

conditions in Turkey. As a result of the analysis, it is observed that Antalya province with high solar radiation value shows superior performance with 1806 MWh PV energy production.

Keywords: Photovoltaic system, grid-connected, power generation

ToCite: İZGİ, E., & ÖZCAN, Ö., (2020). ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK ÇATI SİSTEMİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 127-140.

GİRİŞ

Sanayi devriminde, buhar gücü ile işleyen makineler ve araçların yerini elektrikli ve benzinli makinelerin almasıyla ekonomik büyüme sürecinde ihtiyaç duyulan en önemli üretim faktörlerinden biri enerji olmuştur (Recepoglu ve ark., 2020). Enerji gereksiniminin çoğu, kömür, petrol gibi fosil yakıtlardan ve nükleer enerjiden sağlanmaktadır (Akcan ve ark., 2020). Fakat yürürlükte olan enerji politikaları ve çevresel duyarlılığın artması ile yenilenemeyen fosil kaynaklar ve nükleer enerji ciddi ve tehlikeli boyutlarda çevre sorunlarına yol açmakta ve bu kaynakların kullanımının azaltılması yönündeki çalışmalar hız kazanmaktadır (Koç & Kaya, 2015). Alternatif enerji kaynaklarının, fosil yakıt kullanımının azaltılmasında önemli bir yeri vardır. Alternatif enerji kaynakları, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyokütle enerjisi, hidrojen enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, dalga enerjisinden oluşan su gücü enerjileri ile füzyon enerjisi olmak üzere doğada bol bulunan ve kendini sürekli olarak yenileyen kaynaklardır (Erdoğan, 2020). Bu kaynaklar arasında özellikle güneş enerjisi, potansiyeli, kullanım kolaylığı, temizliği, yenilenebilirliği ve çevre dostu olması gibi nedenler ile diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre bir adım öne çıkmaktadır (Varınca & Gönüllü, 2006). Dünyamız için temiz ve tükenmez bir enerji kaynağı olan Güneş'ten kullanılabilir enerji üretmek için birçok yöntem vardır. Yaygın olarak kullanılan PV hücre teknolojisi ile fotovoltaik hücre, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür (Aksangör ve ark., 2019). Güneş enerji santrali tasarlanırken, sistemin kurulacağı yerin coğrafi yapısı, kurulması planlanan yapının arazi şartları, bu yerin güneşlenme potansiyeli, kullanılacak fotovoltaik panel ve inverter verimleri gibi pek çok dikkat edilmesi ve araştırılması gereken önemli kriterler vardır (Ozdemir ve Sahin, 2018; Akkas ve ark., 2017). Tasarlanacak güneş enerji santralinde yer ve ekipman seçiminin önemli olması kadar, PV sistem kurulmadan önce, modelleme yoluyla bir ön çalışma yapılması, sistemin kurulacağı ortam şartlarında maksimum enerji üretiminin hangi koşullarda gerçekleşeceğinin belirlenmesi de son derece önemlidir. Bu sayede üretilecek enerji miktarı tahmin edilmekte ve yatırım kararları alınmaktadır. Simülasyon programının doğru performansı vermesi ve analiz yeteneği de son derece önemlidir (Haydaroglu & Gümüş, 2016). PVsyst ve PV*SOL gibi dünya çapında birçok kullanıcısı olan gelişmiş simülasyon programları sayesinde, detaylı incelemeler yapmak, gerçeğe yakın üç boyutlu sistemler tasarlamak ve mali analizler yapabilmek mümkün ve daha kolaydır.

Nikolaos M. Loulas ve arkadaşları (2012) çalışmalarında Yunanistan'ın kuzeyinde Selanik Belediyesi'nde yer alan bir blok seçerek, yapının ayrıntılı gölge analizini, Google Sketchup ve PVsyst programları ile değerlendirmişlerdir. Yapılan analiz sonucunda gölge gelmeyen alanlara güneş panellerini yerleştirerek PVsyst programı ile yıllık elektrik üretimini hesaplamışlardır (Loulas ve ark., 2012).

Vikrant Sharma ve S.S. Chandel (2013) Hindistan'ın Khatkar-Kalan şehrinde otuz altı adet 75 Wp gücünde polikristal modülden oluşan ve kurulu gücü 190 kWp güneş fotovoltaik enerji santralinin performans analizi üzerinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. PVsyst programı ile gerçekleştirdikleri analiz sonucunda sistemin yıllık performans oranı %74, yıllık ortalama ölçülen enerji verimi 823 kWh/kWp olarak bulmuşlardır. Işınım, sıcaklık, modül kalitesi, dizi uyumsuzluğu, omik kablolama ve inverterden kaynaklanan toplam tahmini sistem kayıplarını %31.7 olarak hesaplamışlarken, üretilen enerjinin Mart, Eylül ve Ekim aylarında maksimum ve Ocak ayında minimum olduğunu belirtmişlerdir (Sharma & Chandel, 2013).

Ilham Baghdadi ve arkadaşları (2018) yaptıkları çalışmalarında Fas'ın Tetouan eyaletindeki şebekeye bağlı 5.94 kWp gücündeki bir güneş fotovoltaik sistemini, PVsyst programını kullanarak üç PV teknolojisinin (amorf, mono-kristal ve poli-kristal) karşılaştırılmalı performans analizini sunmuşlardır. 2016 yılı boyunca toplanan verilere dayanarak üç teknolojiye elde edilen enerjiyi ve nihai verimi değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarla, her bir teknolojinin simüle edilmiş nihai veriminin, yılın tüm aylarında referans verimini yakından takip ettiğini göstermişlerdir ve mono-kristal teknolojiyi diğer PV teknolojiler ile karşılaştırdıklarında daha fazla enerji ürettiğini gözlemlemişlerdir (Baghdadi ve ark., 2018).

Chandrakant Dondariya ve arkadaşları (2018) çalışmalarında Hindistan'ın Ujjain şehrinde 6.4 kW_p şebekeye bağlı çatı güneş fotovoltaik tesisin fizibilitesini incelemiştir. PV*SOL yazılımını kullanarak, 20 adet 320 W_p nominal güçte mono-kristal silikon PV teknolojisinin enerji üretimini ve performans oranını belirlemiştir. Performans analizi ele alındığında, mono-kristal silikon yılda 1528.125 kWh / kW_p enerji üreterek, elektrik ihtiyacının yaklaşık % 41'inden fazlasını karşıladığını gözlemlemiştir (Dondariya ve ark., 2018).

