

Elazığ ilinde şebekeye bağlı 1036,8 kWp fotovoltaik güneş enerjisi santralının ölçülen ve simüle edilen performans verilerinin analizi

Analysis of the measured and simulated performance data of a grid-connected 1036,8 kWp photovoltaic solar power plant in Elazığ

 
Zeynep TANIŞ, Nihan ALTINTAŞ*

Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
zynpctnts@gmail.com, naltin@yildiz.edu.tr*

ÖZ

Bu çalışmada, Elazığ ilindeki 1036,8 kWp kurulu güce sahip Fotovoltaik Güneş Enerji Santralının Ocak-Aralık 2018 tarihleri arasında alınan performans verilerinin analizi sunulmuştur. Mevcut santral güneşe 30°'lik sabit eğime sahip, her biri 20 adet FV modülün birbirine seri bağlanmasıyla oluşan toplam 192 diziden meydana gelmektedir. Santralde 3840 adet 270Wp polikristal güneş paneli kullanılmış olup, 24 adet 36 kW string inverter ile şebekeye bağlantı gerçekleştirilmiştir. Santralden alınan üretim verileri ve PVsyst programı kullanılarak elde edilen simülasyon verileri birbiriyle karşılaştırılmıştır. Santralin 2018 yılına ait ölçülen ve tahmin edilen yıllık enerji verimleri sırasıyla 1575,12 kWh/kWp ve 1503,95 kWh/kWp olarak tespit edilmiştir. Verim değerleri arasındaki % 4,73'lük düşük yüzdelerlik fark, simülasyon sonuçlarının tesis hakkında güvenilir veriler sağladığını göstermektedir. Ölçülen hava durumu verilerine göre simülasyon gerçekleştirildiğinde tahmin edilen üretim değerinin gerçek üretim değerinden %0,63 daha az olduğu görülmüştür. Bu verileri PVsyst simülasyon programında girdi olarak kullanıldığında üretilen enerji değeri ölçülen sistemdeki enerji değerine yaklaştığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: performans tahmini, şebeke-etkileşimli güneş santrali, kapasite faktörü, pvsyst.

ABSTRACT

In this study, the analysis of the performance data of the Photovoltaic Solar Power Plant with an installed power of 1036,8 kWp in the province of Elazığ between January and December 2018 is presented. The existing power plant consists of a total of 192 strings, each of which consists of 20 PV modules connected in series, with a constant slope of 30° to the south. 3840 pieces of 270Wp polycrystalline solar panels were used in the power plant, and connection to the grid was made with 24 pieces of 36 kW string inverters. Production data from the plant and simulation data obtained using the PVsyst program were compared with each other. The measured and estimated annual energy efficiencies of the power plant for 2018 were determined as 1575,12 kWh/kWp and 1503,95 kWh/kWp, respectively. The low percentage difference of 4,73% between the yield values indicates that the simulation results provide reliable data about the plant. When the simulation was performed according to the measured weather data, it was seen

that the estimated production value was 0,63 % higher than the actual production value. When this data is used as an input in the PVsyst simulation program, it has been determined that the energy value produced approaches the energy value in the measured system.

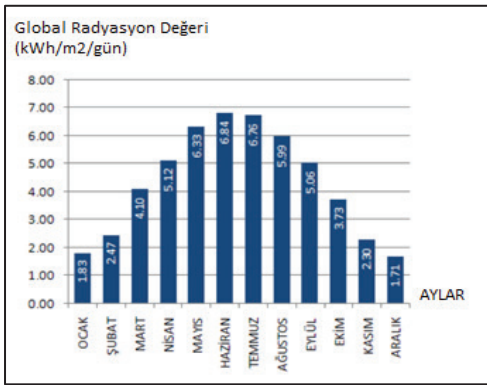
Keywords: performance estimation, grid-interactive solar plant, capacity factor, pvsyst.

1. Giriş

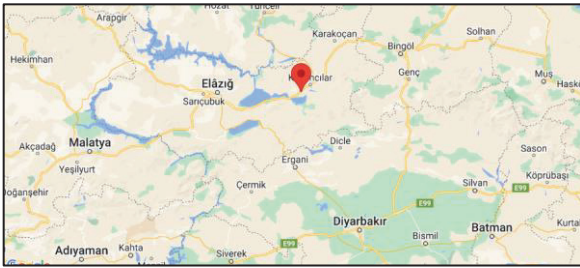
Ülkelerin enerji ihtiyaçları her geçen gün artmaktadır. Hali hazırda tükenmekte olan konvansiyonel enerji kaynaklarına en önemli alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. FV teknolojiden enerji üretimi; uygun fiyatlı, tükenmez, basit, az bakım ihtiyacı ve temizdir. Şebekeye bağlı FV güneş enerji santralleri bu özelliklerinden dolayı son yıllarda büyük çapta enerji elde etmenin en iyi alternatifi olarak görülmektedir. FV güneş enerji sistemleri verimlerinin düşük olması nedeniyle enerji üretimini geleneksel yollar ile yapan kömür, gaz ve nükleer santrallerinin yerini alabilecek seviyeye ulaşamamıştır. Bu sistemlerin maliyetini düşürmek ve verimini arttırmak için analiz, simülasyon ve donanım geliştirme alanlarında önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, kaliteli ve güvenilir elektrik enerjisi sağlamak için güç sisteminin uygun planlanması ve işletilmesi ile ilgili çalışmaların yapılmasına hala ihtiyaç vardır. Özellikle güneş enerjisinin potansiyelini ortaya çıkarmak ve uzun vadeli faydalar elde etmek için ülkelerinde uygun politikalar uygulaması gerekir. Türkiye güneş enerjisi bakımından dünyanın en zengin bölgeleri arasında yer almasına karşın FV santral yatırımlarının oldukça az olduğu gözlemlenmiştir [1]. T.C. Enerji Bakanlığının 2022 yılı Aralık ayında yayınladığı raporda, Türkiyedeki Güneş Enerji Santrallerinin kurulu gücünün 9425,4 MW seviyesine ulaştığı ve toplam FV Güneş Enerji Santral sayısının da 9353'e ulaştığı belirtilmiştir [2].

Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) verilerine göre; Türkiye'nin güneşlenme süresi yıllık toplam 2741 saat iken günlük ortalama 7,5 saattir. Aynı zamanda metrekareye düşen yıllık toplam güneş enerjisi 1527 kWh/m²/yıl iken bu değer günlük ortalama 4,18 kWh/m²/gün'dür. Elazığ ilinin de içinde bulunduğu coğrafya kışın sert ve soğuk olmasına rağmen Türkiye'de en fazla ışınım alan bölgedir [3].

FV Güneş Enerjisi Santrali tarafından üretilen güç, güneşten yayılan güneş ışığına bağlıdır. Santralin kurulduğu bölge olan Elazığ ili tüm yıl boyunca güneş ışınımının daha fazla absorbe edildiği ve coğrafi olarak iyi konuma sahip bir bölgedir. Elazığ bölgesinde yer alan şebeke bağlantılı FV Güneş Enerjisi Santrali'nin yıl boyunca almış olduğu ışınım değerleri Şekil 1'de gösterilmiştir [4].



