ederiz ve aynı zamanda açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) parametrelerini belirleyebiliriz.

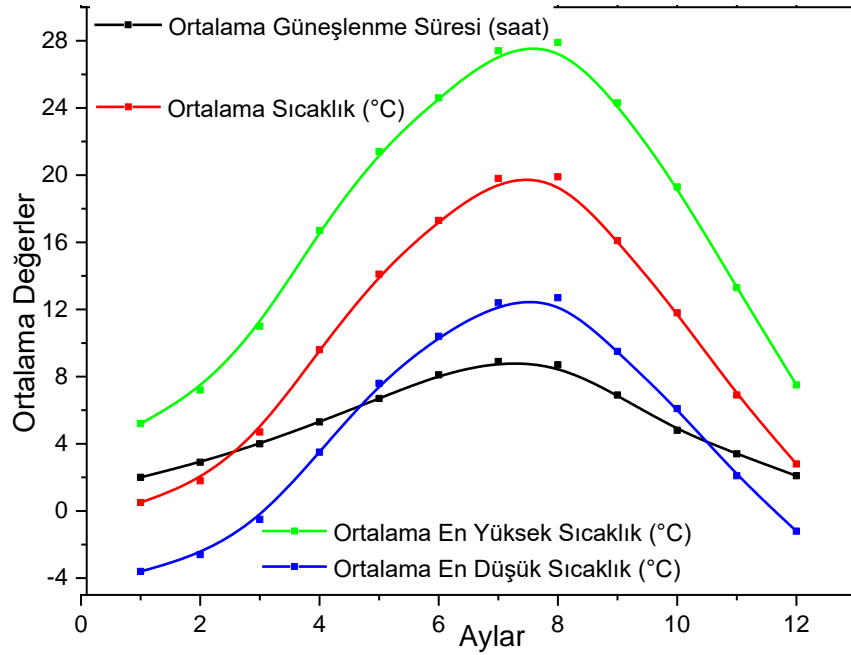
MPP, Fotovoltaik hücrenin en önemli çalışma noktasıdır. Bu bağlamda MPP, hücreden tüm yük durumlarında elde edebileceğimiz en yüksek güç değerini ifade eder. MPP'nin akım değeri I_{mpp} , ve gerilim değeri V_{mpp} olarak adlandırılır ve P-V karakteristiğinin I-V karakteristiğini kestiği noktada bulunur (Güner, 2023). Bu veriler, fotovoltaik hücrenin performansını değerlendirmek, güç verimliliğini optimize etmek ve en uygun çalışma koşullarını belirlemek için kullanılır. PV hücreler, güneş enerjisi sistemlerinde önemli bir rol oynar ve bu nedenle I-V karakteristiği ve P-V karakteristiği ile MPP, güneş enerjisi sisteminin tasarımı ve verimliliğinin artırılmasında kritik öneme sahiptir (Saraç, 2023).

Bilindiği üzere, panel açıları güneş ışını radyasyondan elde edilecek enerji değerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. PV sistemlerinden optimum faydalanmak için panel açılarının optimum değerini belirlemek önemlidir. Enerji verimliliğinde yapılan her iyileştirme, PV sistemlerin amortisman süresini kısaltmada önem arz eder. Bu çalışmada, PV hücrelerin panel açılarına göre çalışma prensibi ve bu ölçümler neticesinde enerji verimliliğine dair etmenler titizlikle incelenmiştir. İlk olarak, PV hücrelerin temel yapısı ve güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülme süreci belirlenerek panel açısının enerji verimliliğindeki rolü detaylı olarak vurgulanmıştır. Sonrasında, farklı panel açılarının (günün farklı zaman aralıklarında) PV sistemlerin performansına etkisi derinlemesine ele alınıp verimlilik açısından en uygun açıların belirlenmesindeki faktörler tartışılmıştır. Literatürde benzer çalışmalar ülkemizin Elâzığ, İstanbul, Sinop, İzmir, Şanlıurfa, Ankara, Mersin ve daha birçok farklı illeri için farklı enlem-boylamlarında yapılmıştır (Bakirci, 2012b; Şahin, 2019; Abed ve Al-Salami, 2022; Ulgen, 2006; Kacira ve ark., 2004). Yine dünyada benzer birçok çalışma görmek de mümkündür. Örneğin, Basra'da Al-Sayyab ve çalışma grubu 2019 yılında panel eğim açısının PV hücreleri enerji verimliliği üzerine çalışmalar yapmış ve buldukları sonuçları teorik simülasyonlarla değerlendirmişlerdir. Yapılan bu değerli çalışmada panel eğim açısının optimum değerinin 28° olduğunu beyan etmişlerdir (Al-Sayyab ve ark., 2019). Portekiz'in güneyinde 2018 yılında Conceição ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada panel açısının enerji verimliliği üzerine etkisini araştırmışlardır (Conceição ve ark., 2019). Yapılan çalışmada ekonomik analiz doğrultusunda optimum tasarımı belirlemişlerdir. Jacobson ve Jadhav 2018 yılında PV panellerin optimum eğim açısını enlem açısını üçüncü dereceden fonksiyonla belirlemişlerdir (Jacobson ve Jadhav, 2018).