Ramanan P. ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmalarında Güney Hindistan'ın Tamil Nadu şehrinde şebekeye bağlı poli-kristal silikon ve ince film panellerini içeren, fotovoltaik sistemin yıl boyunca gösterdiği performansları, PVsyst yazılımı tarafından ölçerek, gerçek ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Performans değerlendirmesi için kullanılan parametrelerin, dizi verimi, nihai verim, PV verimliliği, performans oranı ve kapasite kullanım faktörü olduğunu belirtmişlerdir. Ölçülen yıllık enerjiyi, poli-kristal için 1536.9 kWh olarak bulmuşlarken, ince film için 1698.4 kWh olarak hesaplamışlardır. Yıllık ortalama performans oranını poli-kristal ve ince film için sırasıyla %78.48 , %86.73 bulmuşlarken, ince film panellerin yüksek performans oranına sahip olması ile poli-kristal panellerden daha verimli bir çözüm olduğunu gözlemlemiştir (Ramanan & Karthick, 2019).

Hayder Ali ve Hassan Abbas Khan (2019) çalışmalarında Pakistan'daki Lahore Yönetim Bilimleri Üniversitesi'nde konumlandırılmış, poli-kristal ve ince film ile tasarlanmış 42 kW_p gücünde PV sistemin elektrik üretimini aynı çevresel koşullarda (ışınım, sıcaklık, yağış ve toz) PV*SOL programı ile simüle ederek değerlendirmişlerdir ve simüle edilmiş sonuçları bir yıllık ölçülen gerçek veriler ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, ince filmin yıllık enerji üretiminin poli-kristalden daha yüksek olduğunu ve ince filmin performans oranı açısından daha iyi bir seçim olduğunu göstermiştir. Maliyet analizi ele alındığında, poli-kristal panelin düşük elektrik maliyeti ile Pakistan'da daha uygulanabilir bir ticari çözüm haline getirildiği gözlemlenmiştir. Poli-kristal sisteminin uygulanması için gereken alan, ince film tabanlı sistemlerden önemli ölçüde daha düşüktür ve bu da alan kısıtlamaları olan alanlar için daha iyi bir çözüm haline gelmiştir (Ali & Khan, 2020).

Bu çalışma kapsamında Bölüm 2'de Google Sketchup programı tarafından sistemin gölge analizi yapıp, yapılan analizler sonucunda günümüzde uygulamada kullanılan farklı teknolojilere sahip üç fotovoltaik panel çeşidi ve ülkemizdeki üç farklı iklim koşulları altında santral sahasının şekli ve ölçüleri dikkate alınarak mevcut sistem, PVsyst ve PV*SOL programında 3 boyutlu olarak modellenir. Bölüm 3'de PVsyst ve PV*SOL programında modellenen gerçek sistemin, enerji üretimi, performans oranı ve gölgelenmeye bağlı enerji kayıpları ortaya konularak en optimum sonucu veren teknoloji ve lokasyon belirlenir. Son bölüm olan 4. Bölümde elde edilen sonuçlar teknik alanda karşılaştırmalı olarak değerlendirilir ve incelenir. Sonuçların değerlendirilmesi neticesinde PV sistemlerinin enerji üretim verimlilikleri hakkında önemli bilgilere ulaşırlar.

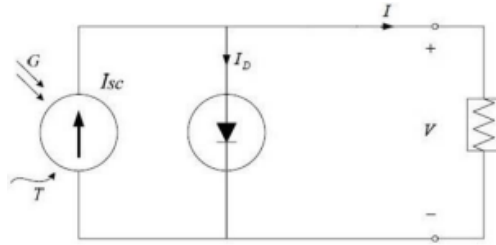
MATERYAL ve METOT

Güneş panelleri, güneş enerjisini doğrudan DC elektrik enerjisine çeviren güç sistemleridir. Fotovoltaik paneller, fotovoltaik hücrelerden oluşmaktadır (Sulukun, 2020). Yarı iletken bir diyot olarak çalışan tek bir PV hücreden elde edilen enerji oldukça azdır. Bu nedenle hücreler seri veya paralel bağlanarak modülleri (string), modüller de birleşerek panelleri oluştururlar. Büyük miktarlarda elektrik üretmek ve kullanılabilir düzeyde güç elde etmek üzere paneller birbirine paralel veya seri bağlanarak solar PV dizisini (array) meydana getirirler (Şekil 1) (URL 2) .



Şekil 1. Güneş Pili, Modül ve Dizi

Şekil 2’de PV hücrenin basitleştirilmiş eşdeğer devresi gösterilir (Yılmaz ve ark., 2012). PV hücresi ihmallerin göz önüne alınmadığı durumda, ideal bir akım kaynağı ve akım kaynağına paralel olan doğrultucu bir diyottan oluşur ve bu da PV hücrenin maruz kaldığı güneş ışınımına orantılı bir akım sağlar (Ünlü ve ark., 2015). Burada iki farklı durum oluşur. Birincisi kısa devre akımı, terminaller kısa devre edildiğinde akan I_{SC} ve ikincisi ise açık devre gerilimi, V_{OC} , açık devredeyken terminaller üzerinde oluşan gerilimdir. Kısa devre durumunda diyot gerilimi $V_d = 0$ olur. Bu durum, ideal akım kaynağındaki tüm akımın kısa devre terminallerinden geçtiği anlamına gelir.



Şekil 2. PV Sistemin Eşdeğer Devresi

Eşdeğer devrenin akım gerilim (I-V) denklemi, Kirchhoff’un akım kanununa göre yük üzerinden geçen akım :

$$I = I_{SC} - I_d \quad (1)$$

Aşağıda verilen diyot denklemi yerine koyulduğunda yüke giden akım,

$$I_d = I_s \times (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (2)$$

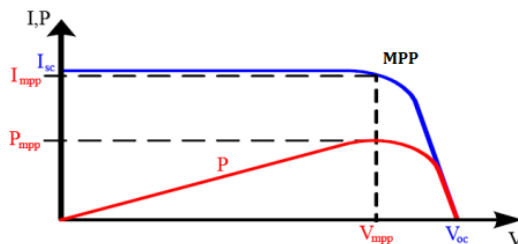
$$I = I_{SC} - I_s \times (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (3)$$