Şekil 1: Elazığ global radyasyon değerleri (kwh/m²/gün)



(a)



(b)

Şekil 2: FV güneş santralinin a) coğrafi konumu, b) fotoğrafı

Yüksek rakımlı Elazığ ilinde havada oluşan su buharı, kar ve yağmur olarak yoğunlaştığı için atmosfer daha berraktır ve dolayısıyla ışınım engellenmesi de en düşük seviyededir. Şekil 2(a)'da Elazığ ilinde bulunan FV Güneş Santralinin coğrafi konumu, Şekil 2(b)'de ise kurulu santrale ait görsel verilmiştir.

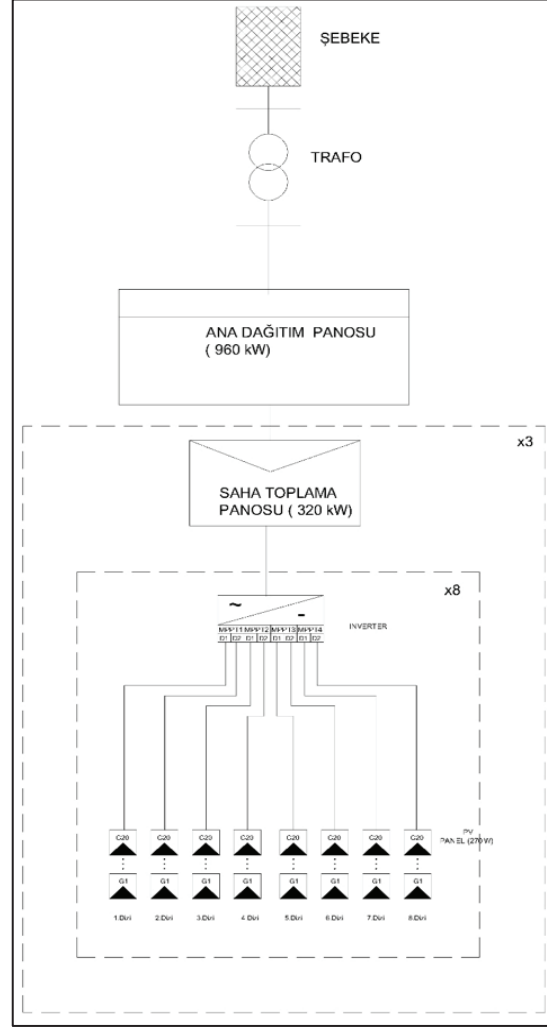
FV güneş enerji santrallerinin tasarım, ön fizibilite ve performans analizleri simülasyon programları yardımıyla yapılmaktadır. PVsyst simülasyon programı, FV Güneş Enerjisi Santralinin performansını tahmin etmek için geliştirilmiş programlar arasında detaylı ve doğruya yakın verileri nedeniyle öne çıkmaktadır [5], [6]. Bu yazılım programı şebekeye bağlı yada şebekeden bağımsız DC güneş enerji sistemlerinin tasarımı ile girilen modül ve yer verilerine göre sistemlerin performans analizlerini yapar [7]. Meteorolojik veriler için yerleşik veritabanında coğrafi koordinatlar ile aylık hava durumu verilerini içeren veri kümesi vardır. Hava durumu verileri ve güneş ışınımı verileri veri tabanında bulunmadığı takdirde; bu veriler NASA SSE [8], PVGIS [9], Metenorm [10] vb farklı veri kaynaklardan elde edilerek PVsyst veri tabanına girilir [11]-[15]. Gerçek meteoroloji verilerinin ölçümleri çok karmaşıktır. Bazı durumlarda önceden tanımlanmış kaynaklardan hiçbiri tatmin edici verileri sunamaz. Yerel hava istasyonu veya sensörler gibi daha iyi bir veri kaynağı varsa bu kaynakların verileri kullanılabilir.

Bu çalışmada, FV güneş enerji üretiminin etkinliğini incelemek için 1036,8 kWp şebekeye bağlı FV Güneş Enerjisi Santralinin performans analizleri yapılmıştır. Ocak 2018–Aralık 2018 ayları arasında toplanan gerçek veriler analiz edilip tesisin performans parametreleri hesaplanmıştır. Ölçülen değerler ile PVsyst yazılımı kullanılarak elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Simülasyon, Metenorm 7.1 tarafından üretilen meteorolojik uzun vadeli veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Performans analizi, enerji üretiminin yakından takibini sağlayarak yeterli bakım planlarının oluşturulmasına yön göstermektedir. FV sistemin ürettiği enerjinin ve sistem verimliliğinin zamana bağlı değişimi maliyet açısından önemlidir. Dolayısıyla büyüyen FV endüstrisine kurulacak FV sistemin ömrü boyunca üreteceği enerji miktarı ile ilgili doğru tahminler verebilmek çok önemlidir. Bu yönüyle çalışma, gelecekte yapılacak sistemlere referans olacağı için Türkiye ve Elazığ ilindeki FV endüstrisi için önem taşımaktadır.

2. Güneş Santralinin Özellikleri

1036,8 kWp kurulu güce sahip FV Güneş Enerjisi Santrali 38,68°N, 39,83°E koordinatlarında ve 962m rakımda bulunmaktadır. Şekil 3'de verilen genel bağlantı şemasında da görüldüğü gibi santral güneş panelleri, inverterler, saha toplama panosu, ana dağıtım panosu trafo ve şebeke bağlantı ekipmanlarından oluşmaktadır. FV Güneş Enerjisi Santrali 270Wp değerinde 3840 adet



Şekil 3: FV güneş enerjisi santralının genel bağlantı şeması

CW Enerji firmasının CWT270-60PP adlı polikristal güneş panelinden oluşmaktadır. Paneller 30°'lik açı ile güneşe bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Santralde toplam 192 dizi bulunmaktadır. Her bir dizi seri bağlı 20 adet güneş panelinden oluşur ve bu diziler string inverterlere bağlanır. Santralde Huawei firmasının 24 adet SUN2000-36KTL string inverterleri kullanılmıştır. İnverterler ile DC'den AC'ye çevrilen gerilimin değerini yükseltmek için 1250 kVA gücünde kuru tip hermetik trafo kullanılmıştır.

FV Güneş Enerjisi Santrali'nin yakınında bulunan entegre hava izleme istasyonu güneş ışınımı verilerini, rüzgar hızını, nemi ve yağmuru kaydeder. İnvertere entegre halinde bulunan data logger veri kaydedici, her bir inverterin giriş ve çıkışında güneş ışınımını, gerilimi, akımı, gücü ve ayrıca düzenli aralıklarla rüzgar hızı ve modül sıcaklığını kaydeder. Kayıt aralığı, IEC 61724 standardı [16] izleme klavuzlarına göre 1 dakika ile 10 dakika arasında olmalıdır. Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama (SCADA) sistemi, tesisin izlenen verilerin değerlendirilmesinde kullanılır. Bilgileri sunucudan alır ve kontrol odalarındaki grafik ekranlarını günceller. Veri dosyaları periyodik olarak kaydedilir ve gerektiğinde alınabilir. Bu çalışmada Ocak 2018–Aralık 2018 dönemlerine ait veriler, veri kaydediciden alınmış ve performans parametreleri hesaplanmıştır.