2. Materyal ve Yöntem

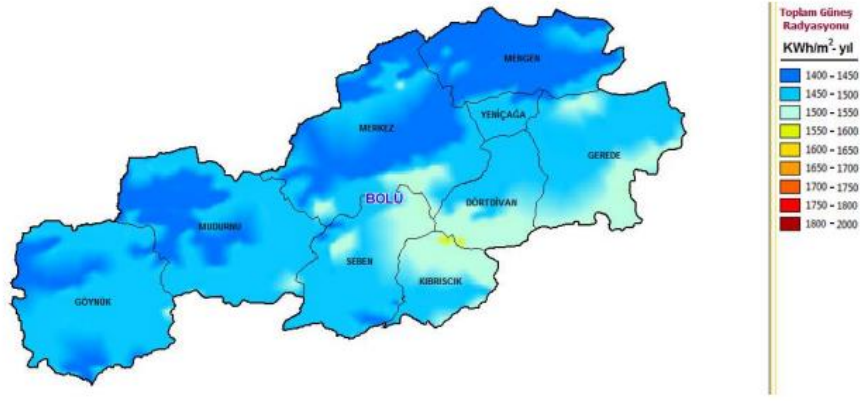
2.1 Materyal

Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyel Atlasına göre, güneş ışınım değerlerine göre ülkemiz 4 kuşağa ayrılmaktadır. Bu bağlamda ülkemizin en çok güneş alan bölgeler ile en az güneş ışınımı alan bölgeler arasındaki farkın az olduğu görülmüştür. Daha detaylı olarak, ülkenin güney yüzeyine, kuzeyine göre (kuzey yarımkürede olması yüzünden) daha fazla güneş radyasyon potansiyeline sahiptir (GEPA). GEPA'ya göre, ülkemizin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat (günlük ortalama 7,5 saat), ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1.527,46 kWh/m² olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, ülkemizin verimli güneşlenme süresine sahip olduğu beyan edilmiştir. GEPA'dan alınan verilere göre, Doğu Marmara TR42 bölgesinde bulunan Bolu ili ışınım olarak en düşük güneş alan 4. kuşakta yer alan ortalama 1.168 kWh/m².yıl değerine sahiptir (Aksungur ark., 2013). Bu değer ülkemizin genel ortalamasının altında olsa da çoğu Avrupa ülkesine göre oldukça yüksek değerlerdedir (Ayrancı, 2011). Bilindiği üzere, güneşten gelen ışınım enerjisi ülkelerin her bölgesine farklı açılarla ve farklı sürelerde düşer. Bu olay da ülkelerin güneş enerjisinden faydalanma durumlarında değişiklik meydana getirir. Aşağıdaki şekilde Bolu iline ait 1929-2022 yılları arası aylık ortalama sıcaklık (°C), ortalama en yüksek sıcaklık (°C), ortalama en düşük sıcaklık (°C) ve ortalama güneşlenme süreleri (saat) verilmiştir.



Şekil 1 Bolu'ya ait aylık ortalama sıcaklık (°C), ortalama en yüksek sıcaklık (°C), ortalama en düşük sıcaklık (°C) ve ortalama güneşlenme süreleri (saat).

Şekilden görüleceği üzere, Bolu'nun en düşük ortalama sıcaklık değeri Ocak ayı boyunca 0,5 °C olarak ölçülmüştür. Bu değer 1929-2022 yılları arasında Ağustos ayı boyunca en yüksek 19,9 °C olarak belirlenmiştir. Ortalama en yüksek sıcaklık değerleri ise yine Ağustos ayı boyunca 27,9 °C olarak tespit edilmiştir. Yine bu değer yaklaşık yüz yıllık ortalamada Ocak ayında 5,2 °C olarak bulunmuştur. Ortalama en düşük sıcaklık değerlerine gelince -3,6 °C olarak Ocak ayı boyunca hesaplanırken en yüksek ortalama değer 12,7 °C Ağustos ayında belirlenmiştir. Ortalama güneşlenme süresine gelindiğinde, en düşük ortalama güneşlenme değeri 2 saat olarak Ocak ayı boyunca görülürken bu değeri 2,1 saat olarak Aralık ayında gözlenmiştir. Bu süre 8,9 saat ortalama ile Temmuz ayında bulunmuştur. Bu değerlerin yıllık ortalama değerlerine bakıldığında ortalama sıcaklık değeri 10,4 °C, ortalama en yüksek sıcaklık değeri 17,2 °C olarak bulunmuştur. Buna karşın yıllık ortalama en düşük sıcaklık değeri 4,7 °C olarak bulunmuştur. Son olarak Bolu ili için yıllık ortalama güneşlenme süresi 5,3 saat olarak tespit edilmiştir (Anonim, 2023a). Bu değer Türkiye ortalamasının çok az altında kalmıştır. Bolu iline ait direkt ve difüz radyasyonun açık hava şartlarında hesaplan güneş ışınımı şiddeti yapılan istatistiksel analiz (HELIOSAT model) programlarına göre ortalama global güneş radyasyonu dağılımı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Bolu ili Ortalama Global Güneş Radyasyonu Dağılımı kWh/m².yıl değerleri (Anonim, 2023b)

Şekil 2'den açıkça görüleceği üzere Bolu ili merkez ilçesi 1500-1550 kWh/m².yıl civarındadır. Bu çalışmada alınan veriler 2023 yılı mayıs ayının farklı zamanlarında, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi'nde (NÜRDAM) 31 E 37 40 N 44 Enlem ve Boylam koordinatlarındaki, standart bir fotovoltaik panelden alınmıştır. Ünitinin hafta içerisindeki optimum eğim açısının karşılaştırmalı olarak belirlenmesi amacıyla günlük gözlem ve hesaplamalara göre PV 'inin farklı eğim (30°- 60° ve 90°) açılarında, güneydoğuya doğru 22,28° yönlendirilmiş konumda üretmiş oldukları enerjinin miktarı açısından, değişimleri arasında ne kadar fark olduğunu gösteren değerler hesaplanmıştır.