olur. Burada; I_s doyma akımı olup hücre gerilimi ise V olarak belirtilir; q olarak adlandırılan katsayı $1,6 \times 10^{-19}C$ olup, k katsayısı ise $1,38 \times 10^{-23} J/K$ olarak alınır. Ortam sıcaklığı ise T ile gösterilir. PV sistemlerin kontrolleri maksimum çıkış gücünün izlenmesi metoduna göre yapılırlar ve Şekil 3’te bir PV hücresinin akım-gerilim eğrisi gösterilir, çıkış gücü de belirtilir. Maksimum Güç Noktasında (MPP), hücre akımı (I_{mp}) ve hücre gerilimi (V_{mp}) maksimumdur ve PV hücresinin maksimum güç çıkışı ($P_{max} = I_{mp} * V_{mp}$) şeklindedir (Arıcı & Iskender, 2020). Bu prensibe göre PV modül sürekli olarak güç-gerilim eğrisi üzerindeki maksimum güç noktasına yakın değerlerde sistemi tutmaya çalışır (Akdeniz, 2006). FF; doldurma faktörüdür ve genelde hücre performansını göstermede kullanılır; denklem 4’te tanımlanır. Diğer anahtar parametreler ise kısa devre akımı olarak tanımlanan I_{SC} ve açık devre gerilimi olarak tanımlanan V_{OC} ‘dir. Açık devre gerilimi V_{OC} denklem 5’te gösterilir.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (4)$$

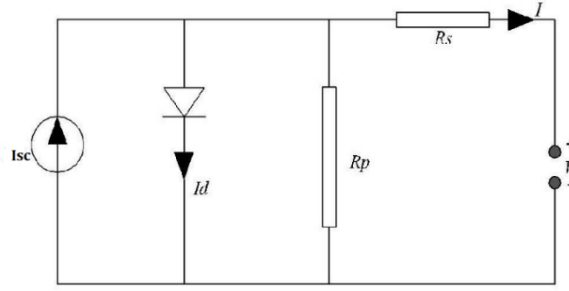
$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \times \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s} + 1\right) \quad (5)$$

PV hücresinin daha doğru bir eşdeğer devresine sahip olması için, Şekil 4’te gösterildiği gibi bir R_s (bağlantı noktalarındaki direnç olarak tanımlanan yarı iletken iç direnç) ile R_p (kaçak akımları temsil eden paralel direnç) eklenir (Atalay Ayran, 2019). R_p , yük taşıyıcıları yarı iletkenin elektrik kontaklarına doğru ilerlediğinde gerilim düşümünü temsil eder. R_s , hücreler arasındaki omik kayıpları temsil eder. Akım-gerilim eğrisi:



Şekil 3. PV Hücrenin Gerilim Değişimine Karşı Akım ve Güç Karakteristiği (Tek & Yıldırım, 2008).


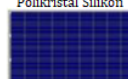

$$I = I_{sc} - I_s \left(e^{\frac{q(V+I \times R_s)}{kT}} - 1 \right) - \frac{V+I \times R_s}{R_p} \quad (6)$$



Şekil 4. R_p ve R_s Dirençli PV Hücre Eşdeğer Devresi

Günümüzde dünya çapında birçok ülkede farklı şirketler tarafından fotovoltaik modüller üretilmektedir. Fotovoltaik güneş pili üretiminde kullanılan yarı iletken özelliğe sahip silisyumun ham maddesinin kum olmasından dolayı yeryüzünde kaynak sıkıntısı çekmemektedir (Sayın & Koç, 2011).

Fotovoltaik hücreler temel olarak kristal silikon hücreler ve ince film hücreler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Kristal-silikon teknolojisinde tekli ve çoklu silikon kullanılır. Bu farklılık güneş pilinin üretiminde kullanılan silisyumun saflık derecesine göre yapılmaktadır. Mono-kristal güneş pilleri daha saf silisyuma sahiptir. Mono-kristal güneş pilleri, poli-kristal güneş pillerine göre daha verimli fakat daha maliyetlidir (Ceylan, 2018). Güneş enerjisini soğurma katsayısı daha iyi olan, ince-film güneş pilleri günümüzde yapıldıkları malzeme üzerinden; amorf silisyum, kadmiyum tellür, bakır indiyum selenür ve bakır indiyum galyum diselenür gibi çeşitler ile sınıflandırılmaktadır. Fotovoltaik teknolojilerin temel avantajlarının ve dezavantajların özeti Şekil 5'te gösterilir (Tamış, 2019).

PV TEKNOLOJİSİ	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
<p>Monokristal Silikon</p> 	<ul style="list-style-type: none"> Verimlilik Değerleri : %15-22 arası Kullanım süresi : yaklaşık 25 yıl kW Başına Gereken Alan (m^2) : 7 m^2 ile alanı verimli kullanma 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek maliyet Sıcaklığa karşı aşırı hassasiyet (ortam sıcaklığı arttıkça performans önemli ölçüde azalır.) Gölgeleme, kar ve kirliliğe karşı aşırı hassasiyet
<p>Polikristal Silikon</p> 	<ul style="list-style-type: none"> Kullanım süresi : yaklaşık 20 yıl Üretim maliyetleri düşük ve üretim süreci kolaydır. Yüksek ortam sıcaklığına yüksek tolerans 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük verimlilik : % 14-% 17 arası kW Başına Gereken Alan (m^2) : 8 m^2 ile Alanı verimsiz kullanma
<p>İnce Film</p> <ul style="list-style-type: none"> Amorf Silikon (a-Si) Kadmiyum Tellürde (CdTe) Bakır İndiyum Galyum Selenide (CIS/CIGS) 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük maliyet ve basit üretim süreci Esnek konfigürasyonu ile farklı kurulum uygulamaları Gölgeleme sorunu ve ortam sıcaklığı değişimleri için yüksek tolerans 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük Verimlilik: %6-13 arası kW Başına Gereken Alan (m^2): 10-15 m^2 ile Düşük alan verimliliği Yüksek bozunma oranı

Şekil 5. Farklı Fotovoltaik Teknolojilerin Avantaj ve Dezavantajları

Günümüz PV teknolojisinin geldiği noktada, PV modüllerin olumlu ve olumsuz yönleri farklı olduğu için potansiyel verimlilik ve fiyatları karşılaştırılarak herhangi bir PV kurulumu için en optimum seçenek olarak tek bir teknolojiyi seçmek zordur. Kristal hücre teknolojisi en verimli teknolojidir ancak ince film gibi az verimli teknolojiler daha iyi maliyet performans endeksi sunarlar (Obeng ve ark., 2020). Mono-kristal modüllerin hem modül seviyesi hem de sistem seviyesi watt başına maliyeti arttırdığından, yalnızca düşük hacimli üretim veya niş uygulamaları için uygundur. Ancak geniş alan modülleri, özellikle ince filmler, modül ve sistem seviyelerinde önemli tasarruf sağlama potansiyeline sahiptirler (Horowitz ve ark., 2017). Örneğin büyük ölçekli güneş enerjisi santrallerinde maliyetler öncelikli olması sebebiyle poli-kristal panellerin çok sıklıkla kullanıldığı görülmektedir diğer bir taraftan düşük verimliliğe rağmen ince film modüller, yer sorunu yoksa uygun bir seçenek olabilir. Uygun PV teknolojisinin seçimi, saha koşullarına ve sistemin maruz kalabileceği tüm olası sorunlara dayanmaktadır.