Tablo 1: FV modülünün özellikleri

Maksimum güç (P_{max})	270Wp
Maksimum güç gerilimi (V_{MP})	32,22 V
Maksimum güç akımı (I_{MP})	8,4 A
Açık devre gerilimi (V_{OC})	38,1 V
Kısa devre gerilimi (I_{SC})	8,94 A
P_{max} sıcaklık katsayısı	0,44 %/°C
V_{OC} sıcaklık katsayısı	-0,34 %/°C
I_{SC} sıcaklık katsayısı	0,06 %/°C
Modül verimi STC	16,23 %

Tablo 2: İnvertere ait elektriksel özellikler

Maksimum DC güç ($\cos\phi=1$)	40,8 kW
Maksimum giriş gerilimi	1000 V
MPP voltaj aralığı	480V-850V
MPP sayısı	4
MPP dizi giriş sayısı	A2-B2-C2-D2
Giriş gerilimi	200V
Maksimum giriş akımı	4x22A
Nominal güç (25°C/50°C, 50Hz)	36 kW
Maksimum güç (25°C/50°C, 50Hz)	40 kW
Nominal AC frekans/gerilim	50 Hz/400V
Maksimum AC akım	57,8 A
Maksimum verim	98,8%

3. Performans Parametreleri

Şebekeye bağlı bir FV sistemin performansını analiz etmek için, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu tarafından performans parametreleri (IEC 61724) belirlenmiştir [17]-[20]. Tablo 3'de verilen temel parametreler mevcut FV sistemin temel performans parametreleri olan performans oranı ve kapasite faktörünün belirlenmesi için kullanılır [21].

Tablo 3: Performans parametreleri

Parametre	Kısaltma	Denklem
Referans verimi	Y_R	$=H_T/G_{STC}$
Dizi verimi	Y_A	$=E_{DC}/P_{pvrate}$
Nihai verim	Y_F	$=E_{AC}/P_{pvrate}$
Sistem kaybı	L_s	$=Y_A - Y_F$
Dizi kaybı	L_c	$=Y_R - Y_A$
FV verimi	n_{pv}	$=(E_{DC}/A.H_T) \times 100$
Sistem verimi	n_{sys}	$=(E_{AC}/A.H_T) \times 100$
Inverter verimi	n_{inv}	$=(E_{AC}/E_{DC}) \times 100$
Performans oranı	PR	$=Y_F/Y_R$
Kapasite faktörü	CF	$=E_{AC,a}/(24*365*P_{pv.rate})$

FV dizelerden üretilen DC enerji E_{DC} , inverterden günlük üretilen AC enerji E_{AC} , bir yıl boyunca inverterde üretilen toplam enerji $E_{AC,a}$, inverter çıkışındaki AC kurulu güç P_{AC} , FV dizisinin standart test koşullarındaki nominal kurulu gücü P_{DC} (standart test koşulları: 1 kW/m^2 güneş ışınımı ve 25°C 'lik hücre sıcaklığı), DC kurulu güç P_{pvrate} , belli bir düzleme gelen toplam güneş ışınımı H_T , standart test koşullarındaki referans ışınım G_{STC} , dizi alanı A ile gösterilmektedir.

FV sistem tarafından üretilen toplam enerji (E_{AC}), maksimum gücün anlık değerlerinin ölçüm aralığına entegrasyonu ile bulunur [33]. Üretilen enerji,

$$E_{AC} = \int_0^{t_s} P_{AC} dt \quad (1)$$

olarak hesaplanır. Burada t_s entegrasyon periyodu, d_t süre ve P_{AC} ise toplam AC kurulu güç değeridir [22].

Tablo 4: Simülasyon verileri

Aylar	Girdiler					Çıktılar		
	G_{yatay} (kWh/m^2)	D_{yatay} (kWh/m^2)	T ($^\circ\text{C}$)	$G_{modül}$ (kWh/m^2)	G_{etken} (kWh/m^2)	E_{dizi} (MWh)	$E_{şebeke}$ (MWh)	PR
Ocak	59,5	29,54	-1,24	91,6	88,9	91,1	89,7	0,945
Şubat	76,7	37,38	0,62	105,3	102,4	103,7	102,1	0,935
Mart	116,3	60,95	6,89	137,4	133,4	130,6	128,6	0,903
Nisan	136,1	74,45	11,80	143,0	138,5	132,3	130,2	0,878
Mayıs	179,4	78,15	17,08	176,2	170,7	157,7	155,0	0,849
Haziran	209,1	78,18	22,93	197,6	191,2	171,0	168,1	0,820
Temmuz	208,5	77,22	27,51	199,8	193,2	168,6	165,7	0,800
Ağustos	203,8	64,24	27,19	213,7	207,5	180,1	176,9	0,798
Eylül	150,7	50,55	20,92	176,5	171,9	152,7	150,1	0,820
Ekim	105,9	45,69	14,81	141,2	137,4	128,9	126,8	0,866
Kasım	64,5	29,83	6,73	94,6	91,9	89,9	88,4	0,902
Aralık	50,6	24,50	1,22	80,3	78,0	79,0	77,7	0,934
Yıllık	1561,1	650,69	13,11	1757,1	1704,8	1585,5	1559,2	0,856

4. Materyal ve Metot

4.1 PVsyst simülasyon verileri

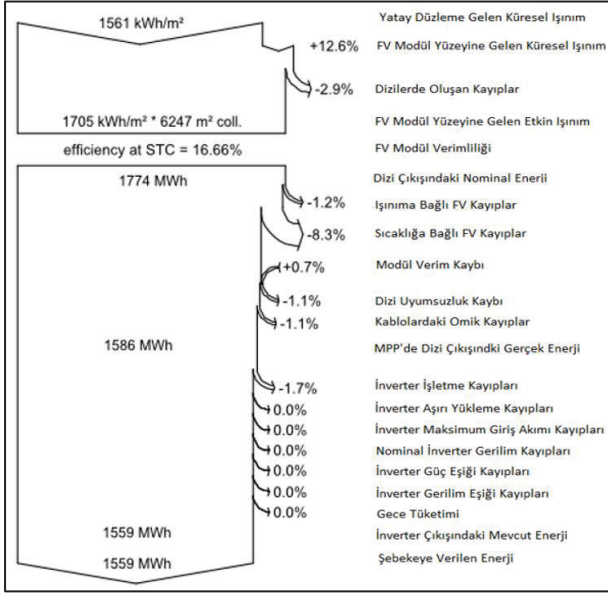
PVsyst programında meteorolojik veriler için yerleşik veritabanında coğrafi koordinatlar ile aylık hava durumu verilerini içeren veri kümesi bulunmaktadır. Fakat Elazığ iline ait hava durumu ve güneş ışınımı verileri veri tabanında bulunmadığı için ilgili veriler Metenorm 7.1 kaynağından alınarak programa yüklendi. Tablo 4'te programa girilen veriler ve programdan alınan çıktılar verilmiştir. Elazığ ilinde yer alan FV Güneş Enerjisi Santrali lokasyonuna ait meteorolojik veriler; G_{yatay} yatay düzleme gelen küresel ışınım, D_{yatay} yatay yayılı ışınım, T ortam sıcaklığı, $G_{modül}$ FV modül yüzeyine gelen ışınım, G_{etken} etken global ışınım iken elde edilen çıktılar ise; E_{dizi} dizi çıkışındaki etkin enerji, $E_{şebeke}$ şebekeye verilen enerji, PR performans oranıdır. Böylece simülasyon programı yardımıyla FV Güneş Enerjisi Santralinin yıl boyunca üretmesi tahmin edilen enerji üretim verileri detaylı bir şekilde elde edilmiştir.