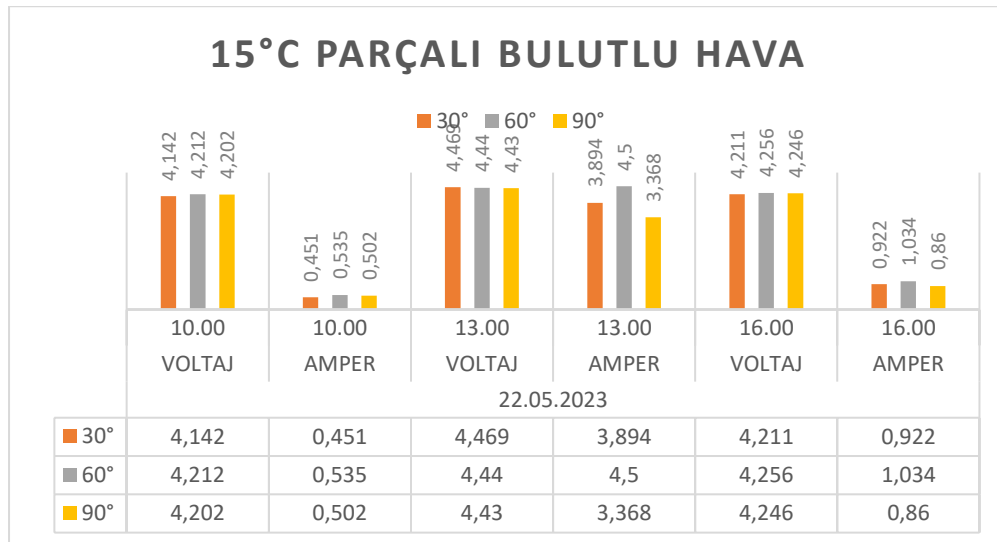
2.2 Metot

Bir fotovoltaik panel ünitesinin hafta içerisinde optimum eğim açısının karşılaştırmalı olarak belirlenmesi amacıyla günlük (30°- 60° ve 90°) eğim açıları ve havanın durumuna bağlı olarak akım ve voltaj değerleri, 10.00-13.00 ve 16.00 saatlerinde ayrı ayrı ölçülüp değerler Excel' e kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler tablo haline getirilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada fotovoltaik sistemlerin performansını doğrudan etkileyen panel açılarının fotovoltaik hücreler tarafından üretilen elektrik enerji verimi üzerine etkilerini araştırdık. Çalışmada mayıs ayı tercih edilmesinin nedeni, Bolu ilinin son 94 yıl (1929-2022) ortalama güneşlenme süresi 6,7 saat, ortalama sıcaklık 14,1 °C ve ortalama güneşlenme süresi 6,7 saat olması ile idealdir. Fotovoltaik hücrelerden elde edilen enerji verileri aşağıdaki Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 1 Fotovoltaik hücrelerden elde edilen enerji değerleri 1.ölçüm günü



Yukarıdaki tabloda, 22.05.2023 tarihinde gerçekleştirilen fotovoltaik enerji tabanlı elektrik ölçümlerini ve saatlere göre hava durumu verileri verilmiştir. Tablodan açıkça görüleceği üzere, belirli saat dilimlerinde güneşten gelen ışıma enerjisine bağlı olarak üretilen ölçümler elektriksel değerlerinin anlık ışıma değerleri ile (hava durumunun) ilişkisini incelenmiştir.

3.1.1 Elektriksel Değerlerin Saatlere Göre Değişimi

Tablodaki verilere göre, saatlere göre elektriksel değerlerde belirgin değişimler gözlemlenmektedir. Özellikle, voltaj ve amper değerleri arasındaki farklar, anlık hava şartlarına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Bu durum, güneş ışığındaki değişimler, elektrik tüketimindeki farklılık veya güneş panelleri gibi kaynakların performansındaki dalgalanmaların etkilerini yansıtmıştır.

3.1.2 Hava Durumunun Elektriksel Değerlere Etkisi

Farklı saatlerdeki hava durumu değişikliklerinin, elektriksel değerler üzerinde etkisi gözlenmektedir. Örneğin, bulutlu bir hava durumu güneş panellerinin performansını etkileyerek, elektrik voltaj ve amper değerlerinde ciddi azalmalara yol açmıştır.

3.1.3 En Yüksek ve En Düşük Değerler

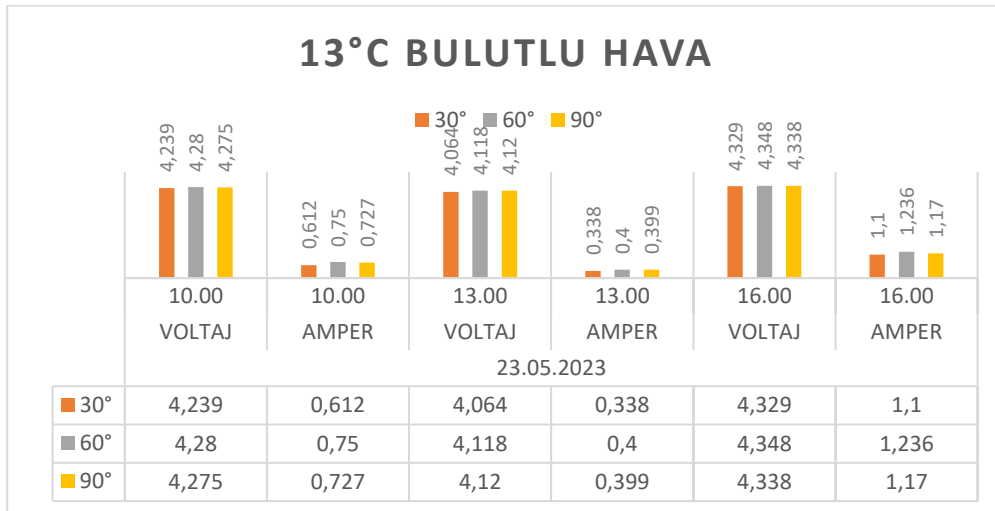
Tablodaki veriler dikkate alındığında saatlere göre en yüksek ve en düşük elektriksel değerler tespit edilebilmektedir. Bu değerler, enerji sistemindeki potansiyel problemleri veya performans zirvelerini belirlemek için önemli olabilir. Tabloya baktığımızda en yüksek amper ve voltaj değerini saat 13.00 ve 30° aldığımızı gözlemleyebiliriz diğer yandan en düşük değer ise saat 10.00 ve 30° olduğunu gözlemlemek mümkün.