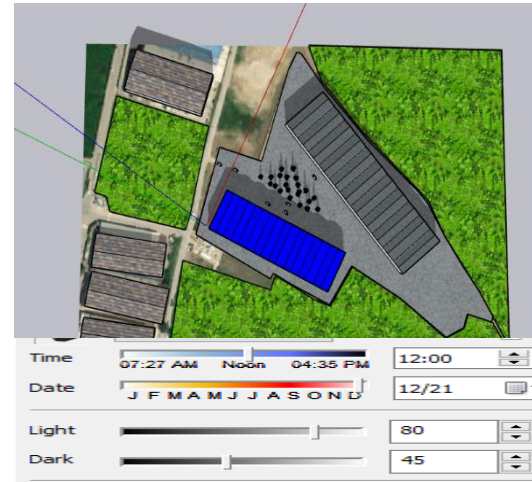
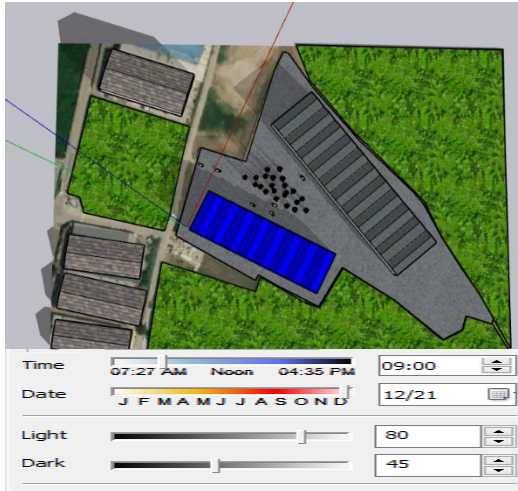
PV kurulumuna uygunluğunu incelemek için Bursa Organize Sanayi Bölgesi'nde bir fabrika seçilir. Şekil 6'da yapının Google Earth üzerinden alınan şehir içindeki bir görüntüsü mevcuttur (URL 1).



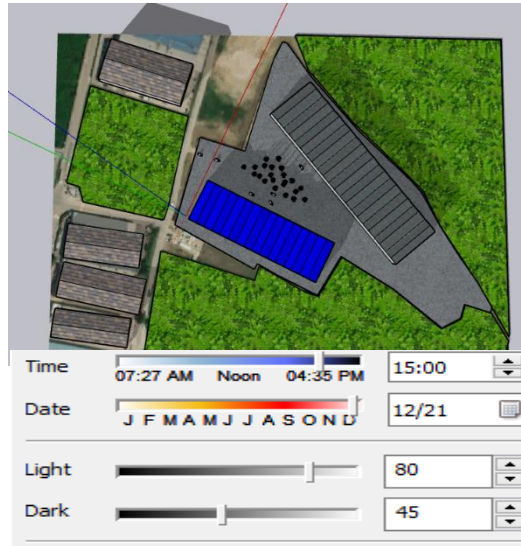
Şekil 6. Santralin Uydu Görünümü

Bu çalışma doğrultusunda, şebeke bağlantılı bir fotovoltaik sistem tasarlamak ve sistemin gölgelenme analizini yapmak için PVsyst ve Sketchup, performans analizini yapabilmek adına PVsyst ve PV*SOL simülasyon programları kullanılır. PVsyst'te ve PV*SOL'de hesaplamalar gerçekleştirilirken birçok farklı parametre ön plandadır. Bu parametreler ise meteorolojik veriler, ayrıntılı güneş ışınım değerleri, bölge kirlilik oranları, gölgelenme analizleri, güneş paneli yönü ve açısı, yer yansıma oranları (Albedo), güneş panellerinin yıllık güç düşümü oranları, yerleşim planları, güneş panelinin özellikleri ve inverterların özellikleridir. Bu çalışmanın ilk adımı olarak, Google Sketchup programında, güneş enerji santralının birebir ölçüleri kullanılarak üç boyutlu modeli tasarlanır. Binaların coğrafi enlemi, boylamı, yüksekliği ve yönelimi ile ilgili tüm veriler Google Earth'ten temin edilir.

Gölge analizi yaparken, tarih olarak genellikle 20\21\22 Aralık tarihlerinden birisi seçilir (Loulas ve ark., 2012). Bu tarihler bir yılın gölgesini ortalama olarak bize vermektedir. Hesaplama, 21 Aralık tarihi seçilerek saat 09:00 ile 15:00 aralığında gerçekleştirilir. 09:00 ile 15:00 arası zaman dilimi günün en efektif zamanıdır. Daha sonra çalışma alanının, PV kurulumu için mimari açıdan uygun yüzey olup olmadığı belirlenir. Mavi olarak belirtilen alan PV kurulumunun gerçekleştirileceği bölgedir.



Şekil 7. Yapının 09:00'da Oluşturduğu Gölge Efektini Şekil 8. Yapının 12:00'da Oluşturduğu Gölge Efektini



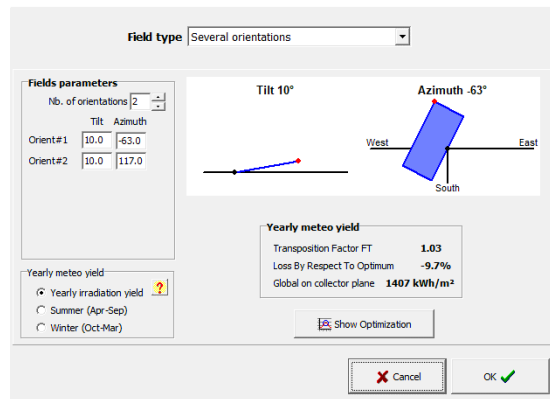
Şekil 9. Yapının 15:00'da Oluşturduğu Gölge Efekti

Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla yapıların 09:00'da, 12:00'da ve 15:00'da oluşturdukları gölgeler gösterilir. Simülasyon sonuçlarına göre, binaların buldukları konumlar neticesinde birbirlerini olumsuz yönde etkilemedikleri ve çalışma alanının PV kurulumu için uygun alan olduğu gözlemlenir.