Ayrıca programdan elde edilen mevcut FV santraline ait kayıp şeması Şekil 4'de görülmektedir. Kayıp şeması sayesinde, ana kayıp kaynakları ayrıntılı olarak görüldüğü için daha kaliteli sistem tasarımı yapılabilmektedir. Kayıp hesaplaması ilk olarak, standart test koşullarında global etkili ışınım ve dizilerin nominal enerjisi ile yapılır. Daha sonra sistem tipine göre farklı türden kayıplar dikkate alınır. Her kayıp, önceki enerjinin yüzde değeri olarak tanımlanır. Kayıp

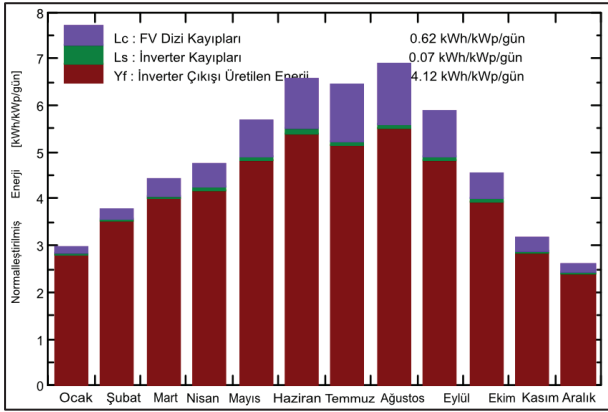
diyagramı bir yıllık yada aylık olarak ayrıntılı bir şekilde gösterilebilir.

Şekil 4'ten FV dizisinde üretilen nominal enerjinin 1774 MWh olduğu görülmektedir. Sonuçlar şebekeye aktarılan enerjinin 1559 MWh olduğunu ve tüm sistemin %13,4'lük bir kayba sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 5'te, L_c FV dizi kayıpları ve diğer kayıplar dâhil olmak üzere sistem kayıpları ve Y_f nihai verim inverter çıkışı üretilen enerji (kWh/kWp/gün) görülmektedir. Farklı sistemler arasındaki karşılaştırmayı kolaylaştırmak için dizi standart test koşullar altında, nominal kurulu gücü ile normalize edilir. Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları en yüksek enerji üretimine ve aynı zamanda en yüksek dizi ve inverter kayıplarına sahip aylardır. Bu durum yılın yaz sezonundaki yüksek sıcaklığın dizi ve inverter kayıplarını arttırdığını gösterir. Dizi kayıpları, FV modüllerin verimliliğini belirler. İnverter kayıpları DC enerjii AC enerjiye dönüştürürken kaybolan enerji olarak tanımlanabilir. Kullanılan inverterlerin verimliliği ne kadar yüksek olursa sistem kayıpları o kadar az olacaktır.



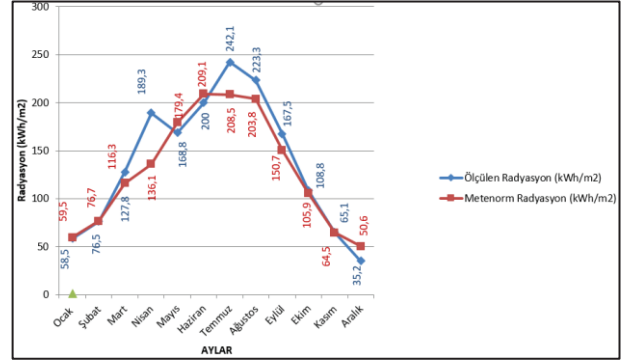
Şekil 4: FV santrale ait kayıp şeması



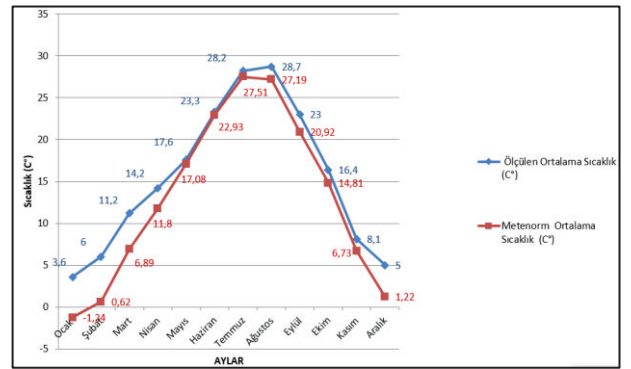
Şekil 5: İnverter çıkışı enerji üretimi ve kayıplar

4.2 Hava durumu verileri

Şekil 6 ve 7'de PVsyst programında girdi olarak kullanılan hava durumu verileri ile gerçek ölçülen hava durumu verileri karşılaştırılmıştır. Aylık ortalama güneş radyasyonu için Metenorm 7.1'den türetilen uzun vadeli (2003-2010) ortalama değerler kullanılmıştır. Şekil 6'dan görüldüğü gibi, Temmuz ve Ağustos güneş ışınımının en iyi olduğu aylar iken, Aralık ve Ocak ışınımının en düşük olduğu aylardır.



Şekil 6: Ölçülen ve Metenorm'dan Türetilen Aylık Ortalama Güneş Işınımları

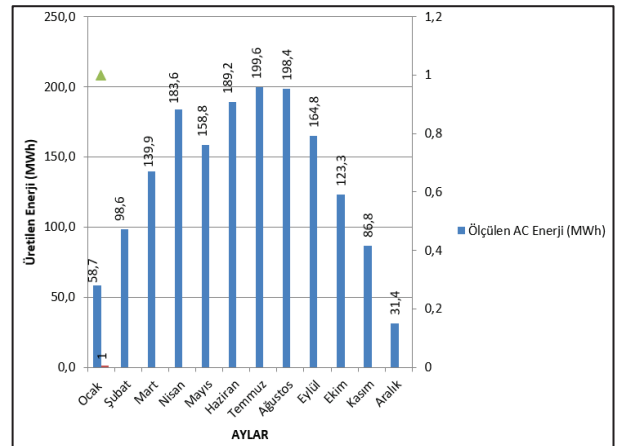


Şekil 7: Ölçülen ve Metenorm'dan Türetilen Aylık Ortalama Ortam Sıcaklıkları

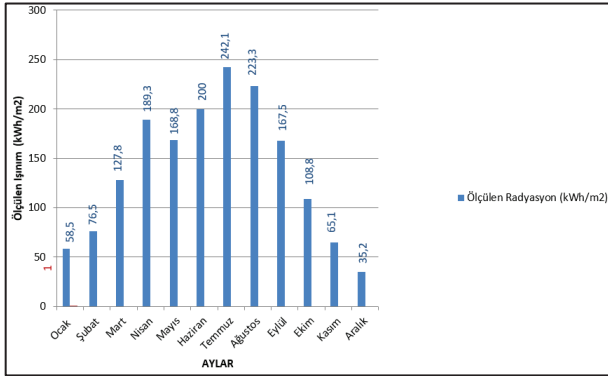
4.3 Performans verileri

FV sistemden elektrik enerjisi üretim miktarı, FV sistemdeki modüller, hücre sıcaklığı, güneşin geliş açısı, yük direnci ve birçok faktöre bağlıdır [23].