3.1.4 Saatlerin Enerji Talebine Etkisi

Farklı saatlerde farklı enerji talepleri olabileceği düşünülür. Örneğin, iş saatleri içinde enerji tüketimi genellikle daha yüksek olabilir. Bu durum, elektriksel değerlerdeki değişimleri etkileyerek, özellikle enerji talebinin yoğun olduğu saatlerde kaynakların performansını etkileyebilir.

Sonuç olarak, tabloda sunulan veriler, belirli tarih ve saatlerde yapılan elektrik ölçümleri ve hava durumu bilgileri arasındaki ilişkiyi analiz etmeye yöneliktir. Bu verilerin elde edildiği sistem ve analiz amaçları göz önünde bulundurularak daha kapsamlı yorumlar yapılabilir. Elektrik sistemi performansının anlaşılması ve enerji talebi yönetimi açısından bu tür analizlerin önemi büyüktür.

Tablo 2 Fotovoltaik hücrelerden elde edilen enerji değerleri 2.ölçüm günü



Tablodaki yeni verileri önceki verilerle karşılaştırarak, 23.05.2023 tarihinde yapılan ölçümlerde elektriksel değerlerde farklılıkların görüldüğü gözlemlenmektedir. Karşılaştırmaya dayalı olarak bazı dikkate değer noktalar şunlardır:

3.2.1 Voltaj ve Amper Değerleri

Önceki tabloya göre, 23.05.2023 tarihindeki ölçümlerde voltaj ve amper değerlerindeki değişimler farklılık göstermiştir. Özellikle saat 10:00'da önceki tabloda voltaj değerleri 4,142 V, 4,212 V ve 4,202 V iken, yeni tabloda bu değerler sırasıyla 4,239 V, 4,28 V ve 4,275 V olarak kaydedilmiştir. Aynı şekilde, saat 13:00 ve 16:00'daki voltaj değerleri değişimleri de gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, amper değerlerinde de farklılıklar görülmektedir.

3.2.2 Saatlerin ve Açılarının Etkisi

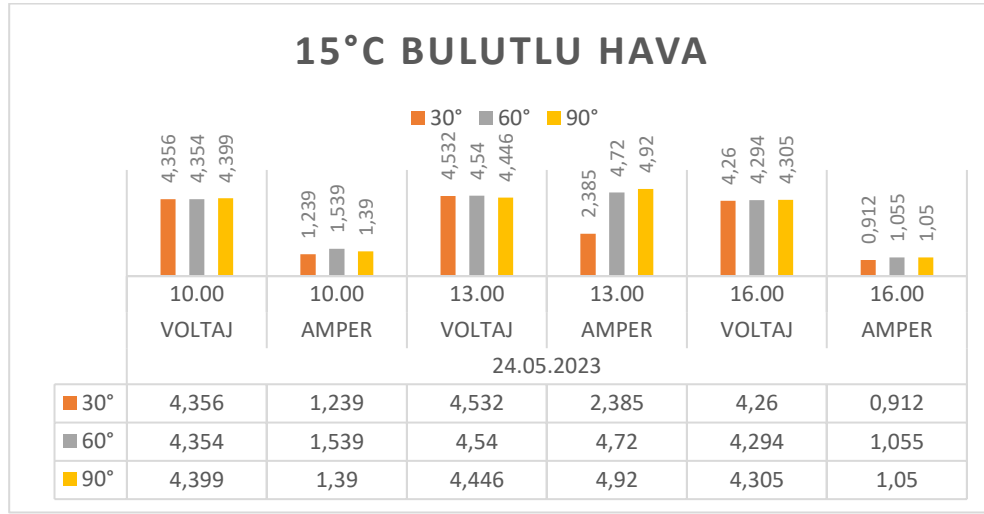
Karşılaştırmaya göre, saatlerin ve açıların elektriksel değerler üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir. Farklı saatlerdeki ölçümlerde, açılarla birlikte voltaj ve amper değerlerinin değiştiği açıkça görülmektedir. Bu durum, özellikle güneş panellerinin etkinliği ve güneş ışığı yoğunluğunun değişimi gibi faktörlerin elektriksel performansı etkilediğini göstermiştir.

3.2.3 Hava Durumunun Etkisi

Tablodaki verilere göre, önceki tabloda olduğu gibi 23.05.2023 tarihindeki ölçümlerde de hava durumunun elektriksel değerleri etkilediği görülmektedir. Özellikle saat 10.00'daki ölçümlerde bulutlu bir hava durumuna bağlı olarak voltaj ve amper değerlerinde artış olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, tablodaki yeni verilere göre, 23.05.2023 tarihinde yapılan ölçümlerde voltaj ve amper değerlerindeki farklılıkların saatlere ve açılara bağlı olarak değiştiği gözlemlenmektedir.

Tablo 3 Fotovoltaik hücrelerden elde edilen enerji değerleri 3.ölçüm günü



Yukarıdaki tablodaki veriler, 24.05.2023 tarihinde saat 10:00, 13:00 ve 16:00 olmak üzere üç farklı zaman diliminde yapılan elektrik ölçümlerini içermektedir. Aynı zamanda hava durumu verileri de tabloda yer almaktadır.

3.3.1 Elektriksel Değerlerin Saatlere ve Açılara Göre Değişimi

Önceki tablolara kıyasla, 24.05.2023 tarihindeki ölçümlerde voltaj ve amper değerlerinde yine belirgin değişimler gözlemlenmektedir. Saatler ilerledikçe ve açılar değiştikçe, voltaj ve amper değerlerinde önemli ölçüde farklılık görülmektedir.

Saat 10.00'a bakıldığında, 30° açısında voltaj değeri 4,356 V ve amper değeri 1,239 A iken, 60° açısında voltaj 4,354 V ve amper 1,539 A'dir. 90° açısında ise voltaj 4,399 V ve amper 1,39 A'dir.