Çalışmanın en önemli olan, bir sonraki aşaması, bir önceki aşamada gölge analizi yapılan mevcut alanlara kurulması ön görülen PV sistemlerinin simülasyonunu içerir. PV sistemin performans tahminini analiz etmek için PVsyst V6.8.6 ve PV*SOL 2020 premium kullanılır.

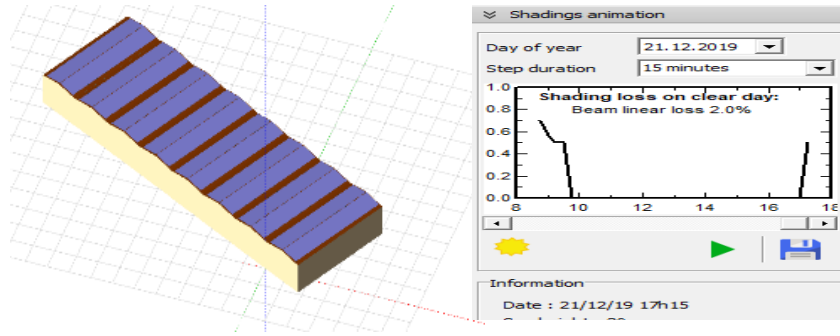
Çalışmanın son aşamasında, bir önceki aşamada enerji analizi yapılan üç PV teknolojisinden, en yüksek enerji üretim kapasitesine sahip mono-kristal PV teknolojisi kullanılarak, farklı güneş radyasyon verilerine sahip Türkiye'nin üç farklı iklim özelliklerine göre Antalya (Akdeniz iklimi), Ordu (Karadeniz iklimi) ve Bursa (Marmara Geçiş İklimi), şehirlerinde mevcut güneş enerji santrali modellenmesi tekrar yapıp PV sistemin performans tahminini analiz etmek için PVsyst V6.8.6 simülasyon programı kullanılır. PVsyst programı bu tasarımları yaparken, Meteororm 7.2 (2003-2013) veri tabanında olan güneşlenme verilerini kullanmaktadır.

Panellerin konumlandırılacağı çatıların güney yönünde, güneş azimut açıları farklı olması nedeniyle panel yerleşimleri için iki panel açısı belirlenir. Google Earth Pro programı kullanılarak, güneşten en iyi şekilde yararlanmak için ilk yönelimde azimut açısı -63° , ikinci yönelimde ise 117° olarak belirlenir. Paneller birbirlerine paralel olduğu için azimut açılarının birbirlerini 180° 'ye tamamladıkları görülmektedir. Binanın azimut açısı da yaklaşık olarak -156° 'dir. Eğim açısı, çatı eğimi baz alınarak 10° olarak belirlenir.



Şekil 10. Tüm Yıl Boyunca Maksimum Verimlilik İçin Optimum Parametreler

PVsyst simülasyon programında çatı boyutları, çatı açısı ve belirlenen azimut açıları girildikten sonra gölgeleme analizi yapılmak üzere sistem üç boyutlu (3D) olarak Şekil 11'deki gibi modellenir.



Şekil 11. PVsyst 3D Modelleme

Güneş'in enerjisinin en iyi ve en efektif olduğu, 09:00 ile 15:00 arası zaman diliminde gölge hiçbir şekilde sistemin üzerine düşmemelidir. Şekil 11'deki şematik incelendiğinde sistemin kabul edilebilir olduğu gözlemlenir.

Santral de 315 W_p gücünde 3816 adet ince film, mono-kristal ve poli-kristal güneş modülü kullanılır. Santralde kullanılan PV panellerin, Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te Standard Test Koşulları (STC) (25°C hücre sıcaklığında AM 1,5 aralığıyla 1000 W/m² ışımaya) altındaki elektriksel verileri ve mekanik verileri verilir.

Tablo 1. Mono-Kristal Panel Elektriksel ve Mekaniksel Veriler

Elektriksel veriler		Mekanik veriler	
Nominal Güç (P _{max})	315 W _p	Hücre Teknolojisi	Si-mono
Açık Devre Gerilimi (V _{oc})	39.48 V	Hücre Sayısı	60
Kısa Devre Akımı (I _{sc})	10.17 A	Panel Uzunluğu	1648 mm
Nominal Gerilim (V _{mpp})	33.16 V	Panel Genişliği	995 mm
Nominal Akım (I _{mpp})	9.5 A	Panel Kalınlığı	35 mm
Modül Verimi (%)	19.25	Ağırlık	18 kg

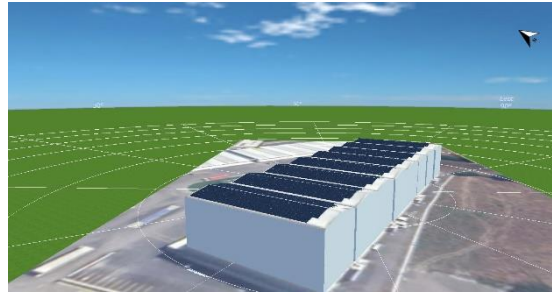
Tablo 2. Poli-Kristal Panel Elektriksel ve Mekaniksel Veriler

Elektriksel veriler		Mekanik Veriler	
Nominal Güç (P _{max})	315 W _p	Hücre Teknolojisi	Si-poli
Açık Devre Gerilimi (V _{oc})	45.9 V	Hücre Sayısı	72
Kısa Devre Akımı (I _{sc})	8.95 A	Panel Uzunluğu	1959 mm
Nominal Gerilim (V _{mpp})	37.5 V	Panel Genişliği	995 mm
Nominal Akım (I _{mpp})	8.4 A	Panel Kalınlığı	40 mm
Modül Verimi (%)	16.16	Ağırlık	22 kg