Şekil 8, Elazığ ilinde yer alan FV Güneş Enerjisi Santrali için aylık enerji üretimini göstermektedir ve Şekil 9'da verilen ölçülen ışınım verileri ile aynı eğilimi takip etmektedir. Bir FV sisteminin sistem performansı, ürettiği elektrik enerjisi ile belirlenir.



Şekil 8: Elazığ ili FV güneş enerjisi santralinin aylık enerji üretimi

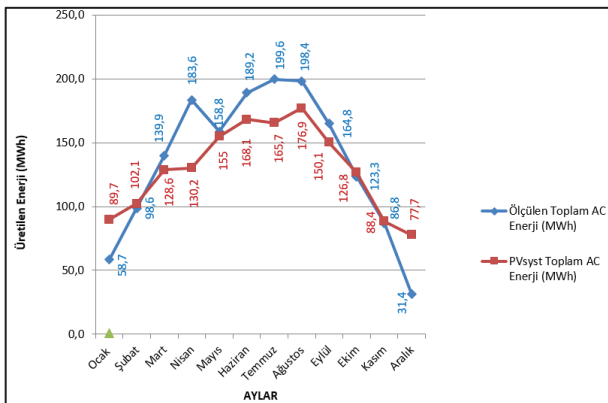


Şekil 9: Ölçülen aylık ortalama toplam güneş ışınımı verileri

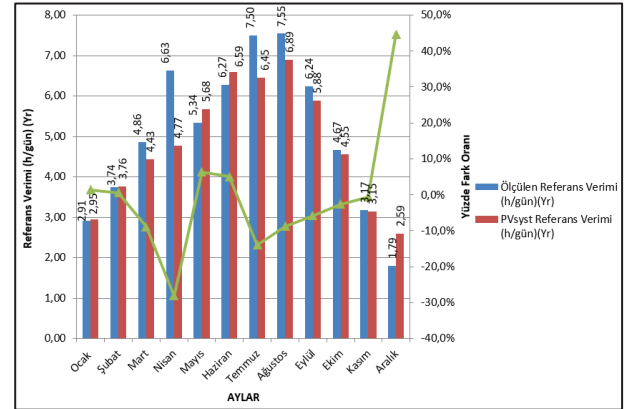
4.3.1 Şebekeye aktarılan toplam enerji (E_{AC})

Anlık enerji çıkışı, 5 dakika aralıklarla inverter çıkışında şebekeye verilen enerjinin ölçülmesiyle elde edildi [24].

Santralin Ocak 2018-Aralık 2018 tarihleri arasında ölçülen ortalama enerji üretimi 1633,09 MWh olarak bulunmuştur. Tahmini enerji üretimi ise PVsyst simülasyon programı kullanılarak 1559,30 MWh olarak hesaplanmıştır. Tahmini enerji üretimi % 4,73'lik bir fark ile ölçülen değere yakın çıkmıştır. Aradaki fark, PVsyst'in ölçülen hava durumu verilerinden ve sistemin sadece ilk yıl üretimi ile kıyaslanmış olmasındandır. Modüller zamanla verim kaybı yaşar. PVsyst'te 25 yıl boyunca yaşanan bu verim kayıplarını göz önünde bulundurarak hesaplama yaptığımız PVsyst sonuçları üretilen enerjiden daha az çıkmıştır. Ölçülen hava durumu verilerine göre simülasyon gerçekleştirildiğinde tahmin edilen üretim değeri 1622,8 MWh olup, gerçek üretim değeri 1633,09 MWh olan sonuçtan %0,63 daha az çıkmıştır. Dolayısıyla ölçülen hava durumu verileri programda girdi olarak kullanıldığında üretilen enerji değerinin ölçülen sistemdeki enerji değerlerine daha da yaklaştığı görülmüştür. Şekil 10'da şebekeye verilen aylık toplam enerjinin gerçek ve tahmini değerleri görülmektedir. Şebekeye verilen aylık toplam enerji Aralık ayında 31,4 MWh ile en düşük seviyede iken Temmuz ayında 199,6 MWh değeri ile en yüksek seviyesine ulaştı. Enerji üretimi, ışınımına bağlıdır. Ayrıca, enerji üretiminin sıcaklıktaki değişikliklerden etkilendiği de gözlenmiştir. Ölçülen enerji değeri ile tahmin edilen enerji arasındaki fark en yüksek Aralık ayında gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise ölçülen ve simülasyonda kullanılan ışınım değerlerinin arasındaki farkın en fazla bu ay olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 10: Tahmin edilen ve ölçülen şebekeye aktarılan aylık toplam enerji



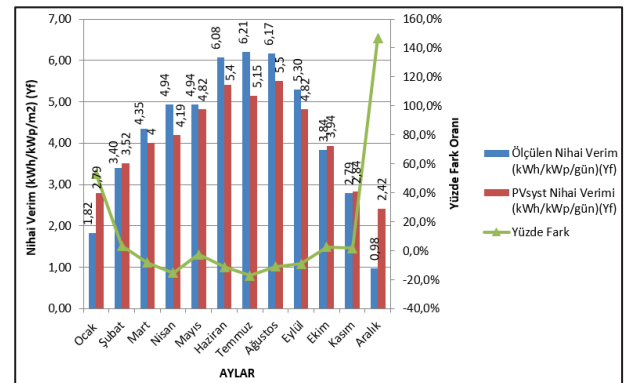
Şekil 11: Ölçülen ve simüle edilen aylık referans verimi

4.3.2 Referans verim (Y_R)

Referans verim Y_R, toplam düzleme gelen güneş ışınım H_T (kWh/m²)'nin standart test koşullarındaki referans ışınım G_{STC} (kW/m²) değerine bölünmesi ile elde edilir [25]. Şekil 11, ölçülen ve simüle edilen aylık ortalama referans verimi göstermektedir. Ölçülen maksimum referans verim Ağustos ayında yaklaşık 7,55 saat/gün iken tahmini en yüksek referans verim de Ağustos ayında 6,89 saat/gün olarak görülmektedir.