Saat 13.00'te, 30° açısında voltaj değeri 4,532 V ve amper değeri 2,385 A iken, 60° açısında voltaj 4,54 V ve amper 4,72 A'dir. 90° açısında ise voltaj 4,446 V ve amper 4,92 A'dir.

Saat 16.00'ya gelindiğinde, 30° açısında voltaj değeri 4,26 V ve amper değeri 0,912 A iken, 60° açısında voltaj 4,294 V ve amper 1,055 A'dir. 90° açısında ise voltaj 4,305 V ve amper 1,05 A'dir.

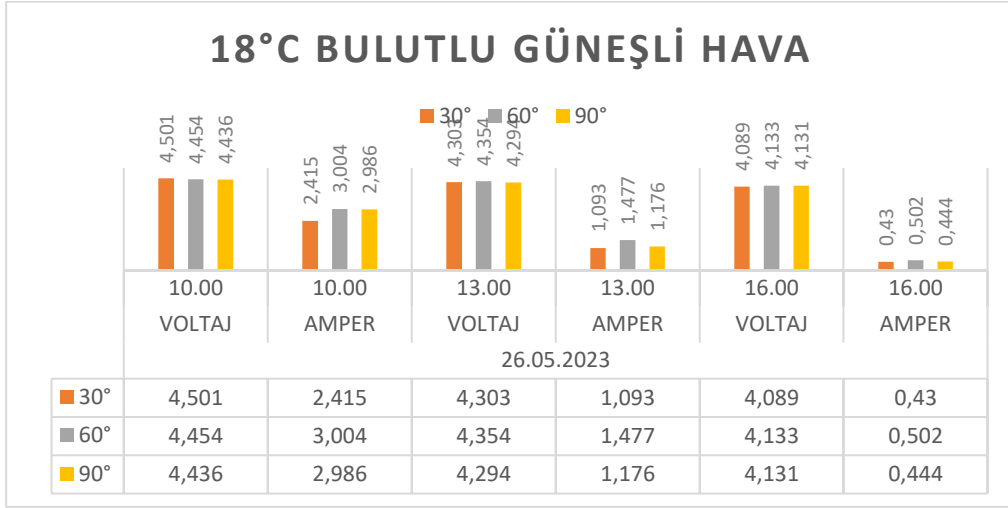
Görüldüğü gibi, saatlere ve açılara bağlı olarak voltaj ve amper değerlerindeki farklılıklar devam etmektedir.

3.3.2 Hava Durumunun Etkisi

Hava durumu verileri, elektriksel değerlerle ilişkilendirildiğinde, özellikle saat 13:00'de dikkat çeken bir durum vardır. Saat 13:00'de hava durumu "PARÇALI BULUTLU VE YAĞMUR" olarak belirtilmiştir ve bu saatteki elektriksel değerlerde yüksek voltaj ve amper değerleri kaydedilmiştir. Bu durum, yağmurun ve bulutlu hava koşullarının güneş panellerinin performansını etkilediğini

düşündürebilir. Özellikle yağmur, güneş panellerinin güneş ışığından yeterli ölçüde faydalanmasını engelleyebilir ve dolayısıyla elektriksel değerlerde bir artışa neden olabilir.

Tablo 4 Fotovoltaik hücrelerden elde edilen enerji değerleri 4.ölçüm günü



Tablodaki veriler, 26.05.2023 tarihinde saat 10:00, 13:00 ve 16:00 olmak üzere üç farklı zaman diliminde yapılan elektrik ölçümlerini içermektedir. Aynı zamanda hava durumu verileri de tabloda yer almaktadır.

3.4.1 Elektriksel Değerlerin Saatlere ve Açılara Göre Değişimi

26.05.2023 tarihindeki ölçümlerle önceki veriler arasında yapılan kıyaslamada, voltaj ve amper değerlerindeki değişimlerin devam ettiği görülmektedir. Saatler ve açılar, elektriksel değerler üzerinde önemli etkilere sahiptir.

Saat 10.00'a bakıldığında, 30° açısında voltaj değeri 4,501 V ve amper değeri 2,415 A iken, 60° açısında voltaj 4,454 V ve amper 3,004 A'dir. 90° açısında ise voltaj 4,436 V ve amper 2,986 A'dir.

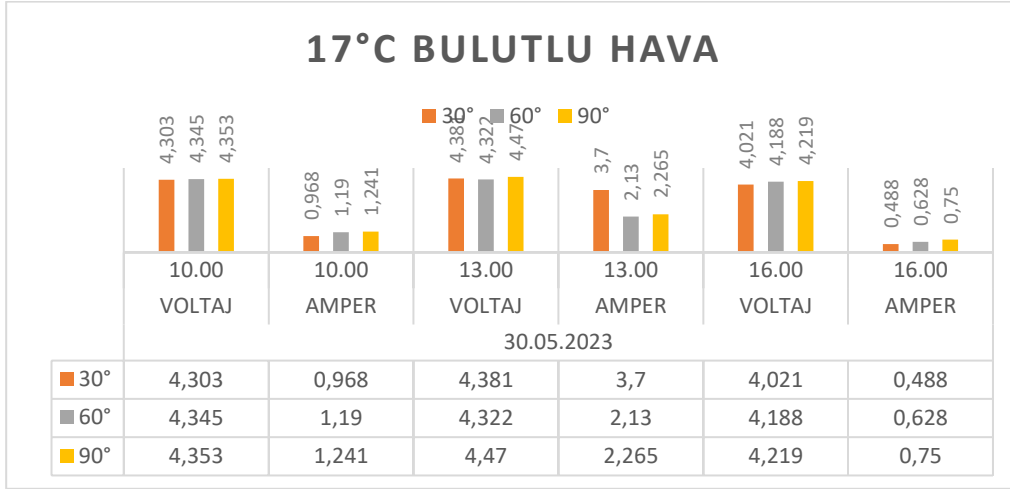
Saat 13.00'te, 30° açısında voltaj değeri 4,303 V ve amper değeri 1,093 A iken, 60° açısında voltaj 4,354 V ve amper 1,477 A'dir. 90° açısında ise voltaj 4,294 V ve amper 1,176 A'dir.