Tablo 3. İnce Film Panel Elektriksel ve Mekaniksel Veriler

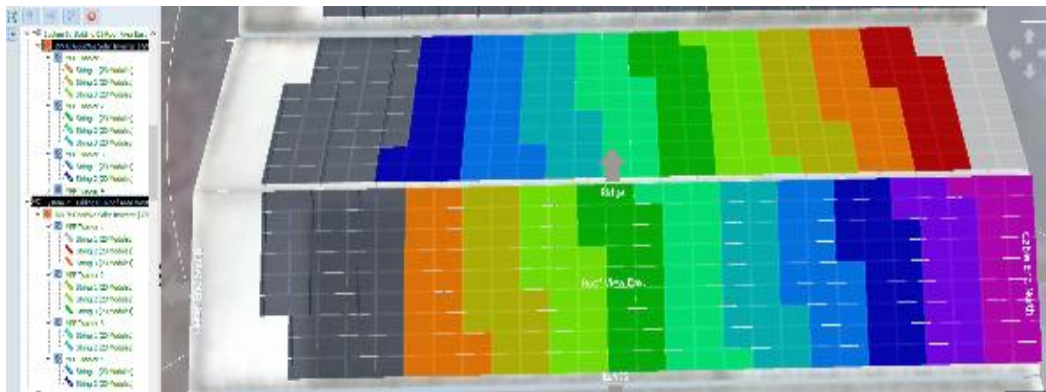
Elektriksel Veriler		Mekanik Veriler	
Nominal Güç (Pmax)	315 Wp	Hücre Teknolojisi	İnce film(CIS)
Açık Devre Gerilimi (V _{OC})	75.41 V	Hücre Sayısı	330
Kısa Devre Akımı (I _{SC})	6.102 A	Panel Uzunluğu	1900 mm
Nominal Gerilim (V _{mpp})	58.73 V	Panel Genişliği	1235 mm
Nominal Akım (I _{mpp})	5.363 A	Panel Kalınlığı	45 mm
Modül Verimi (%)	13.47	Ağırlık	33.3 kg

Gerçekleştirilen 3D modellemeye, bir eğimli çatının sağ ve sol yönelimlerinde seride yaklaşık 27 adet paralelde yaklaşık 9 adet panel yerleşimi yapılır. Tasarlanan sistemin kurulu gücü 1202,04 kWp'dir.



Şekil 12. Santralin PV*SOL Programındaki 3D Modeli

Tesiste, inverter olarak 200 – 1000 V işletme voltajı ile 20 adet 3 Faz, 50000 W gücüne sahip inverter kullanılır. 50,0 kW inverterlarda 4 adet MPPT devresi bulunmaktadır. 180 adet modül bağlı 50,0 kW inverterlarda, MPPT 1 devresine her birinde seri bağlı 20 adet modül bulunan 3 adet dizi, MPPT 2-3-4 devresine her birinde seri bağlı 20 adet modül bulunan 2 adet dizi girişi yapılır. 200 adet modül bağlı 50,0 kW inverterlarda, MPPT 1-2 devresine her birinde seri bağlı 20 adet modül bulunan 3 adet dizi, MPPT 3-4 devresine her birinde seri bağlı 20 adet modül bulunan 2 adet dizi giriş yapılır ve son olarak 196 adet modül bağlı 50,0 kW inverterlarda, MPPT 1-2 devresine her birinde seri bağlı 20 adet modül bulunan 3 adet dizi, MPPT 3 devresine her birinde seri bağlı 20 adet modül bulunan 2 adet dizi, MPPT 4 devresine her birinde seri bağlı 18 adet modül bulunan 2 adet dizi giriş yapılır. Şekil 13'te inverter gruplarının birbirleriyle olan bağlantısı renklerle gösterilir.

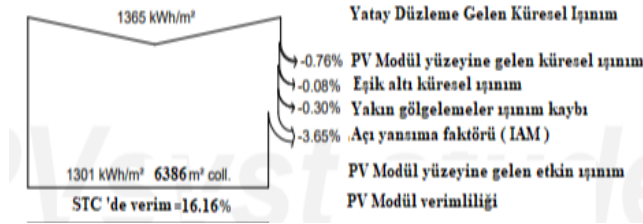


Şekil 13. PV*SOL Programı ile Gerçekleştirilen İnverter Analizi

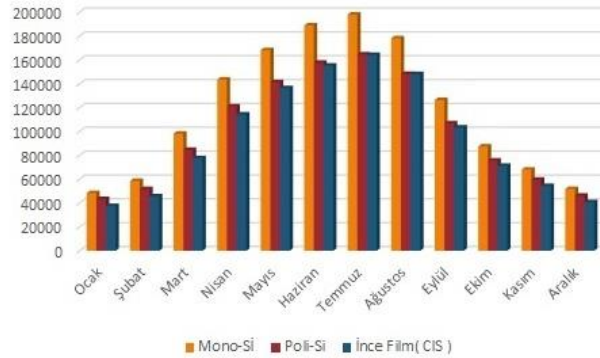
BULGULAR

Şebekeye bağlı PV sistem simülasyonlarında temel olarak dizi çıkışı enerji üretimi, şebekeye verilen toplam enerji ve performans oranı hakkında detaylı bilgi verilir. Bursa GES tesisi için PVsyst ve PV*SOL simülasyonlarından sistemin enerji üretimi, enerji kaybı ve performans değerlerini elde etmek mümkündür. Bursa OSB Güneş Enerji Santrali'nin kurulduğu alanda yatay düzleme gelen küresel ışınım miktarı 1365 kWh/m^2 olarak hesaplanırken gölgelenme sebebiyle panele düşen ışınım miktarı 1301 kWh/m^2 'dir (Şekil 14).

Mono-kristal paneller, poli-kristal paneller ve ince film paneller ile tasarlanan sistemin şebekeye verdiği yıllık enerji miktarı sırasıyla 1416 MWh, 1202 MWh ve 1150 MWh'dır. Şekil 15'te üç PV teknoloji tarafından şebekeye aktarılan aylık enerji miktarları gösterilir. Grafik incelendiğinde, aylık enerji üretimi mono-kristal panel için 48414,6 kWh ile 198213,2 kWh aralığında, poli-kristal panel için 43518,1 kWh ile 164771,8 kWh aralığında, ince-film panel için 37684,1 kWh ile 164361,3 kWh aralığında değişmektedir.