4.3.3 Nihai verim (Y_F)

Nihai verim Y_F, üretilen enerjinin normalizasyonuna izin veren ideal bir göstergedir [26]-[27]. Nihai verim Y_F, üretilen yıllık, aylık veya günlük net enerji olan E_{AC}'nin P_{DC}'e bölünmesi ile hesaplanır. P_{DC}, kurulu FV dizisinin standart test koşullarındaki (1kW/m² güneş ışınımı ve 25°C'lik hücre sıcaklığı) nominal gücü olarak tanımlanır. Şekil 12'de, ölçülen ve simüle edilen nihai verim görülmektedir. Ölçülen maksimum nihai verim değeri 6,21 kWh/kWp/gün ile Temmuz ayında iken, simülasyon sonuçlarında 5,50 kWh/kWp/gün ile Ağustos ayında elde edilmiştir. Nihai verimin ışınım ve sıcaklık değerleriyle orantılı olduğu görülmüştür.



Şekil 12: Ölçülen ve simüle edilen nihai verim

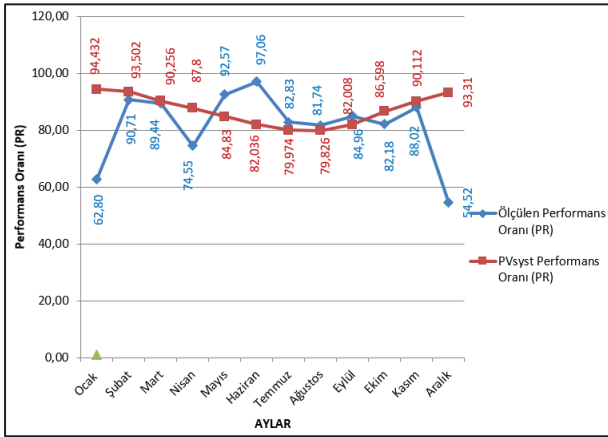
4.3.4 Performans oranı (PR)

Performans oranı PR, alınan ışınım göre şebekeyi besleyen enerjiyi normalleştiren bir göstergedir. Farklı bölgelerde ve farklı zamanlarda FV sistemlerinin performanslarını karşılaştırmak ve değerlendirmek için kullanılır [24], [28]. PR, Güneş Enerjisi Santrallerinin verimliliğini ölçmek için kullanılan en önemli parametrelerden biridir. PR bir sistemin kurulum kalitesini belirtmek için kullanılır, ancak üretilen enerji miktarını belirtmez. Literatürde iyi bir ışınlanma

bölgesinde bulunan düşük PR sisteminin, daha düşük bir ışınlama bölgesinde bulunan yüksek PR sisteminden daha fazla enerji üretme olasılığının olduğu görülmüştür [29]. Başka bir araştırmanın bulguları, PR'nın değerinin artmasıyla güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm oranının arttığını kanıtlamaktadır [30].

Genel olarak, FV sistemlerin performans bozulmasının sadece FV modüllerden kaynaklandığı varsayılmaktadır. Ancak performansı değerlendirirken, sistem ile hava durumu verileri arasındaki dengeye bakılması tavsiye edilir [31]. PR, 0,1 ile 0,99 aralığındadır. PR değerinin 1'e yaklaşması sistem performansının daha iyi olduğunu gösterir. PR değerini 100 ile çarpmak, performans açısından verimlilik yüzdesini verir.

NREL (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı), yeni bir sistemin standart PR'sinin en az %77 olması gerektiğini ve sistemin performansının yıllık bazda yaklaşık %1 azaldığını bildirmiştir [29]. Elazığ ilinde yer alan FV Güneş Enerjisi Santrali için PVsyst programından hesaplanan yıllık ortalama PR %85,61'dir. Şekil 13'de ölçülen ve tahmin edilen aylık ortalama performans oranı grafiği görülmektedir.

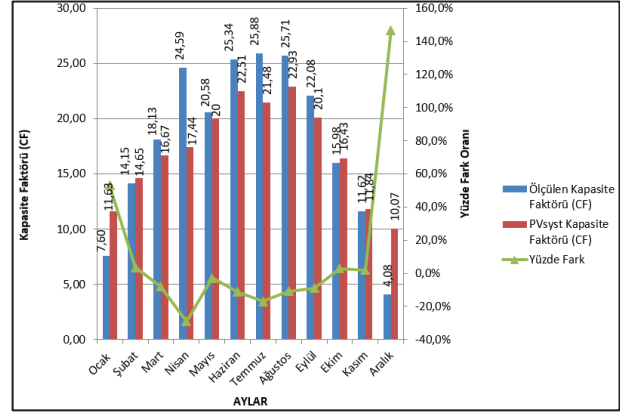


Şekil 13: Ölçülen ve simüle edilen performans oranı

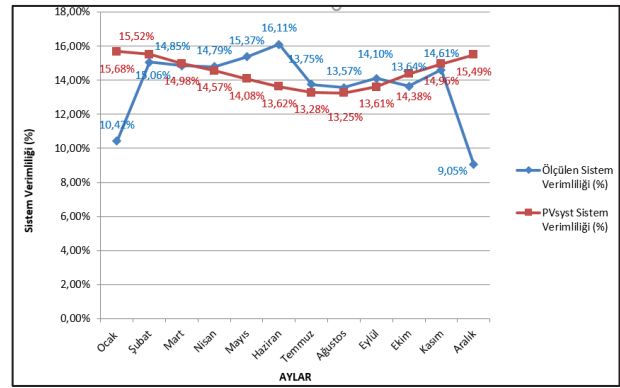
4.3.5 Kapasite faktörü (CF)

FV sisteminin kapasite faktörü CF, belli bir zaman dilimi boyunca enerji üretim tesisinin ölçülen çıktısı ile tüm zaman zarfında değerini tam kapasitesinde çalışmış varsayılan potansiyel çıkışı arasındaki orandır [32].

CF, gerçek yıllık enerji çıkışı E_{AC} 'nin, bir yıl boyunca günde 24 saat tam güçte P_{DC} 'de çalıştırıldığı takdirde güneş FV sistemin üreteceği enerji miktarına oranı olarak tanımlanır [24]. Simüle edilen ve ölçülen aylık kapasite faktörü Şekil 14'de görülmektedir. Yıllık ortalama kapasite faktörü ölçülen sistemde %17,98 iken, simüle edilen sistemde %17,15 olarak bulunmuştur. Bu parametrede çevresel değişiklikler, yani sıcaklık, ışınım ve FV modüllerin bozulması göz önüne alınmamıştır. Dahası, FV sistemin günde 24 saat güç ürettiğini varsaymaktadır ki bu gerçekte geçerli değildir. Yüksek güneş ışınımının olduğu bölgelerdeki FV sistemlerin % 20,8 ile % 26 arasında CF değerlerine sahip olması beklenir [33].



Şekil 14: Ölçülen ve simüle edilen kapasite faktörü



Şekil 15: Ölçülen ve simüle edilen sistem verimliliği

4.3.5 Sistem verimliliği (n_{sys})

FV sistemlerinin enerji performansı, bu sistemlerde kullanılan ekipmanların genel verimliliğine bağlıdır [34]. Sistem verimliliği n_{sys} , sistem tarafından üretilen enerjinin FV yüzey oranına yansıyan radyasyon miktarına göre hesaplanır. Yıllık, aylık ve hatta günlük periyotlarda hesaplanabilir [35]. Şekil 15, FV Güneş Enerji Santrali'nin ölçülen ve tahmin edilen sistem verimliliğini göstermektedir. Ortalama ölçülen sistem veriminin (%13,78) simüle edilen sistem veriminden (%14,45) daha az olması bunun Ocak, Ocak ve Şubat aylarında kaydedilen elektrik üretim azlığından kaynaklandığını göstermektedir.