Saat 16.00'ya gelindiğinde, 30° açısında voltaj değeri 4,089 V ve amper değeri 0,43 A iken, 60° açısında voltaj 4,133 V ve amper 0,502 A'dir. 90° açısında ise voltaj 4,131 V ve amper 0,444 A'dir.

Görüldüğü gibi, saatlere ve açılara bağlı olarak voltaj ve amper değerlerindeki farklılıklar ve değişimler belirgin şekilde devam etmektedir.

3.4.2 Hava Durumunun Etkisi

26.05.2023 tarihindeki ölçümlerdeki hava durumu verilerine göre, saat 13:00'de "PARÇALI BULUTLU" ve saat 16:00'da "BULUTLU" hava koşulları kaydedilmiştir. Bu saatlerdeki hava durumunun, elektriksel değerlere etkisinin önceki yorumda bahsettiğimiz gibi güneş panellerinin performansını etkileyebileceği düşünülmektedir.

Tablo 5 Fotovoltaik hücrelerden elde edilen enerji değerleri 5.ölçüm günü

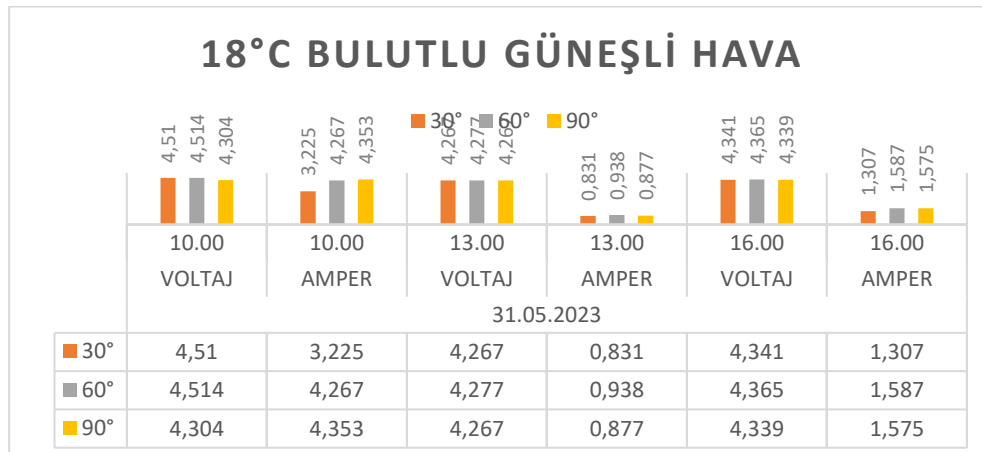
Güneş enerjisi, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, 24, 26 ve 30 Mayıs 2023 tarihlerinde yapılan güneş enerjisi ölçümlerini içeren tablolar, güneş enerjisinin saatlere ve açılara göre performansındaki değişimi incelemek amacıyla hazırlanmıştır.

3.5.1 Değerlendirme

Ölçüm verilerine göre, voltaj ve amper değerlerinin saatlere ve açılara bağlı olarak belirgin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Özellikle, saat 10.00' da yapılan ölçümlerde voltaj ve amper değerlerinin genellikle düşük olduğu gözlemlenirken, saatler ilerledikçe ve güneş ışığı yoğunluğu arttıkça bu değerlerin arttığı görülmektedir. Açılara göre ise, 60° ve 90° açılarında daha yüksek voltaj ve amper değerlerine ulaşıldığı fark edilmektedir. Bu sonuçlar, güneş panellerinin güneşe olan doğru açısı ile elektrik üretimi arasındaki doğrudan ilişkiyi ortaya koymaktadır.

Diğer taraftan, hava durumunun güneş enerjisi performansı üzerinde de etkisi olduğu gözlemlenmektedir. Tablolar incelendiğinde, bulutlu ve yağmurlu hava koşullarının, güneş panellerinin performansını olumsuz etkileyerek voltaj ve amper değerlerinde azalmalara neden olduğu görülmektedir.

Bu bulgular, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında ve yönetiminde dikkate alınması gereken önemli faktörleri vurgulamaktadır. Saatler ve açılar, güneş enerjisi üretimini optimize etmede önemli rol oynarken, hava durumu da sistem performansını doğrudan etkileyen bir faktördür.

Tablo 6 Fotovoltaik hücrelerden elde edilen enerji değerleri 6.ölçüm günü

31 Mayıs 2023 tarihindeki güneş enerjisi ölçümlerini içeren yeni tabloyu önceki verilerle kıyaslayarak yorumlayalım:

3.6.1 Güneş Enerjisi Performansındaki Değişimler:

Yeni tablodaki verilere göre, 31.05.2023 tarihinde yapılan güneş enerjisi ölçümlerinde de saatlere ve açılara bağlı olarak voltaj ve amper değerlerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir.

Saat 10.00'a bakıldığında, 30° açısında voltaj değeri 4,51 V ve amper değeri 3,225 A iken, 60° açısında voltaj 4,514 V ve amper 4,267 A'dır. 90° açısında ise voltaj 4,304 V ve amper 4,353 A'dır.

Saat 13.00'te, 30° açısında voltaj değeri 4,267 V ve amper değeri 0,831 A iken, 60° açısında voltaj 4,277 V ve amper 0,938 A'dır. 90° açısında ise voltaj 4,267 V ve amper 0,877 A'dır.

Saat 16.00'ya gelindiğinde, 30° açısında voltaj değeri 4,341 V ve amper değeri 1,307 A iken, 60° açısında voltaj 4,365 V ve amper 1,587 A'dır. 90° açısında ise voltaj 4,339 V ve amper 1,575 A'dır.