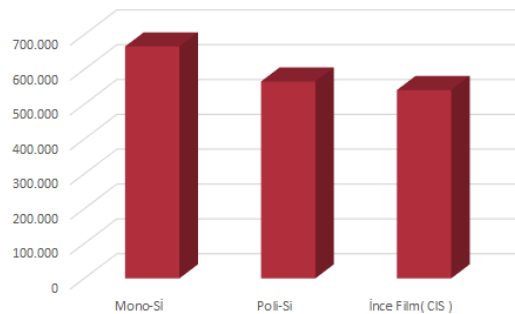
Şekil 14. PVsyst Programı ile Elde Edilen Işınım Miktarı



Şekil 15. Üç PV Teknolojisinden Elde Edilen Aylık Enerji Çıkışı

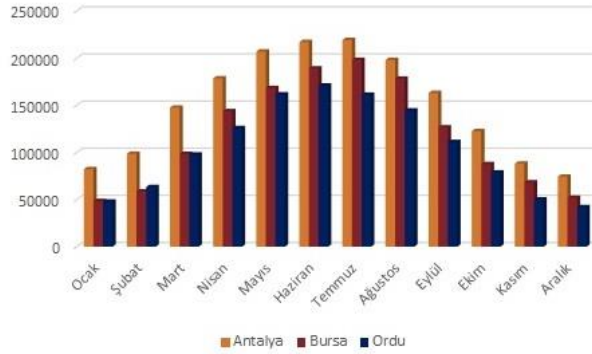
Yapılan analizler incelendiğinde, şebekeye aktarılan enerjinin en yüksek değeri Temmuz ayında mono-kristal panel tarafından sağlanmaktadır. Sonuç olarak mono-kristal panel diğerlerine göre daha fazla enerji üretirken, ince film paneller en düşük performansı göstermektedir.

Sistemin ortalama performans oranı mono-kristal sistem, poli-kristal sistem ve ince film sistem için sırasıyla %85, %72.1 ve %70'dir. Genel olarak, sıcaklığın artmasıyla beraber paneller aşırı ısındığı için yaz aylarında sistem performansı düşmekte, kış aylarında yükselmektedir.



Şekil 16. PV Panel Teknolojilerinin Emisyon Oranları

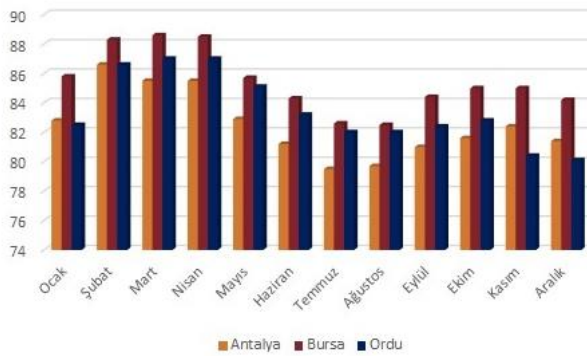
Emisyon oranı ($\text{kgCO}_2 / \text{kWh}$), sistemlerin enerji verimine göre hesaplanır. Şekil 16 'da gösterildiği gibi sistemlerin emisyon oranı mono-kristal, poli-kristal ve ince film modüller için sırasıyla $665.961 \text{ kgCO}_2 / \text{kWh}$, $565.055 \text{ kgCO}_2 / \text{kWh}$, $540.510 \text{ kgCO}_2 / \text{kWh}$ 'dır.



Şekil 17. Şehirlere Göre Elde Edilen Aylık Enerji Çıkışı

Yapılan simülasyon çıktılarına göre, Antalya, Bursa ve Ordu için yıllık PV enerji üretimi sırasıyla, 1806 MWh, 1414 MWh, 1227 MWh, yıllık güneş radyasyonu: 1775 kWh/m^2 , 1301 kWh/m^2 , 1196 kWh/m^2 ve kayıp %8.21, %5.93, %4.78 ile en fazla kayıp sıcaklıktan kaynaklanmaktadır.

PVsyst programı kullanılarak Ordu iline yapılan tasarımda sıcaklıktan dolayı kayıpların diğer illere göre daha az olduğu, (özellikle yaz aylarında) dolayısıyla PV modüllerin sıcaklık arttıkça verim düşümü yaşadıkları tespit edilir. Şekil 18'de verildiği üzere en büyük performans oranı Mart ayında %88.6'dır.



Şekil 18. Şehirlere Göre Elde Edilen Aylık PR Oranı

SONUÇLAR

Fotovoltaik teknoloji, 2009 yılında Kopenhag'da alınan kararlar neticesinde Dünya üzerindeki tüm ülkelerin alternatif enerji kaynaklarına geçişinin de hızlanmasıyla beraber yakın gelecekte ana yenilenebilir enerji kaynağı olacaktır. Aynı zamanda fotovoltaikin diğer güneş enerji teknolojilerine kıyasla kurulumunun daha kolay ve ucuz olması, güneş enerjisini 21. yüzyıl için önemli bir enerji kaynağı haline getirecektir.

Bursa ilinde yer alan 1202,4 kWp kurulu güce sahip çatı tipi PV Güneş Enerjisi Santrali'nin performansı PVsyst ve PV*SOL simülasyon araçları kullanılarak analiz edildi. Saha değerlendirmesi sonuçlarından, çalışmanın geliştirilmesi için herhangi bir engel ortaya çıkmamıştır. Yapılan çalışmada poli-kristal panel, mono-kristal panel ve ince film teknolojileri birbirleriyle karşılaştırılarak; ana sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Mono-kristal, poli-kristal ve ince film tabanlı (CIS) sistemler sırasıyla 1416 MWh, 1202 MWh ve 1150 MWh enerji üretmişlerdir.
- Şebekeye en çok Temmuz ayında, en az Ocak ayında enerji gönderilmiştir.

- Enerji üretimi ile ilgili olarak üç fotovoltaik sistemin, ortalama sıcaklığın yüksek olduğu yaz aylarında daha iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Mono – kristal panel teknolojisi %85 PR ile en iyi PV teknolojisi olarak ortaya çıkarken, poli-kristal panelin PR oranı %72.1 ve ince-film panelin PR oranı %70 olarak belirlenmiştir.
- Aynı sayı ve nominal güçte yerleştirilen üç fotovoltaik teknolojinin mekaniksel verileri incelendiğinde, poli-kristal ve ince-film panel teknolojilerinin, mono-kristal panel teknolojisine göre daha fazla alan gerektirdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, mono-kristal sistemin enerji üretimi açısından ve kapladığı alan bakımından dikkate değer bir avantaja sahip olduğu sonucuna varmaktadır ve bu da yer kısıtlamaları olan alanlar için mono-kristal sistemleri daha uygun bir hale getirmiştir.
- Antalya, Bursa ve Ordu illerinden elde edilen enerji üretim miktarları incelendiğinde, PV dizisinden elde edilen çıkış enerjisinin, güneş radyasyonu potansiyelinden, ortam sıcaklığından ve sistem kayıplarından güçlü bir şekilde etkilendiği kanıtlanmıştır.
- Güneş radyasyon oranı en yüksek olan sırasıyla Antalya, Bursa ve Ordu illerinde elektrik üretim miktarları oranı da aynı sırayla gerçekleşmektedir.