Ayrıca santralin 2018 yılına ait ortalama yıllık ölçülen enerji verimi ise 1575,12 kWh/kWp olup, simüle edilen enerji verimi PVsyst simülasyon programı kullanılarak 1503,95 kWh/kWp olarak bulunmuştur. Ölçülen ve simüle edilen enerji verimi arasındaki farklılıklar PVsyst'teki kayıpların fiili işletme kayıplarından farklı olmasından ve hava durumu tahminlerinin farklılıklarından kaynaklanmaktadır.

6. Sonuçlar

FV sistemlerin kullanımı son yıllarda geleneksel fosil yakıtların azalması ve çevre sorunlarının giderek artması sebebiyle hızla artmaktadır. FV teknolojisinin diğer güneş enerjisi teknolojilerine kıyasla kurulumu daha kolay ve ucuzdur. Fakat günümüzde güneş enerjisi ile üretilen elektrik hala dünyanın enerji dağıtımında küçük bir paya sahiptir. Bu nedenle yapılan her çalışmayla FV güneş enerji sistemlerinin dünya üzerinde kurulumunun artmasına ve insanlığın temiz

ve ucuz enerjiye ulaşılma şanslarının artmasına katkıda bulunmaktadır.

İlgili çalışmada Ocak 2018-Aralık 2018 tarihleri arasında Elazığ ilinde yer alan FV Güneş Enerjisi Santralinden toplanan gerçek veriler analiz edilerek tesisin performans parametreleri hesaplanmıştır. Ölçülen değerler ile PVSyst yazılımı kullanılarak elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Simülasyon. Metenorm 7.1 tarafından üretilen meteorolojik uzun vadeli veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma sonuçlarının birbirine yakın çıkması santralin güç üretiminin yakından takip edilmesine ve yeterli bakım planlarının oluşturulmasına imkan sağlayacaktır. Ayrıca gelecekte kurulacak olan FV güneş enerji santrallerinin performans tahminlerinin hesaplanmasında iyi bir referans olacaktır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Ocak 2018-Aralık 2018 arasında ortalama radyasyon değeri ölçülen sistemde 138,57 kWh/m² iken Metenorm 7.1 verilerine göre ise 130,09 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Ölçülen sistemdeki ortalama radyasyon değerlerinin Metenorm 7.1 verilerine kıyasla %6,52 daha fazla olduğu gözlenmiştir.

- Ocak 2018-Aralık 2018 arasında ortalama sıcaklık değeri ölçülen sistemde 15,44°C iken Metenorm 7.1 verilerine göre ise 13,04°C olarak hesaplanmıştır. Ölçülen sistemdeki ortalama sıcaklık değerlerinin Metenorm 7.1 verilerine kıyasla %18,4 daha fazla olduğu gözlenmiştir.

- FV sistemi tarafından Ocak 2018-Aralık 2018 arasında üretilen toplam enerji 1.633,093 MWh iken tahmin edilen üretim değeri ise 1559,3 MWh olmuştur. Dolayısıyla ölçülen sistemdeki toplam enerji değeri simüle edilen sistemdeki enerji üretim değerinden %4,73 daha fazla çıkmıştır. Ölçülen veriler santralin ilk yılına ait sonuçlardır. Dolayısı ile FV modülün en maksimum verimde olduğu çalışma zamanı dikkate alınmış olup zaman içerisindeki modül degradasyonu dikkate alınmamıştır. Bu sebeple gerçek üretim değerleri simülasyon verilerinden daha fazla çıkmıştır.

- Ölçülen ve simüle edilen aylık enerji verimi arasında daha iyi bir karşılaştırma yapmak için sahada ölçülen hava verileri kullanılarak simülasyon yapılmalıdır. Ölçülen hava durumu verilerine göre simülasyon gerçekleştirildiğinde tahmin edilen üretim değeri 1622,8 MWh olup gerçek üretim değeri 1633,093 MWh olan sonuçtan %0,63 daha az olduğu görülmüştür. Dolayısıyla ölçülen hava durumu verileri PVSyst simülasyon programında girdi olarak kullanıldığında üretilen enerji değerinin ölçülen sistemdeki enerji değerlerine daha da yaklaştığı görülmüştür.

- Ocak 2018-Aralık 2018 arasında ortalama performans oranı ölçülen sistemde %83,78 olarak bulunurken. Metenorm 7.1 verilerine göre ise %85,61 olarak hesaplanmıştır. Ölçülen sistemdeki performans oranının simüle edilen sistem verilerine kıyasla %2,18 daha az olduğu gözlenmiştir. Ölçülen yıllık performans oranının Elazığ bölgesinde güneş enerjisi üretimi için güneş potansiyelinin uygun olduğunu göstermektedir.

7. Kaynaklar

[1] E. Akcan, M. Kuncan, ve M.R. Minaz, "Pvsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modeldenmesi ve Simülasyonu", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, c. 18, ss. 248-261, Mart-Nisan 2020.

[2] Solarist Güneş Enerjisi Portalı, URL: <https://www.solar.ist/wp-content/uploads/2023/01/Aral%CC%8c%CC%A7-Raporu.pdf> (Erişim zamanı; 05, 29, 2023).

[3] T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, URL: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (Erişim zamanı; 05, 29, 2023).

[4] T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, URL: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/23.aspx> (Erişim zamanı; 05, 29, 2023).

[5] PVSyst Tutorials, URL: <https://www.pvsyst.com/wp-content/pdf-tutorials/pvsyst-tutorial-v6-grid-connected-en.pdf> (Erişim zamanı; 07, 18, 2021).

[6] PVSyst Help, URL: <http://files.pvsyst.com/help/> (Erişim zamanı; 07, 18, 2021).

[7] K. Mertens, Photovoltaics: Fundamentals. Technology and Practice, Wiley, UK, 2018.

[8] K. Bakirci, "Evaluation of models for prediction of diffuse solar radiation and comparison with satellite values", Journal of Cleaner Production, c. 374, ss. 133892, Kasım 2022.

[9] L. Queval, "Estimation of the electricity production of a PV installation using PVGIS", Engineering school, CentraleSupélec, France, 2023.

[10] D. D. Milosavljević, T. S. Kevkić ve S. J. Jovanović, "Review and Validation of Photovoltaic Solar Simulation Tools/Software Based on Case Study", Open Physics, c. 20, sayı 1, ss. 431-451, Mayıs 2022.

[11] C. Haydaroglu ve B. Gumüş, "Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santralinin Pvsyst ile Simülasyonu ve Performans Parametrelerinin Değerlendirilmesi", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 7, sayı 3, ss. 491-500, Aralık 2016.