Görüldüğü gibi, 31.05.2023 tarihindeki ölçümlerde de voltaj ve amper değerlerindeki farklılıkların saatlere ve açılara bağlı olarak devam ettiği gözlemlenmektedir.

3.6.2 Hava Durumunun Etkisi

31.05.2023 tarihindeki ölçümlerdeki hava durumu verilerine göre, saat 10:00'da "GÜNEŞLİ", saat 13:00'da "ÇİSELEYEN YAĞMUR" ve saat 16:00'da "PARÇALI BULUTLU" hava koşulları kaydedilmiştir. Bu saatlerdeki hava durumunun, özellikle saat 13.00'daki çiseleyen yağmuru ve saat 16:00'daki parçalı bulutlu hava durumunun, güneş panellerinin performansını etkileyebileceği düşünülmektedir. Yağmur ve bulutlu hava koşulları, güneş panellerinin güneş ışığından yeterli ölçüde faydalanmasını engelleyebilir ve dolayısıyla elektriksel değerlerde azalmalara neden olabilir.

Sonuç olarak, 31.05.2023 tarihinde yapılan ölçümlerde voltaj ve amper değerlerindeki değişimlerin saatlere ve açılara bağlı olarak devam ettiği ve hava durumunun da elektriksel performansı etkileyebileceği görülmektedir.

Bu çalışmada, 22, 23, 24, 26, 30 ve 31 Mayıs 2023 tarihlerinde farklı saatlerde yapılan güneş enerjisi ölçümleri incelenmiştir. Her ölçümde, farklı açılarda (30°, 60° ve 90°) güneş panellerinin voltaj ve amper değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca, her ölçümün yapıldığı saatlerdeki hava durumu da kaydedilmiştir.

Elde edilen veriler, güneş enerjisi üretimi açısından saatlerin ve açılardan önemini vurgulamaktadır. Tablolar incelendiğinde, saatler ilerledikçe güneş panellerinin ürettiği voltaj ve amper değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Özellikle, saat 10:00'da yapılan ölçümlerde voltaj ve amper değerlerinin düşük olduğu, ancak saatler ilerledikçe ve güneş ışığı yoğunluğu arttıkça bu değerlerin arttığı görülmektedir. Bu durum, güneş panellerinin güneş ışığından yeterli ölçüde faydalanması için saat seçiminin önemini ortaya koymaktadır (Aksungur ark., 2013). Ayrıca, açılara göre yapılan ölçümlerde de farklı değerler elde edilmektedir. 60° ve 90° açılarda daha yüksek voltaj ve amper değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Bu nedenle, güneş panellerinin açısının doğru bir şekilde ayarlanması, enerji verimliliği açısından önemlidir (Ayrancı, 2011).

Hava durumunun da güneş enerjisi performansı üzerinde etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Tablolar incelendiğinde, bulutlu ve yağmurlu hava koşullarının güneş panellerinin performansını olumsuz etkileyerek voltaj ve amper değerlerinde azalmalara neden olduğu görülmektedir. Bu nedenle, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında ve yönetiminde hava durumu dikkate alınmalıdır (Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4, 2016).

Bu veriler, güneş enerjisi sistemlerinin daha verimli çalışması için çeşitli stratejilerin geliştirilmesini sağlayabilir. Örneğin, saatler ve açılar göz önünde bulundurularak güneş panellerinin optimal şekilde konumlandırılması, enerji verimliliğini artırabilir. Ayrıca, hava durumu tahminleri kullanılarak güneş enerjisi üretiminin planlanması, olumsuz hava koşullarında enerji kesintilerini minimize edebilir (Engin ve Pamuk, 2023)

Sonuç olarak, bu çalışma, güneş enerjisi üretimi için önemli olan saatler, açılar ve hava durumu gibi faktörlerin belirlenmesine ve güneş enerjisi sistemlerinin daha verimli kullanımı için stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (GEPA. 2023). Güneş enerjisi potansiyel atlas). Güneş enerjisi, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak gelecekteki enerji taleplerini karşılamak için önemli bir potansiyele sahiptir ve bu tür çalışmaların sürdürülmesi, sürdürülebilir enerji dönüşümünün hızlanması için büyük önem taşımaktadır.

4. Sonuçlar

Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren PV panellerde kullanılan yarı iletken malzemeler, son dönemlerde gelişim kaydetmiştir. Ancak, PV panellerin verimliliği hala geliştirilmeye açıktır. Verimliliği etkileyen birçok faktör bulunmaktadır, bunlar; panel eğim açısı, gölgelenme, tozlanma, güneş ışınım şiddeti, sıcaklık ve kablolama kayıplarıdır. Güneş ışınım şiddeti ve panel sıcaklığı ise, panel verimine en önemli etki eden parametreler arasında yer almaktadır.

PV panelin yüzeyine düşen güneş ışınım şiddeti, panelin kurulduğu konumun coğrafi konumu ve gün içindeki zaman dilimlerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu nedenle, güneş ışınım şiddeti, panelin ürettiği gücü doğrudan etkiler ve düşük güneş ışınımı, panel verimini azaltır (Kocalmış Bilhan ve Emikönel S. 2021).

Ayrıca, panel sıcaklığı ile panel gücü arasında ters bir ilişki vardır; yani, ortam sıcaklığı arttıkça panelin verimliliği düşer. Yüksek sıcaklıklar, yarı iletken malzemenin elektriksel performansını olumsuz etkileyerek verim kaybına neden olur (Karaağaç ark., 2020).