Bu çalışmada sadece simülasyon verileri ile kıyaslama yapılmıştır. En doğru karşılaştırma sonuçlarına, birkaç yıllık üretim verilerinin ortalamasının simülasyon verileri ile mukayese edilmesi halinde ulaşılması mümkün olacaktır. Ayrıca, iki eksenli izleme gibi güneş izleme sistemleri tasarım içine dahil edilerek çıkış enerjisinin artacağını doğrulamak için daha fazla araştırma yapılabilir.

PV panel kurulacak tesisin, yerli kaynaklarını kullanması, ülkenin enerji ithalatına artan bağımlılığını azaltacak, Bursa'nın enerji güvenliğine katkıda bulunacak ve Organize Sanayi Bölgesi'nin karbon ayak izini önemli ölçüde azaltacaktır.

KAYNAKLAR

Akcan, E., Kuncan, M., & Minaz, M. R. (2020). PVsyst Yazılımı İle 30 Kw Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 248-261.

Akdeniz, E., “Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi ve Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2006)

Akkas, O. P., Erten, M. Y., Cam, E., & Inanc, N. (2017). Optimal site selection for a solar power plant in the Central Anatolian Region of Turkey. *International Journal of Photoenergy*, 2017.

AKSANGÖR, N. N., MARTİN, K., & BORAN, K (2019). PVsyst Simülasyon Aracı Kullanarak Ankara'da Fotovoltaik Güneş Sistemlerin Performans Analizi.

Ali, H., & Khan, H. A. (2020). Techno-economic Evaluation of Two 42 kWp Polycrystalline-Si and CIS Thin-Film Based PV Rooftop Systems in Pakistan. *Renewable Energy*

Arıcı N., İskender A., “Fotovoltaik güneş santrallerinde şebeke bağlantı sorunları ve çözümleri”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 215-222, (2020).

Atalay Ayran, Z. (2019). Kütahya ili güneş enerji potansiyelinin araştırılması ve örnek bir güneş enerji santralinin ekonomik analizi (Master's thesis, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).

Baghdadi, Ilham, et al. "Performance investigation of a PV system connected to the grid." *Procedia Manufacturing* 22 (2018): 667-674.

Ceylan, M.,” Kampüs Binalarında Şebekeden Bağımsız Bir Çatı Üstü Fotovoltaik Sistem Tasarımı Ve Benzetimi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2018)

- Dondariya, C., Porwal, D., Awasthi, A., Shukla, A. K., Sudhakar, K., SR, M. M., & Bhimte, A. (2018). Performance simulation of grid-connected rooftop solar PV system for small households: A case study of Ujjain, India. *Energy Reports*, 4, 546-553
- Erdoğan, N. (2020). Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye Yönelik Teşvikler İle Yenilenebilir Enerji Üretimi Arasındaki Etkileşim Ve Finansal Yansımaları (Master's thesis, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi-Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Haydaroğlu, C., & Gümüş, B.(2016). Dicle Üniversitesi güneş enerjisi santralının PVsyst ile simülasyonu ve performans parametrelerinin değerlendirilmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 7(3), 491-500.
- Horowitz, Kelsey AW, et al. An analysis of the cost and performance of photovoltaic systems as a function of module area. No. NREL/TP-6A20-67006. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2017.
- Koç, E., and Kaya, K. (2015). Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47
- Loulas, N. M., Karteris, M. M., Pilavachi, P. A., & Papadopoulos, A. M. (2012). Photovoltaics in urban environment: a case study for typical apartment buildings in Greece. *Renewable energy*, 48, 453-463.
- Obeng, M., Gyamfi, S., Derkyi, N. S., Kabo-bah, A. T., & Peprah, F. (2020). Technical and economic feasibility of a 50 MW grid-connected solar PV at UENR Nsoatre Campus. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119159.
- Ozdemir, S., & Sahin, G. (2018). Multi-criteria decision-making in the location selection for a solar PV power plant using AHP. *Measurement*, 129, 218-226.
- Ramanan, P., & Karthick, A. (2019). Performance analysis and energy metrics of grid-connected photovoltaic systems. *Energy for Sustainable Development*, 52, 104-115.
- Recepoğlu, M., Doğanay, M. A., & Değer, M. K. (2020). Enerji Tüketimi ile Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkiler: Türkiye’de İller Üzerine Panel Veri Analizleri (2004-2014). *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 21(1), 69-80.
- Sayın, S., & Koç, İ. (2011). Güneş enerjisinden aktif olarak yararlanmada kullanılan fotovoltaik (PV) sistemler ve yapılar da kullanım biçimleri.
- Sharma, V., & Chandel, S. S. (2013). Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. *Energy*, 55, 476-485.
- SULUKAN, E. (2020). İstanbul’da bir fotovoltaik sistemin tekno-ekonomik ve çevresel analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 127-132.
- Tanış Z., “Elazığ İlinde Yer Alan Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santralının Performans Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2019)
- Tek, S. C., & YILDIRIM, D. (2008). Güneş Paneli Simulatörü. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri.
- URL 1 : Google Earth.”Earth Sürümleri” <https://www.google.com/earth/versions/> Erişim tarihi : 09.04.2020
- URL 2 : The Ohio State University.” Photovoltaic Systems for Solar Electricity Production”. <https://ohioline.osu.edu/factsheet/AEX-652-11> / Erişim tarihi: 09.04.2020
- Ünlü, M., Çamur, S., & Arifoğlu, B. (2015). Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinde Parçalı Gölgeleme Durum Analizi. *Elektrik Enerji, Elektrik, Aydınlatma, Elektronik ve Otomasyon Mühendisliği Dergisi*, 314, 83-87.

Varınca, K. B., & Gönüllü, M. T. (2006). Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 21-23.

Yılmaz, Ş., Aksu, M., Özer, Z., & Özçalık, H. R. (2012). Matlab İle Gerçekleştirilen Fotovoltaik (PV) Güneş Pili Modeli İle Güneş Enerjisi Üretimindeki Önemli Etkenlerin Tespit Edilmesi. ELECO, Bursa.