[12] M. R. Sancar ve A. B. Bayram, "Modeling and Economic Analysis of Greenhouse Top Solar Power Plant with Pvsyst Software", International Journal of Engineering and Innovative Research, c. 5, sayı 1, ss. 48-59, Ocak 2023.

[13] A. T. İnan ve A. Şimşek, "Solar Power Plant Efficiency and Economically Analysis in Different Regional Climate for Selected Cities in Turkey", International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, c. 34, sayı 4, ss. 603-610, Aralık 2022.

[14] C. Bakır ve A. Yılcı, "Türkiye'deki Farklı İller İçin Şebekeye Bağlı Arazi ve Çatı Tipi Lisanssız Fotovoltaik Güç Santrallerinin Tekno-Ekonomik Analizi", Mühendis ve Makina, c. 63, sayı 709, ss. 560-584, Aralık 2022.

[15] L. C. Kumruoğlu ve S. B. Ateş, "Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli ve İskenderun için Örnek Üretim Projeksiyonu", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, c. 37, sayı 1, ss. 293-305, Nisan 2022.

[16] National Renewable Energy Laboratory, URL: https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/2014_pvmrw_84_gostein.pdf (Erişim zamanı; 07, 30, 2021).

[17] B. Marion, J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond ve T. Fletcher, "Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems", Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005, ss. 1601-1606.

[18] A. Haibaoui, B. Hartiti, A. Elamim, M. Karami ve A. Ridah, "Performance Indicators for Grid-Connected PV Systems: A Case Study in Casablanca, Morocco", IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, c. 12, sayı 2, ss. 55-65, Mart-Nisan 2017.

[19] F. Cherfa, A.H. Arab, R. Oussaid, K. Abdeladim, ve S. Boychakour, "Performance Analysis of the Mini-Grid Connected Photovoltaics System at Algiers", Energy Procedia, c. 83, ss. 226-236, Aralık 2015.

[20] N. Pearsall, The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment, Woodhead Publishing, UK, 2016.

- [21] A.F. Minai, T. Usmani, M.A. Alotaibi, H. Malik ve M.E. Nassar, "Performance Analysis and Comparative Study of a 467.2 kWp Grid-Interactive SPV System: A Case Study", *Energies*, c. 15, sayı 3, ss. 1107, Şubat 2022.
- [22] M.E. Başoğlu, A. Kazdaloğlu, T. Erfidan, M.Z. Bilgin, ve B. Çakır, "Performance Analyzes of Different Photovoltaic Module Technologies under Izmit, Kocaeli Climatic Conditions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 52, ss. 357-365, Aralık 2015.
- [23] M. Diez-Mesiavilla, C. Alonso-Tristan, M.C. Rodriguez-Amigo, T. Garcia-Calderon ve M.I. Dieste-Velasco, "Performance Analysis of PV Plants: Optimization for Improving Profitability", *Energy Conversion and Management*, c. 54, sayı 1, ss. 17-23, Şubat 2012.
- [24] L.M. Ayompe, A. Duffy, S.J. McCormack ve M. Conlon, "Measured Performance of a 1.72 kW Rooftop Grid Connected Photovoltaic System in Ireland", *Energy Conversion and Management*, c. 52, sayı 2, ss. 816-825, Şubat 2011.
- [25] E. Kymakis, S. Kalykakis ve T.M. Papazoglou, "Performance Analysis of a Grid Connected Photovoltaic Park on the Island of Crete", *Energy Conversion and Management*, c. 50, sayı 3, ss. 433-438, Mart 2009.
- [26] A. Al-Otaibi, A. Al-Qattan, F. Fairouz ve A. Al-Mulla, "Performance Evaluation of Photovoltaic Systems on Kuwaiti Schools' Rooftop", *Energy Conversion and Management*, c.95, ss. 110-119, Mayıs 2015.
- [27] A. Allouhi, R. Saadani, T. Kousksou, R. Saidur, A. Jamil ve M. Rahmoune, "Grid-Connected PV System Installed on Institutional Buildings: Technology Comparison. Energy Analysis and Economic Performance", *Energy and Buildings*, c. 130, ss. 188-201, Ekim 2005.
- [28] S. Rehman ve I. El-Amin, "Performance Evaluation of an Off-Grid Photovoltaic System in Saudi Arabia", *Energy*, c. 46, sayı 1, ss. 451-458, Ekim 2012.
- [29] A.A. Babatunde ve S. Abbasoğlu, "Evaluation of Field Data and Simulation Results of a Photovoltaic System in Countries with High Solar Radiation", *Turkish Journal of Electrical & Computer Sciences*, c. 23, sayı 6, ss. 1608-1618, Kasım 2015.
- [30] R. Faranda, M. Gualdoni, S. Leva, M. Monaco ve A. Timidei, "Analysis of a PV System with Single-Axis Tracking Energy Production and Performances", 3rd International Conference on Clean Electrical Power, Ocak 2011, ss. 130-136.
- [31] R. Bohra, Performance Analysis of 1 MW SPV Plant; Temperature Corrected PR, Malpani Group, India, Tech. Report, 2014.
- [32] E.N. Kumi ve A. Brew-Hammond, "Design and Analysis of a 1 MW Grid-Connected Solar PV system in Ghana", *African Technology Policy Studies Network*, 2013, ss. 24.
- [33] R. Gottschalg, T.R. Betts, D.G. Infield ve M.J. Kearney, "The Effect of Spectral Variations on the Performance Parameters of Single and Double Junction Amorphous Silicon Solar Cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c. 85, sayı 3, ss. 415-428, Ocak 2005.
- [34] A. Guenounou, A. Malek ve M. Aillerie, "Comparative Performance of PV Panels of Different Technologies Over One Year of Exposure: Application to a Coastal Mediterranean Region of Algeria", *Energy Conversion and Management*, c. 114, ss. 356-363, Nisan 2016.
- [35] M. Adaramola ve E. Vagnes, "Preliminary Assessment of a Small-Scale Rooftop PV Grid Tied in Norwegian Climatic Conditions", *Energy Conversion and Management*, c. 90, ss. 458-465, Ocak 2015.

Özgeçmişler



Zeynep Tanış, Marmara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (%100 İngilizce) Bölümü lisans eğitimini 2010-2015 yılları arasında tamamladı. Lisans eğitimini tamamladıktan sonra Solvo Solar Enerji firmasında Proje Mühendisi olarak 2019 tarihine kadar çalıştı. Çalışma hayatının yanısıra Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansını 2016-2019 yılları arasında tamamladı. Şu anda 2019 yılında başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine devam etmektedir.



Nihan Altıntaş, lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. 2015 yılında Wisconsin Medison Üniversitesinde post-doktora çalışmalarında bulunmuştur. Halen Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Dr.Öğr.Üyesi olarak görev yapmakta ve Güç Elektroniği alanında eğitim-öğretim ve araştırma faaliyetlerinde bulunmaya devam etmektedir. Başlıca çalışma konuları, DC-DC dönüştürücüler, Yumuşak anahtarlama, Güç faktörü düzeltme, Endüksiyonla ısıtma, Elektrikli araçlar ve Yenilenebilir enerji sistemleridir. Güç elektroniği alanında çok sayıda dergi ve konferans makalesi bulunmaktadır.