Gelecekteki araştırmalar, daha geniş veri setleriyle bu ilişkilerin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine ve güneş enerjisi sistemlerinin daha verimli çalışmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretiminin artırılması ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması için güneş enerjisi sistemlerinin daha yaygın olarak kullanılmasına yönelik politikaların geliştirilmesi de önemlidir (Koç ve Kaya, 2015). Bu şekilde, sürdürülebilir enerjiye olan geçiş hızlandırılabilir ve çevresel etkileri azaltılabilir. PV panellerin verimliliğini artırmak için, panelin eğim açısı ve kurulum yeri dikkatlice seçilmeli, gölgelenmeye dikkat edilmeli, panellerin düzenli olarak temizliği sağlanmalı ve verimi düşüren kablo kayıplarına önlem alınmalıdır. Ayrıca, yarı iletken malzemelerdeki teknolojik gelişmelerin izlenmesi ve uygulanması, PV panellerin daha verimli hale gelmesine katkı sağlayacaktır. (Bilgili ve Dağtekin, 2017).

Referanslar

- Abed, F. ve Al-Salami, Q. H. (2021). Calculate the best slope angle of photovoltaic panels theoretically in all cities in Turkey. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(10), 9639–9654. doi:10.1007/s13762-021-03797-y
- Aksungur, K.M., Kurban, M. ve Filik, Ü. (2013). Türkiye'nin Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*.
- Anonim. (2023a). T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı/Meteoroloji Genel Müdürlüğü. URL: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=BOLU> (Erişim tarihi: 25 Ocak 2024).
- Anonim. (2023b). T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı/Meteoroloji Genel Müdürlüğü. URL: https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx?il=bolu (Erişim tarihi: 25 Ocak 2024).
- Anonim. (2023c). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik#:~:text=2023%20y%C4%B1%C4%B1%20Aral%C4%B1k%20ay%C4%B1%20sonu,s%C4%B1%20ise%20di%C4%9Fer%20kaynaklar%20%C5%9Feklinindedir.> (Erişim tarihi: 25 Ocak 2024).
- Ayrancı, E. (2011). TR42 Doğu Marmara Bölgesi Yenilenebilir Enerji Raporu, MARKA Kalkınma Ajansı, Kocaeli.
- Bakirci, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6149–6159. doi:10.1016/j.rser.2012.07.009
- Banker, K. Pathak, M.J.M. Pearce, J.M. (2011a). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 15 (9), 4470-4482.
- Banker, K., Shackles, E., J.M. Pearce, (2011b). Peer-to-peer financing mechanisms to accelerate renewable energy deployment *J. Sustain. Finance Invest.*, 1 (2), 38-155.
- Bilgili, M. E. ve Dağtekin, M. (2017). Fotovoltaik Piller ile Elektrik Üretiminde Uygun Eğim Açısının ve Yıllık Oluşan Enerji Farkının Belirlenmesi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 156-167.
- Conceição, R., Silva, H. G., Fialho, L., Lopes, F. M. ve Collares-Pereira, M. (2019). PV system design with the effect of soiling on the optimum tilt angle. *Renewable Energy*, 133, 787–796. doi:10.1016/j.renene.2018.10.080
- Engin, A. Y. ve Pamuk, N. (2023). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Farabi Yerleşkesindeki Elektrik Enerjisi İhtiyacının Güneş Enerjisi Santralleri Kurularak Elde Edilmesi ve Ekonomik Analizi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 173-184. doi.org/10.34248/bsengineering.1271586

Fang, K., Uhan, N., Zhao, F., Sutherland, J.W. (2011). A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction, *J. Manuf. Syst.*, 30 (4) 234-240.

GEPA. 2024. Güneş enerjisi potansiyel atlası. T.C. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. URL: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (erişim tarihi: 25 Ocak 2024).

Güner, E., Iğdır İlinde Güneş Enerjisi Uygulamaları için Optimum Panel Eğim Açısının Belirlenmesi, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(4), 2905-2914, 2023

Jacobson, M. Z. ve Jadhav, V. (2018). World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. *Solar Energy*, 169, 55–66. doi:10.1016/j.solener.2018.04.030

Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y. ve Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in SANLIURFA, Turkey. *Renewable Energy*, 29(8), 1265–1275. doi:10.1016/j.renene.2003.12.014

Karaağaç MO, Oğul H, Bardak S. 2020. Kanatlı hayvan çiftliği için güneş enerji sisteminin tasarımı ve maliyet hesabı. *Düzce Üniver Bilim Teknol Derg*, 8(1), 712. <https://doi.org/10.29130/dubited.490154>.

Kocalmış B.A. ve Emikönel S. (2021). Nevşehir ili güneş enerji potansiyelinin analizi ve kurulu güneş enerji santralleri, *Avrupa Bilim Teknol Derg*, 24: 289-294. <https://doi.org/10.31590/ejosat.900024>.

Koç, E. ve Kaya, K. (2015). Enerji kaynakları-yenilenebilir enerji durumu. *Müh. Mak*, 56, 36-47.

Kurak, E., Erdemir, V. ve Dursun, B. (2016). PV Sistemin İçin Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Tasarımı ve Uygulaması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4, 581-592

Pearce, J.M. (2002). Photovoltaics -a path to sustainable futures, *Futures*, 34 (7), 663-667

Selim Saral, Y. (2023). Fotovoltaik panel verimliliği ve maksimum güç noktası izleme. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 18 (67), 1-25. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/abmyoder/issue/79061/1291377>

Shaker, A.K., Al-Sayyab, Z.Y., ve Al Tmari, M.K. (2019). Taher Theoretical and experimental investigation of photovoltaic cell performance, with optimum tilted angle: Basra city case study. *Case Stud. Therm. Eng.*, 14, 100421, 10.1016/j.csite.2019.100421

Singh, P.P., Singh, S. (2010). Realistic generation cost of solar photovoltaic electricity, *Renewable Energy*, 35 (3), 563-569

Smalley, R.E. (2005). Future Global Energy Prosperity: The Terawatt Challenge. *MRS*.

Şahin, M. (2019). Determining optimum tilt angles of photovoltaic panels by using artificial neural networks in Turkey. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 26(3). doi:10.17559/tv-20160702220418

Ulgen, K. (2006). Optimum tilt angle for solar collectors. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28(13), 1171–1180. doi:10.1080/00908310600584524